

УДК 669.01:539.4;539.2

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

ШИЯН А.В., к.ф.-м.н.

Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Вернадского, 36, 02142, Киев, Украина, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail: kotr@imp.kiev.ua

Аннотация. Цель. Существующие методы оценки эффекта охрупчивания титановых сплавов связаны с обязательным проведением дорогостоящих экспериментов. Для расчетного прогнозирования величин критических параметров механической стабильности и прочности в условиях концентрации напряжений необходима разработка принципов оценки эффекта охрупчивания конструкционных титановых сплавов на основе концепции механической стабильности. **Методика.** На основе собственных экспериментальных данных установлены закономерности изменения конструкционного качества и предложена модель структурно-механического охрупчивания конструкционных титановых сплавов. **Результаты.** На основе установленных ранее различий между видами поведения механических характеристик конструкционных титановых сплавов введено понятие видовых переходов для этих сплавов. Впервые получены модельные закономерности структурно-механического охрупчивания титановых сплавов, которые позволили разработать алгоритм расчетного определения критических параметров механической стабильности K_{msc} , прочности $\sigma_{0,2C}$, прочности σ_{2C} при деформации $\epsilon_c \approx 2\%$ и температуры хрупкости T_c по результатам испытаний на одноосное растяжение гладких образцов. **Научная новизна.** Установлено, что модельные закономерности структурно-механического охрупчивания конструкционных титановых сплавов идентичны аналогичным закономерностям для конструкционных сталей и зависят только от структурного состояния сплава, геометрии концентратора напряжений и условий напряженно-деформированного состояния и видового перехода. **Практическая значимость.** Использование разработанной методики оценки эффекта охрупчивания позволяет определить величины критических параметров механической стабильности и прочности при температуре хрупкости T_c конструкционного титанового сплава, содержащего концентратор напряжений определенной геометрии и находящегося в данных условиях напряженно-деформированного состояния. При этом достаточно знать величины условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_2 при критической степени деформации $\epsilon_c \approx 2\%$, определяемые по результатам испытаний гладких образцов на одноосное статическое растяжение при комнатной температуре, температурные зависимости этих характеристик, а также информацию о видовом переходе для данного сплава. Для концентраторов напряжений и условий нагружения, отличных от модельных, необходимо дополнительно знать закономерности структурно-механического охрупчивания, которые можно определить по результатам испытаний только одного образца в этих условиях для каждого видового перехода.

Ключевые слова: хрупкая прочность; концентраторы напряжений; механическая стабильность; охрупчивание, конструкционное качество

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧНЕ ОКРИХЧЕННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ

ШИЯН А.В., к.ф.-м.н.

Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Вернадского, 36, 02142, Київ, Україна, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail: shvian_av@ukr.net

Анотация. Мета. Існуючі методи оцінки ефекту окрихчення титанових сплавів пов'язані з обов'язковим проведенням експериментів, які дорого коштують. Для розрахункового прогнозування величин критичних параметрів механічної стабільності і міцності в умовах концентрації напружень необхідна розробка принципів оцінки ефекту окрихчення конструкційних титанових сплавів на основі концепції механічної стабільності. **Методика.** На основі власних експериментальних даних встановлені закономірності зміни конструкційної якості та запропонована модель структурно-механічного окрихчення конструкційних титанових сплавів. **Результати.** На основі встановлених раніше відмінностей між видами поведінки механічних характеристик конструкційних титанових сплавів введено поняття видових переходів для цих сплавів. Вперше отримані модельні закономірності структурно-механічного окрихчення титанових сплавів, які дозволили розробити алгоритм розрахункового визначення критичних параметрів механічної стабільності K_{msc} , міцності $\sigma_{0,2C}$, міцності σ_{2C} при деформації $\epsilon_c \approx 2\%$ і температури крихкості T_c за результатами випробувань на однісіне розтягнення гладких зразків. **Наукова новизна.** Встановлено, що модельні закономірності структурно-механічного окрихчення конструкційних титанових сплавів ідентичні аналогічним закономірностям для конструкційних сталей і залежать тільки від структурного стану сплаву, геометрії концентратора напружень та умов напружено-деформованого стану, а також видового переходу. **Практична значимість.** Використання розробленої методики оцінки ефекту окрихчення дозволяє визначити величини критичних параметрів механічної стабільності і міцності при температурі крихкості T_c конструкційного титанового сплаву, що має концентратор напружень певної геометрії та що знаходиться в даних умовах напружено-деформованого стану. При цьому достатньо знати величини умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_2 при критичному ступеню деформації $\epsilon_c \approx 2\%$, що

визначаються за результатами випробувань гладких зразків на одновісне статичне розтягнення при кімнатній температурі, температурні залежності цих характеристик, а також інформацію щодо видового переходу для даного сплаву. Для концентраторів напружень і умов навантаження, відмінних від модельних, необхідно додатково знати закономірності структурно-механічного окрихчення, які можна визначити за результатами випробувань тільки одного зразка в цих умовах для кожного видового переходу.

Ключові слова: крихка міцність, концентратори напружень, механічна стабільність, окрихчення, конструкційна якість

STRUCTURAL AND MECHANICAL EMBRITTLEMENT OF TITANIUM ALLOYS UNDER STRESS CONCENTRATION

SHIYAN A.V., *Cand. Sc. (Phys. and Math.)*

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of NAS of the Ukraine, 36, Vernadsky av., 02142, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 452-13-52, e-mail: kotr@imp.kiev.ua

Abstract. Purpose. Existing methods for assessing the effect of embrittlement of titanium alloys are associated with compulsory costly experiments. For settlement prediction of the critical parameters of the mechanical stability and strength under conditions of stress concentration is necessary to develop principles for assessing the effect of embrittlement of structural titanium alloys based on the concept of mechanical stability. **Methodology.** On the basis of our experimental data set patterns of change in the structural quality and the model of structural and mechanical embrittlement of structural titanium alloys. **Findings.** On the basis of previously established differences between the behaviors of mechanical properties of structural titanium alloys introduced the concept of species transitions for these alloys. First obtained by modeling patterns of structural and mechanical embrittlement of titanium alloys, which allowed us to develop an algorithm of calculation of the critical parameters of the mechanical stability K_{msc} , strength $\sigma_{0,2C}$, strength σ_{2C} at the degree of deformation of $e_c \approx 2\%$ brittleness temperature T_c as a result of a uniaxial tensile test of smooth specimens. **Originality.** It was found that the model patterns of structural and mechanical embrittlement of structural titanium alloys are identical to those laws for structural steels and depend only on the structural state of the alloy, the geometry of a stress concentrator and conditions of stress-strain state of the species and the transition. **Practical value.** Using the developed methodology for assessing the effect of embrittlement possible to determine the critical parameters of the mechanical stability and strength of the structural fragility temperature T_c titanium alloy containing a stress concentrator and a certain geometry is in these conditions, the stress-strain state. It is sufficient to know the values of yield strength $\sigma_{0,2}$ and strength σ_2 at the critical degree of deformation of $e_c \approx 2\%$, determined according to the results of tests on the sample of smooth static uniaxial tensile test at room temperature, the temperature dependencies of these characteristics, as well as information about the species of the alloy to transition. To stress concentrators and loading conditions other than the model, must also know the laws of structural and mechanical embrittlement, which can be determined by test results of only one sample in these conditions for each species of transition.

Keywords: fragile strength; stress concentrators; mechanical stability; embrittlement; structural quality

Введение

Конструкционные титановые сплавы (КТС), как и конструкционные стали (КС), обладают различной реакцией на присутствие в изделиях соответствующего концентратора напряжений (КН), например, трещины или надреза, т.е. имеют различную чувствительность к эффекту охрупчивания, поэтому оценка их склонности к охрупчиванию в виде определенного показателя соответствующего механического свойства может представляться вполне актуальной задачей материаловедения. Изложенный в [1] феноменологический подход к объяснению состояния хрупкости металла, разработанный на основе концепции механической стабильности, и понимание эффекта охрупчивания в результате влияния различных факторов, в том числе КН, дает возможность оперировать в условиях концентрации напряжений такими количественными показателями, как критическое значение механической стабильности K_{msc} и ее остаточный резерв P_{ms} . Первый из них отражает степень потери исходной механической стабильности K_{ms} металла под воздействием КН, а второй – критическую температуру хрупкости образца с КН. Таким образом, представляется возможным разработать систему оценки эффективности охрупчивающего действия КН на КТС с различными уровнями прочности $\sigma_{0,2}$, пластичности ψ_k и исходной

механической стабильности K_{ms} в виде модели структурно-механического охрупчивания, построенной для этих сплавов на основе данных собственных экспериментов, проведенных в отделе физики прочности и разрушения ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. Такая модель должна стать основой для расчетного определения критических параметров прочности $\sigma_{0,2c}$, σ_{2c} , механической стабильности K_{msc} , P_{ms} и соответствующей критической температуры хрупкости T_c для образцов с любой геометрией КН, которые находятся в различных условиях напряженно-деформированного состояния (НДС).

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].

В работе [1] показано, что охрупчивание металлов, означающее определенную потерю части пластичности, можно рассматривать как следствие потери определенной части механической стабильности K_{msc} , определяемой при температуре T_c в условиях концентрации напряжений. Таким образом, разработка принципов оценки эффекта охрупчивания КТС при наличии КН путем расчетного определения критических параметров: механической стабильности K_{msc} , прочности металла σ_{2c} при деформации $e_c \approx 2\%$ и температуры T_c является важной и актуальной. Особенно привлекательной стороной такой методологии может стать возможность прогнозирования величин указанных критических параметров с использованием только базовых механических характеристик КТС – $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_k , полученных по результатам испытаний на одноосное растяжение стандартных гладких образцов.

Цель

Целью данной работы является разработка принципов оценки эффекта охрупчивания конструкционных титановых сплавов при наличии концентраторов напряжений путем расчетного определения критических параметров механической стабильности K_{msc} , прочности $\sigma_{0,2c}$, прочности σ_{2c} при деформации $e_c \approx 2\%$ и температуры хрупкости T_c , а также методологии прогнозирования величин указанных критических параметров с использованием только базовых механических характеристик металла.

Методика

С целью построения модели структурно-механического охрупчивания КТС была проведена обработка собственных экспериментальных данных с использованием методики [2], что позволило определить характеристики хрупкой прочности R_x для этих сплавов, а также характеристики исходной K_{ms} (при 293 К) и критической K_{msc} (при T_c) механической стабильности. В качестве объектов анализа выбирали сплавы, которые относятся к различным классам по структурному состоянию, качеству, химическому составу и назначению. Характеристики прочности исследованных КТС при комнатной температуре испытаний (293 К) изменялись в пределах от $\sigma_{0,2}=318$ МПа до $\sigma_{0,2}=1359$ МПа, а характеристики пластичности варьировались в пределах от $\psi_k=12,6\%$ до $\psi_k=73,0\%$. При этом проводили испытания на одноосное квазистатическое растяжение образцов с кольцевыми КН разной геометрии (радиус $r = 0,25$ мм; угол раскрытия $w = 45^\circ$; внешний диаметр $D = 8$ мм, диаметр под КН $d = 5,2$ мм – далее КН типа K1; $D = 12$ мм, $d = 8$ мм – далее КН типа K2). По результатам испытаний определяли величины критических температур хрупкости T_c по условию деградации характеристики пластичности (относительного сужения в момент разрушения ψ_N образца с КН) до критического уровня $\psi_N \approx 2\%$ [1] (рис. 1).

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 .

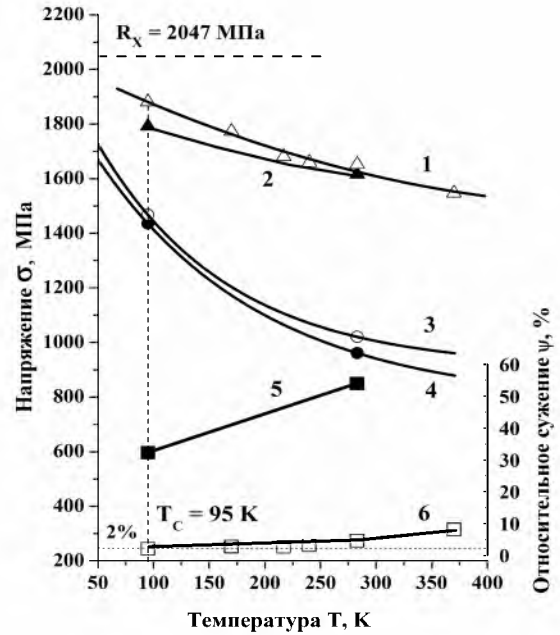


Рис.1. Температурные зависимости сплава VT22 при испытаниях на растяжение:

1 – среднее номинальное напряжение разрушения σ_{NF} образца с КН; 2 – истинное напряжение в момент разрушения S_R ; 3 – прочность σ_2 при критической степени деформации $e_c = 2\%$; 4 – условное напряжение предела текучести $\sigma_{0,2}$; 5 – относительное сужение в момент разрушения гладкого образца ψ_k ; 6 – то же для образца с КН ψ_N /

The temperature dependences of the alloy VT22 tensile test:

1 – average nominal fracture stress σ_{NF} specimens with the stress concentrators; 2 – true stress fracture point S_R ; 3 – strength σ_2 at the critical degree of deformation of $e_c = 2\%$; 4 – yield strength $\sigma_{0,2}$; 5 – relative reduction ψ_k ; 6 – same specimens with the stress concentrators ψ_N

Результаты определения базовых механических характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_k), а также характеристики хрупкой прочности R_x для исследованных КТС представлены в табл. 1.

Учитывая отмеченную в [3] эквидистантность зависимостей $\sigma_{0,2} = f(T)$ для КС и КТС в температурном интервале $T_{исп.} < 0,2 \cdot T_{пл}$ (где: $T_{пл}$ – температура плавления сплава), при построении температурной зависимости $\sigma_2(T)$ использовали базовую закономерность $\sigma_{0,2}(T)$, предложенную в работе [4] и модифицированную с учетом результатов работы [5] для условий квазистатического растяжения в следующем виде:

$$\sigma_{0,2}(T) = \sigma_{0,2}(293) + C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot T] - C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot 293] \quad (1)$$

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); C_1 – коэффициент, который характеризует максимальную высоту термически преодолимых барьеров; C_2 – коэффициент τ , который зависит от плотности дислокаций и длины дислокационных сегментов [5].

Таким образом, в выражении (1) значение коэффициента C_2 зависит от величины пластической деформации, а это позволяет использовать его для

построения не только зависимости $\sigma_{0,2} = f(T)$, но и зависимости $\sigma_2 = f(T)$ при условии сохранения значения коэффициента C_1 :

$$\sigma_2(T) = \sigma_2(293) + C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \varepsilon) \cdot T] - C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \varepsilon) \cdot 293] \quad (2)$$

где $\sigma_2(293)$ – прочность металла при критической деформации $e_c \approx 2\%$ и комнатной температуре испытаний (293 К) – определяется согласно [1].

В работе [6] было показано, что существует взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КТС, 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 поведения механических характеристик. Первый вид КТС при изменении прочности характеризуется наличием максимумов характеристик пластичности (ψ_k^{max}), а второй – наличием минимумов (ψ_k^{min}) при заданных уровнях механической стабильности K_{ms} . В указанной работе, по результатам обработки достаточно большого банка данных КТС, 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 ψ_k^{opt} и механической стабильности K_{ms}^{opt} КТС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Таким образом, анализ результатов, полученных в [6], показал, что отношения величин характеристик пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям ψ_k^{opt} и K_{ms}^{opt} на кривых оптимизации при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества КТС.

При этом сочетание характеристик ψ_k^{opt} и K_{ms}^{opt} 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 КТС по признаку сопротивляемости хрупкости металла в [7] был предложен параметр меры оптимальности (качества) $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ в виде отношения:

$$\mu_{K_{ms}}^\sigma = K_{ms} / K_{ms}^{\text{opt}} \quad (3)$$

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

$$\mu_{K_{msc}}^\sigma = K_{msc} / K_{msc}^{\text{opt}} \quad (4)$$

В [6] получены зависимости оптимальной величины механической стабильности K_{ms}^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$:

– для КТС 1-го вида поведения механических характеристик:

$$K_{ms}^{\text{opt}} = a - b \cdot \ln \left[\left(\frac{c - d \cdot \sigma_{0,2}}{e - k \cdot \sigma_{0,2}} \right)^m - 1 \right] \quad (5)$$

где: $a = 2,157$; $b = 0,140$; $c = 75,745$; $d = 0,043$ [МПа⁻¹]; $e = 71,780$; $k = 0,037$ [МПа⁻¹]; $m = -2,448$ – эмпирические коэффициенты;

– для КТС 2-го вида поведения механических характеристик:

$$K_{ms}^{\text{opt}} = a - b \cdot \sigma_{0,2}, \quad (6)$$

где $a = 3,922$; $b = 1,53 \cdot 10^{-3}$ [МПа⁻¹] – эмпирические коэффициенты.

Для получения зависимостей $\sigma_2^{\text{opt}} = f(\sigma_{0,2})$ брали значения прочности σ_2 при критической деформации $e_c \approx 2\%$ для оптимизированных (наилучших) КТС, используемых в [6] для построения кривых оптимизации. Анализ показал, что зависимости $\sigma_2^{\text{opt}} = f(\sigma_{0,2})$ хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией вида:

$$\sigma_2^{\text{opt}} = A_{1,2} \cdot \exp(\sigma_{0,2} / B_{1,2}) - C_{1,2}, \quad (7)$$

где: для КТС 1-го вида: $A_1 = 45,71 \pm 1,83$ [МПа]; $B_1 = 567,21 \pm 11,07$ [МПа]; $C_1 = 877,01 \pm 24,48$ [МПа]; а для КТС 2-го вида: $A_2 = 95,76 \pm 2,29$ [МПа]; $B_2 = 675,84 \pm 13,41$ [МПа]; $C_2 = 636,57 \pm 15,18$ [МПа] – эмпирические коэффициенты.

Таблица 1

Результаты определения характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_k при 293 К, критической температуры T_c и хрупкой прочности R_x / The results of the characterization $\sigma_{0,2}$, σ_B and ψ_k at 293 K, the critical temperature T_c and brittle strength R_x

Условное обозначение	КТС	Режим термической обработки	T_c , К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_k , %	R_x , МПа [184]
a	BT1-0	НГ 950°C, 0,5 часа, печное ОХ	73*	318	467	50,0	1489
b		НГ 550°C, 1 час, печное ОХ	39*	373	472	67,8	1116
c		НГ 900°C, 0,5 г., воздушное ОХ	5*	339	436	73,0	1134
d	BT6	НГ 880°C, 1 час, печное ОХ + 550°C, 5 час	228	1093	1123	35,3	1800
e		НГ 700°C, 1 час, печное ОХ	202	1005	1040	26,6	1828
k	BT22	НГ 820°C, 1 час, печное ОХ + 600°C, 1 час	283	1299	1333	15,8	2155
m		СТО Кс10°C/с до 900°C, печное ОХ + 630°C, 8 час	283	1359	1371	12,6	2210
n		Отжиг 750°C, 1 час, печное ОХ	95	961	995	54,0	2047

Примечания: * – получено методом экстраполяции; НГ – нагрев; ОХ – охлаждение; СТО – скоростная термообработка

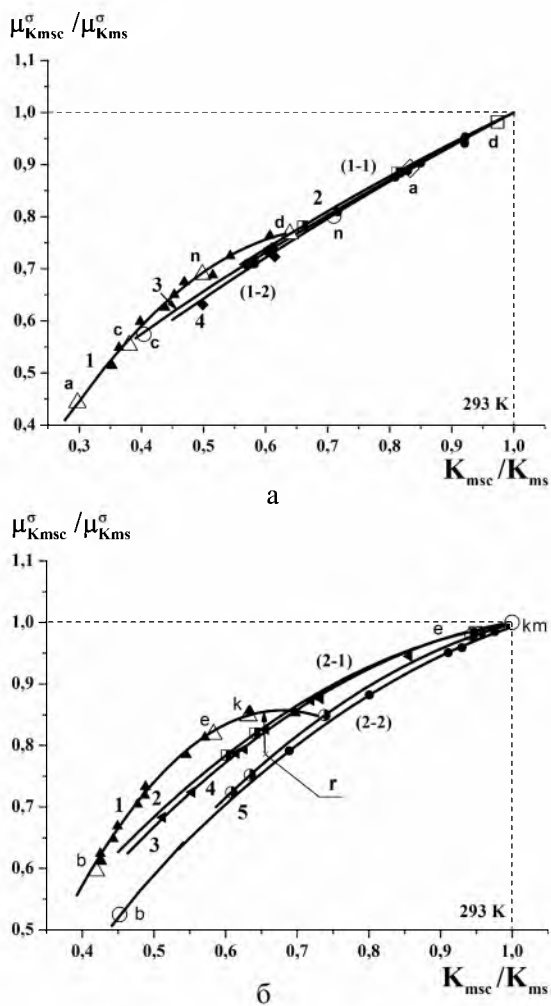


Рис. 2. Модель структурно-механического охрупчивания для КТС:

закономерности показателя степени изменения конструктивного качества металла $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma}$ под действием КН от соответствующего соотношения показателей механической стабильности K_{msc} / K_{ms} : а – 1-го начального вида; б – 2-го начального вида; 1 – образцы без КН; 2, 4 – образцы с КН типа К1; 3, 5 – образцы с КН типа К2; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) – ВП; экспериментальные данные: темные знаки – КС без КН и с КН типа К2 [1, 8]; светло-темные знаки – КС с КН типа К1 (ИМФ НАНУ); светлые знаки – КТС: Δ – без КН, \square – с КН типа К1, \circ – с КН типа К2; латинские буквы – обозначения КТС в табл. 1

Structural-mechanical model for structural embrittlement of titanium alloys:

patterns of structural change in the exponent of quality meta $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma}$ under the stress concentrators ratio of the corresponding characteristics of the mechanical stability K_{msc} / K_{ms} : а – 1st primary species; б – 2nd primary species; 1 – samples without stress concentrators; 2, 4 – specimens with stress concentrators type K1; 3, 5 – specimens with stress concentrators type K2; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) – specific transitions; Experimental data: dark marks – steels without stress concentrators and with stress concentrators type K2 [1, 8]; light-dark marks – steels with stress concentrators type K1 (IMP UAS); light marks – titanium alloys: Δ – without stress concentrators, \square – with stress concentrators type K1, \circ – with stress concentrators type K2; letters – titanium alloys designation in Table 1

Соответственно, для определения показателей K_{ms}^{opt}

и σ_{2c}^{opt} , в зависимости (5) – (7) вместо значений прочности $\sigma_{0,2}$ следует подставлять значения критической прочности $\sigma_{0,2c}$ при T_c .

В основу построения модели структурно-механического охрупчивания КТС и методики расчетного определения параметров охрупчиваемости положены закономерности изменения конструктивного 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 [1]. Указанные закономерности приведены на рис. 2 для обоих начальных (при $T_{исп} = 293$ К) видов КТС.

На рис. 2 в сравнении представлены также результаты испытаний образцов КС с КН типа К2 [1, 8] (темные знаки на рис. 2) и образцов КС с КН типа К1, полученные в ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины¹ (светло-темные знаки на рис. 2). 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 КТС в результате этих испытаний, т.е. на видовой переход (ВП), так как при этом изменяются показатели прочности металла при каждом из видов испытаний. ВП оказывает влияние на изменение показателя конструктивного 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 температуре T_c 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 ВП 1-2 или 2-1 (см. рис. 2).

Научная новизна и практическая значимость

Таким образом, из рис 2 очевидно, что модельные закономерности $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma} = f(K_{msc} / K_{ms})$ для образцов КТС без КН (кривые 1), с КН типа К1 (кривые 3, 5) и с КН типа К2 (кривые 2, 4) полностью идентичны соответствующим модельным закономерностям для КС без КН и под действием таких же КН. Отсюда следует важный вывод о том, что указанные закономерности инвариантны к типу конструктивного сплава (в рамках КС и КТС), а зависят только исключительно от влияния трех следующих факторов:

- структурного состояния, которое определяется режимами термообработки и/или термомеханической обработки и формирует базовые механические характеристики сплава ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_k);
- геометрии КН та вида НДС, т.е. фактора неоднородности силовых полей;

¹ Результаты получены сотрудниками отдела физики прочности и разрушения с.н.с. Ю.А. Полушкиным и асп. В.Н. Грищенко.

– ВП, который характеризует сохранение или изменение вида поведения механических характеристик сплава в начальных (при 293 К) та конечных (при T_c) условиях.

Аналитическое описание закономерностей изменения конструкционного качества КТС 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 вязко-хрупкого перехода T_c , была найдена связь показателя изменения прочности КТС 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 $\sigma_2^{\text{опт}}/\sigma_{2c}^{\text{опт}}$ (рис. 3). Здесь необходимо отметить, что исследованной выборки КТС было недостаточно для построения указанных зависимостей при ВП 1-2 и 2-1. Поэтому, опираясь на установленный выше факт идентичности закономерностей структурно-механического охрупчивания для КС и КТС, для установления таких зависимостей были использованы соответствующие данные КС под действием КН типа К2 [8], обработанные при помощи формулы (7), которая свойственна для расчетов показателей $\sigma_2^{\text{опт}}$ и $\sigma_{2c}^{\text{опт}}$ для КТС обоих видов.

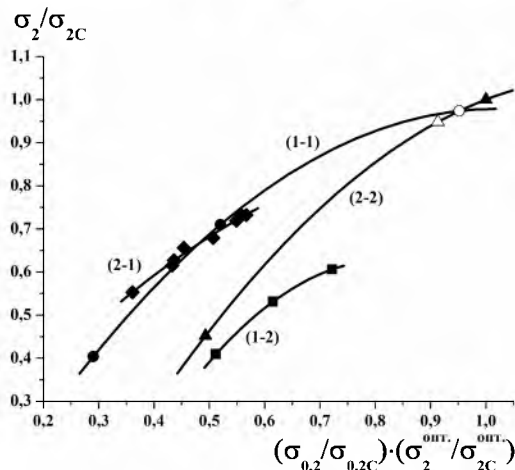


Рис. 3. Зависимости соотношения показателей прочности σ_2/σ_{2c} при $e_c \approx 2\%$: соотношение показателей условного предела текучести $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2c}$, нормированных на соответствующие оптимальные значения прочности при $e_c \approx 2\%$ для ВП 1-1, 1-2, 2-2, 2-1; экспериментальные данные: темные знаки – КН типа К2 и светлые знаки – КН типа К1 / Depending on the ratio of the strength σ_2/σ_{2c} at $e_c = 2\%$: the ratio of the yield strength $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2c}$, normalized to the respective optimal values strength $e_c \approx 2\%$ for specific transitions 1-1, 1-2, 2-2, 2-1; Experimental data : dark marks – stress concentrators type K2 and light marks – stress concentrators type K1

Зависимости, представленные на рис. 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 другой критической температуре хрупкости. Пример определения параметра σ_{2c} численными методами приведен на рис. 4 для одного из исследуемых КТС, где:

$$A = K_{ms}^{\text{опт}};$$

$$B = K_{msc}^{\text{опт}} \cdot \sigma_{2c} \cdot (A + B \cdot X - C \cdot X^2) / \sigma_2, \quad (8)$$

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

Таким образом, как и в случае с КС [8], зная величину параметра σ_{2c} , можно определить для КТС другие критические характеристики – прочность $\sigma_{0,2c}$ по температурным зависимостям $\sigma_2(T)$ и $\sigma_{0,2}(T)$ и меру охрупчивания $K_{msc} = R_x/\sigma_{2c}$ (где R_x – характеристика хрупкой прочности) [1], при температуре T_c или какой-либо другой критической температуре для образца с КН, используя при этом характеристики КТС $\sigma_{0,2}$, σ_2 и R_x , которые определяются по результатам испытаний гладких образцов на одноосное квазистатическое растяжение, а также информацию о ВП для искомого сплава.

Кроме того, можно решить обратную задачу – по известному значению любой критической характеристики $\sigma_{0,2c}$ или σ_{2c} на соответствующей температурной зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ или $\sigma_2(T)$ определить температуру хрупкости T_c или какую-либо другую критическую температуру для образца с КН.

Методика определения принадлежности КТС к начальному виду поведения механических характеристик по результатам испытаний гладкого образца на одноосное растяжение при $T_{исп.} = 293$ К приведена в [1]. Эта же методика может быть использована для определения конечной видовой принадлежности сплава при температуре T_c или другой критической температуре хрупкости, что достаточно для идентификации его ВП.

Результаты

Результаты использования предлагаемой методики определения расчетных значений прочности $\sigma_{2c}^{\text{расч}}$ (рис. 4) при критических температурах хрупкости T_c образцов с КН типа К1 и К2, соответствующих температур $T_c^{\text{расч}}$, а также оценки ее точности представлены в табл. 2 для всех исследуемых КТС.

А, В

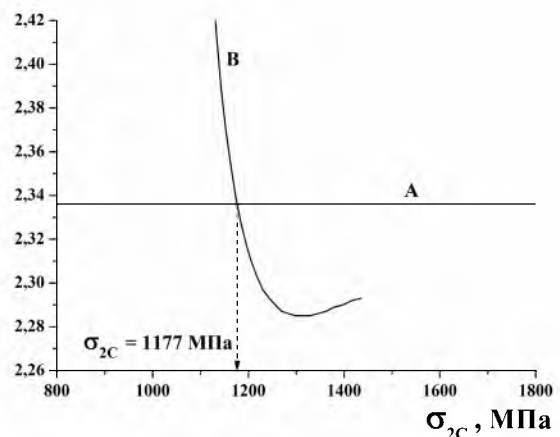


Рис. 4. Определение критической прочности σ_{2c} образца сплава ВТ6 с КН типа К1 при T_c («д» в табл. 1) по результатам решения системы уравнений (8) численными методами / Determination of the critical strength σ_{2c} sample alloy VT6 with stress concentrators type K1 at T_c («д» in Table 1) as a result of solving the system of equations (8), numerical methods

Из табл. 2 видно, что точность расчетного определения прочности металла $\sigma_{2c}^{расч}$, при которой относительная погрешность δ не превышает: при воздействии КН типа К1 $\pm 1,4$ %, а при воздействии КН типа К2 2,6 %, что достаточно для практического применения методики. При этом абсолютное отклонение расчетных значений критических температур хрупкости ΔT от экспериментальных для КН типа К1 не превышает ± 7 К, а для КН типа К2 – ± 12 К, что также является достаточно высоким показателем точности для использования на практике.

Важно также отметить, что точность регрессии базовых расчетных закономерностей

$$\mu_{K_{msc}}^{\sigma} / \mu_{K_{ms}}^{\sigma} = f(K_{msc}/K_{ms}) \quad \text{и} \quad \sigma_2/\sigma_{2c} = f[(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2c}) \cdot (\sigma_2^{опт} / \sigma_{2c}^{опт})],$$

при которой остаточная дисперсия не выше $3 \cdot 10^{-5}$ с достоверностью не ниже 0,996, позволяет считать эти зависимости функциональными.

Автор выражает надежду, что предлагаемая новая методика определения критических параметров охрупчивания в условиях действия неоднородных силовых полей станет полезным дополнением к применяемому ныне арсеналу методов оценки сопротивляемости конструкционных титановых сплавов хрупкости и, тем самым, будет способствовать повышению эксплуатационной надежности изделий,

конструкций и сооружений из этих материалов, нередко несущих в себе те или иные концентраторы напряжений и подвергающихся сложным условиям нагружения.

Выводы

1. Для определения величин критических параметров охрупчивания σ_{2c} , $\sigma_{0,2c}$, K_{msc} конструкционного титанового сплава (КТС), 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, температурные зависимости этих характеристик, а также информацию о видовом переходе для данного сплава. При этом необходимо также знать закономерности структурно-механического охрупчивания КТС для заданной геометрии КН и заданных условий НДС, которые можно определить по результатам испытаний только одного образца в этих условиях для каждого видового перехода.

2. По известному значению любой критической характеристики $\sigma_{0,2c}$ или σ_{2c} на соответствующей температурной зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ или $\sigma_2(T)$ определить температуру хрупкости T_c или какую-либо другую критическую температуру для образца с КН.

Таблица 2

Результаты использования методики определения расчетных значений прочности $\sigma_{2c}^{расч}$ при критических температурах хрупкости T_c образцов с КН типа К1 и К2, соответствующих значений температур $T_c^{расч}$, а также оценки ее точности /

The results of the use of methods for determining the design values of strength $\sigma_{2c}^{расч}$ at the transition temperature T_c samples with КН-type К1 and К2, the corresponding values of temperature $T_c^{расч}$, as well as to assess its accuracy

КТС (табл. 1)	КН типа К1						КН типа К2					
	$\sigma_{2c}^{эксп}$, 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 , %	$T_c^{эксп}$, К	$T_c^{расч}$, К	ΔT , К
a	--	--	--	--	--	--	681	690	-1,3	73*	70*	-3
b	--	--	--	--	--	--	1035	1048	-1,2	7*	5*	-2
c	--	--	--	--	--	--	1068	1040	+2,6	5*	9*	+4
d	1181	1176	+0,4	228	233	+5	--	--	--	--	--	--
e	1123	1107	+1,4	225	232	+7	--	--	--	--	--	--
k	--	--	--	--	--	--	1362	1343	+1,5	283	295	+12
m	--	--	--	--	--	--	1396	1402	-0,4	283	274	-9
n	--	--	--	--	--	--	1455	1450	+0,4	95	101	+6

Примечание: * – значения получены методом экстраполяции; δ – погрешность расчетного определения прочности $\sigma_{2c}^{расч}$ относительно экспериментального значения $\sigma_{2c}^{эксп}$; ΔT – абсолютное отклонение расчетных значений $T_c^{расч}$ от экспериментальных $T_c^{эксп}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Механическая стабильность металлов и сплавов / Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В. – К.: Наукова думка, 2014. – 278 с.
Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyani A.V. Mehanicheskaya stabilnost metallov i splavov [The mechanical stability of metals and alloys]. Kiev, Naukova Dumka, 2014. 278 p.

2. Ивасишин, О.М. Связь характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных

титановых сплавов / П.Е. Марковский, С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – 35, № 4. – С. 479–496.
Ivasishin O.M., Markowski P.E., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyani A.V. Svyaz harakteristik «hrupkoy» prochnosti i mehanicheskoy stabilnosti s bazovymi mehanicheskimi harakteristikami konstruksionnyh titanovykh splavov [Communication characteristics of the "fragile" strength and mechanical stability with the basic mechanical properties of structural titanium alloys]. Metallofizika i noveyshye tehnologii [Metal Physics and Advanced Technology], 2013, vol. 35, no. 4, pp. 479–496.

3. Механические свойства материалов при низких температурах / Д.А. Вигли. – М.: Мир, 1974. – 374 с.
Vigli D.A. Mehanicheskie svoystva materialov pri nizkih temperaturah [The mechanical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mir, 1974. 374 p.
4. 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.
5. Ярошевич, В.Д. Влияние структуры на активационные параметры процесса деформирования армко-железа при низких температурах / В.Д. Ярошевич, Д.Г. Рывкина // ФММ. – 1971, Т. 31, вып. 6. – С. 1293-1298.
Yaroshevich V.D., Ryvkina D.G. Vliyanie struktury na aktivatsionnye parametry protsessu deformirovaniya armko-zheleza pri nizkih temperaturah [Influence of structure on the activation parameters of the deformation process of Armco iron at low temperatures], FMM, 31, vol. 6, pp. 1293-1298.
6. Шиян, А.В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков // Металлознание та термічна обробка металів. – 2014. – № 4. – С. 54–75.
Shiyan A.V., Meshkov Yu.Ya. Vzaimosvyaz svoystv prochnosti, plastichnosti i mehanicheskoy stabilnosti konstruktsionnyh titanovykh splavov [Correlation properties of strength, ductility, and mechanical stability of the structural titanium alloys]. Metalloznaystvo ta termichna obrobka

- metalliv [Metallurgy and heat treatment of metals], 2014, no. 4, pp. 54–75.
7. Патент 104481, МПК 06, G01N, № 3/08, 3/18. Україна. Спосіб оцінки якості конструкційних металевих сплавів / Івасишин О.М., Марковський П.Є., Матвійчук Ю.В., Котречко С.О., Мешков Ю.Я., Шиян А.В., Стеценко Н.М., Сорока К.Ф. // Промислова власність. – 2014. – Бюл. № 3.
Patent 104481, MPK 06, G01N, № 3/08, 3/18. Ukraine. Sposib otsinki yakosti konstruktsiynykh metalovykh splaviv [A method of evaluating the quality of structural metal alloys] / Ivasishin O.M., Markowski P.E., Matviichuk Y.V., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Stetsenko N.N., Soroka E.F. / Industrial property, 2014, Bull. 3.
8. Шиян, А.В. Методические основы определения критической температуры хрупкости сталей в условиях концентрации напряжений / А.В. Шиян, Е.Ф. Сорока, О.П. Носенко // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 73, Серия «Стародубовские чтения 2014», – Днепропетровск, ПГАСА, 2014. – С. 53-64.
Shiyan A.V. Soroka E.F., Nosenko O.P. Metodicheskie osnovy opredeleniya kriticheskoy temperatury hrupkosti staley v usloviyah kontsentratsii napryazheniy [Methodological basis for determining the critical temperature of steel in conditions of stress concentration]. Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie [Construction, materials science, mechanical engineering]. In: Handbook of Scientific works. vol. 73 Series "Starodubovskie reading 2014", Dnepropetrovsk, DSACA, 2014, pp. 53-64.

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015