

PACSnumbers: 46.50.+a, 61.72.Hh, 62.20.fk, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt, 81.40.Ef, 81.40.Np

Основы формирования оптимального комплекса механических свойств для защиты от охрупчивания конструкционных титановых сплавов

А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина*

В рамках концепции конструкционной пригодности металлов и сплавов разработана физически обоснованная система взаимосвязи комплекса механических свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость» и принципы рационального формирования этих свойств в конструкционных титановых сплавах. Установлены основные закономерности такой связи свойств и причины, регулирующие как сам характер их изменений, так и степень чувствительности одних базовых характеристик металла к изменению других. Проведена сравнительная оценка резервов прочности конструкционных титановых сплавов по их способности сопротивляться хрупкому разрушению с использованием показателя механической стабильности K_{ms} и охрупчиванию с использованием показателя деформационной стойкости (изломостойкости) B_r . Сформулированы представления о качестве конструкционных титановых сплавов, как о мере их способности сопротивляться охрупчиванию. Предложен новый «индикатор» качества конструкционных титановых сплавов — мера механического качества по деформационной стойкости B_r при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$, отражающая их сопротивляемость охрупчиванию.

Ключевые слова: охрупчивание, деформационная стойкость, изломо-

Corresponding author: Artur Vitaliyovych Shiyany
E-mail: shyian_av@ukr.net

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. V. Shiyany and Yu. Ya. Meshkov, Bases of Formation of the Optimal Complex of Mechanical Properties for Protection against Construction Titanium Alloys Embrittlement, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 4: 501–527 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.04.0501](https://doi.org/10.15407/mfint.41.04.0501).

стойкость, кривая оптимизации, мера механического качества, конструкционная пригодность.

В межах концепції конструкційної придатності металів і сплавів розроблено фізично обґрунтовану систему взаємозв'язку комплексу механічних властивостей «пластичність–міцність–деформаційна стійкість» та принципи раціонального формування цих властивостей в конструкційних титанових стопах. Встановлено основні закономірності такого зв'язку і причини, що регулюють як сам характер їх змін, так і ступінь чутливості одних базових характеристик металу до зміни інших. Проведено порівняльну оцінку резервів міцності конструкційних титанових стопів за їх здібністю опиратись крихкому руйнуванню з використанням показника механічної стабільності K_{ms} та окрихченню з використанням показника деформаційної стійкості (зламостійкості) B_r . Сформульовано уявлення щодо якості конструкційних титанових стопів, як про міру їх здібності опиратися окрихченню. Запропоновано новий «індикатор» якості конструкційних титанових стопів — міру механічної якості за деформаційною стійкістю B_r при заданому значенні міцності $\sigma_{0,2}$, що відображає їх опірність окрихченню.

Ключові слова: окрихчення, деформаційна стійкість, зламостійкість, крива оптимізації, міра механічної якості, конструкційна придатність.

Within the framework of the concept of structural suitability of metals and alloys, a physically grounded scheme of interrelation between the complex of mechanical properties 'plasticity–strength–deformation endurance' and principles of rational formation of these properties for construction titanium alloys is developed. The main regularities of such connection between properties and causes that regulate both the nature of their changes and the degree of sensitivity of some of the basic characteristics of a metal to be changed due to other ones are established. A comparative estimation of the strength reserves of construction titanium alloys *via* their ability to resist brittle fracture using the K_{ms} mechanical stability index and to embrittlement using the deformation endurance (break resistance) B_r index is performed. Concepts concerning the quality of construction titanium alloys are formulated as a measure of their ability to resist embrittlement. A new 'indicator' of the quality of construction titanium alloys is proposed: a measure of mechanical quality according to the deformation endurance B_r for a given value of strength σ_y , which reflects alloys' resistance to embrittlement.

Key words: embrittlement, deformation endurance, break resistance, optimization curve, measure of mechanical quality, structural suitability.

(Получено 11 июля 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема поиска взаимосвязей между базовыми механическими характеристиками конструкционных металлических сплавов с це-

лью их оптимизации является насущной и актуальной для решения практических инженерных и технологических задач.

В работах [1, 2] была установлена система взаимосвязи между важнейшими свойствами конструкционных титановых сплавов (КТС) — пластичностью (ψ_K — относительное сужение в момент разрушения образца), прочностью ($\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести) и механической стабильностью (K_{ms}) с использованием критерия $K_{ms} = \text{const}$ в виде обобщённых диаграмм. Характеристика механической стабильности металла K_{ms} является базовой в условиях одноосного растяжения и для КТС определяется согласно зависимости [2, 4]:

$$K_{ms} = R_X / \sigma_2 = R_X / (\sigma_{0,2} \cdot 10^n), \quad (1)$$

где R_X — характеристика хрупкой прочности, σ_2 — прочность при критической степени деформации $e_c = 2\%$, n — показатель деформационного упрочнения [3].

Обобщённые диаграммы в системе взаимосвязи свойств « ψ_K – $\sigma_{0,2}$ – K_{ms} » позволяют осуществить анализ резерва прочности для защиты металла от хрупкого разрушения с использованием показателя механической стабильности K_{ms} по допустимому увеличению его прочности $\sigma_{0,2}$, а также оценивать уровень исходного механического качества данного сплава по показателю $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ с учётом вида поведения механических характеристик (видовой принадлежности), который определяется выпуклостью (1-й вид) или вогнутостью (2-й вид) параболических зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ [5]:

$$\mu_{K_{ms}}^\sigma = K_{ms} / K_{ms}^{\text{опт}}, \quad (2)$$

где $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ — мера оптимальности (механического качества) по механической стабильности K_{ms} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$, оптимальное (наилучшее) значение $K_{ms}^{\text{опт}}$ для КТС определяется согласно зависимостям:

для сплавов 1-го вида

$$K_{ms}^{\text{опт}} = a - b \ln \left[\left(\frac{c - d\sigma_{0,2}}{e - k\sigma_{0,2}} \right)^m - 1 \right], \quad (3)$$

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 сплавов 2-го вида

$$K_{ms}^{\text{опт}} = a - b\sigma_{0,2}, \quad (4)$$

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

Однако не менее важна оценка резерва прочности для защиты

металла от охрупчивания, реализуемого за счёт увеличения прочности при перегрузке выше $\sigma_{0,2}$ в результате деформационного упрочнения, с использованием показателя деформационной стойкости (изломостойкости) B_r [6]:

$$B_r = S_K / \sigma_{0,2}, \quad (5)$$

где S_K — истинное напряжение разрушения при одноосном растяжении.

В [1, 7] было получено выражение для расчётного определения характеристики истинного напряжения S_K в момент разрушения образца при испытаниях на одноосное растяжение с использованием только стандартных базовых механических характеристик металла σ_B и ψ_K для КТС широкого круга использования в температурном интервале $77 \text{ К} \leq T_{\text{исп}} \leq 293 \text{ К}$:

$$S_K = \sigma_B (1 + A\psi_K), \quad (6)$$

где $A = 0,934$ — эмпирический коэффициент, ψ_K — в долях.

Однако существует группа КТС, имеющих особое фазовое состояние, структуру и текстуру, обладающих вследствие этого особыми физико-механическими свойствами и предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (например, авиационных крепёжных болтов [8]). Для производства таких сплавов применяют специальные виды упрочняющей термической обработки (ТО) и/или термомеханической обработки (ТМО) (такие как, например, скоростная термическая обработка (СТО), холодное деформирование, пошаговая прокатка–ковка, скоростная полигонизация, старение и т.п.), а их отличительной механической характеристикой является повышенное значение показателя истинной равномерной деформации образца e_p при стандартных испытаниях на одноосное растяжение. Это проявляется в виде наличия значительной асимметрии диаграммы растяжения «напряжение–деформация» относительно показателя предела прочности σ_B , вследствие чего имеет место относительная близость значений σ_B и S_K при $e_p > (e_K - e_p)$, где e_K — истинная деформация в момент разрушения образца (рис. 1).

На рисунке 1 в сравнении представлены диаграммы «напряжение–деформация» титанового сплава ВТ22, испытанного в условиях квазистатического растяжения при комнатной температуре после стандартной ТО (отжиг (ОЖ) 750°C , 1 ч, воздушное охлаждение (ВО) — сплав «*n*» — кривая 1) и специальных ТО (скоростная термообработка (СТО) $10 \text{ К}\cdot\text{с}^{-1}$ 900°C , ВО + 630°C , 8 ч — сплав «*m*» — кривая 2), табл. 1 [2, 9]; (СТО $20 \text{ К}\cdot\text{с}^{-1}$ 920°C , закалка в воду (ЗВ) — кривая 3 [10]). Из представленных на указанном рисунке диаграмм растяжения наглядно видно, что использование СТО для титановых

сплавов приводит к их асимметрии относительно показателя σ_B , а основной механической характеристикой, регулирующей такой характер поведения КТС, является истинная равномерная деформация образца e_p , при этом $e_p > (e_K - e_p)$.

Согласно [9] для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления:

$$S_K = \sigma_B (A + B\psi_K), \quad (7)$$

где $A = 0,980$, $B = 0,132$ — эмпирические коэффициенты, ψ_K — в долях.

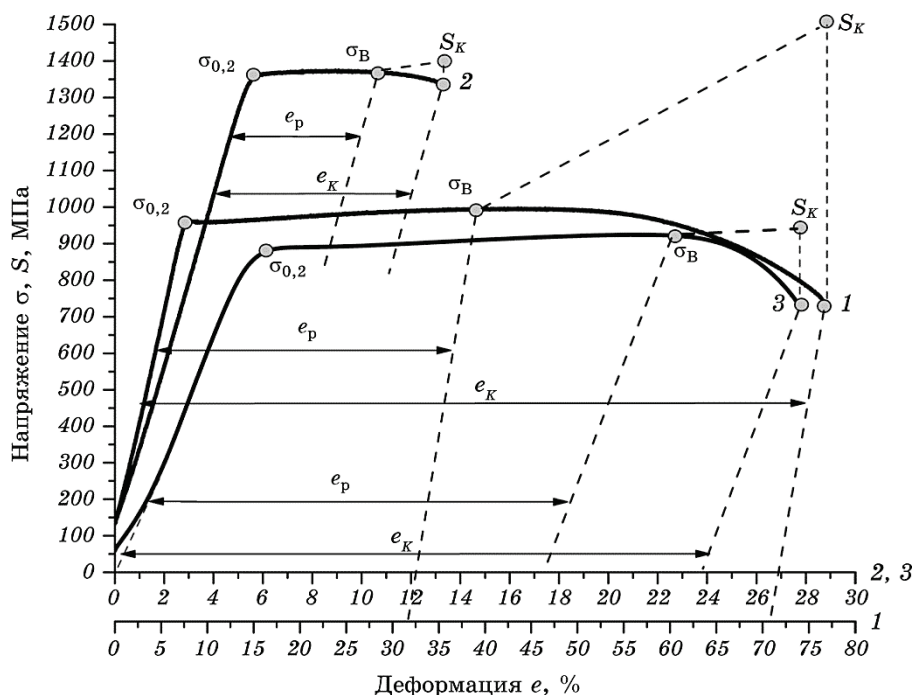


Рис. 1. Диаграммы растяжения титанового сплава ВТ22 при 293 К: 1 — стандартная ТО (ОЖ 750°C, 1 ч, ВО) — сплав «*n*»; специальные ТО: 2 — (СТО 10 К·с⁻¹ 900°C, ВО + 630°C, 8 ч) — сплав «*m*» [2, 9], табл. 1; 3 — СТО 20 К·с⁻¹ 920°C, закалка в воду (ЗВ)) [10].

Fig. 1. The tensile diagrams of the titanium alloy VT22 at 293 K: 1—standard heat treatment (HT) (annealing 750°C, 1 h, air cooling)—alloy ‘*n*’; special HT: 2—(high-speed HT 10 K·s⁻¹ 900°C, air cooling + 630°C, 8 h)—alloy ‘*m*’ [2, 9], Table 1; 3—high-speed HT 20 K·s⁻¹ 920°C, quenching) [10].

Note: $\sigma_{0.2}$ (σ_Y)—yield strength, σ_B (σ_S)—ultimate tensile strength, S_K (S_f)—true fracture stress, e_p (e_u)—true uniform deformation, e_K (e_f)—true fracture deformation.

ТАБЛИЦА 1. Значения исходных базовых характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , R_X и S_K по (6) КТС широкого круга использования по результатам собственных экспериментов авторов [2, 9] и из других литературных источников [12–15] при 293 К.

TABLE 1. The values of the initial basic characteristics of σ_Y , σ_S , ψ_K (ψ_f), R_X (R_b) and S_f according to (6) of the constructional titanium alloys (CTA) of a wide range of uses, based on the results of the author's own experiments [2, 9] and from other literature sources [12–15] at 293 K.

Обозначение	КТС	Обработка	$\sigma_{0,2}$	σ_B	ψ_K	R_X [11]	S_K (6)
			МПа		%		МПа
<i>a</i>	BT1-0 [2, 9]	950°C, 0,5 ч, ВО	313	431	60,2	934	456
<i>b</i>		550°C, 1 ч, ВО	373	472	67,8	1116	605
<i>c</i>		900°C, 0,5 ч, ВО	339	436	73,0	1134	550
<i>d</i>	BT6 [2, 9]	880°C, 1 ч, ВО	1093	1123	35,3	1800	1493
<i>e</i>		+3В 550°C, 5 ч					
		700°C, 1 ч, ВО	1005	1040	26,6	1828	1298
<i>k</i>	BT22 [2, 9]	820°C, 1 ч, ВО	1299	1333	15,8	2155	1529
		+ 600°C, 1 ч					
<i>n</i>		ОЖ 750°C, 1 ч, ВО					
<i>m</i>		СТО 10 К·с ⁻¹ 900°C	1359	1371	12,6	2210	1598
		+ 630°C, 8 ч					
<i>A</i>	BT1-0 [2, 9]	СП 1250°C, 4 ч	493	603	23,7	1032	704
<i>B</i>	Ti-10V-2Fe-3Al [2, 9]	Синтез 1250°C, 4 ч	998	1093	7,0	1380	1165
<i>C</i>	BT6 [2, 9]	Синтез 1250°C, 4 ч	884	963	20,8	1420	1150
<i>1</i>	Ti-7V-3Mo [12]	Состояние поставки	1080	1140	33,0	2129	1430
<i>2</i>	BT16 [13]	1050°C, 1 ч, ВО	870	975	28,0	1829	1165
		+ 700°C, 5 ч					
<i>3</i>	AT2 [14]	Состояние поставки	570	660	62,2	1844	942
<i>4</i>	BT5-1кт. [14]	Состояние поставки	770	835	26,4	1538	1041
<i>5</i>	Ti-7Al-4V [15]	Состояние поставки	990	1110	42,0	2473	1545
<i>6</i>	Ti-6,5Al-3Mo-1V [15]	Состояние поставки	890	1050	55,0	2807	1589
<i>7</i>	Ti-4Al-3Mo-1V [15]	Состояние поставки	700	730	61,5	1697	1149

Примечания: латинские буквы соответствуют обозначениям КТС в [2, 9]; малые — КТС, большие — ПТС; ВО — воздушное охлаждение; ОЖ — отжиг; СТО — скоростная ТО; ЗВ — закалка в воду; СП — спекание.

Таким образом, задачей этой работы является установление и аналитическая оценка системной взаимосвязи механических свойств «пластичность (ψ_K)–прочность ($\sigma_{0,2}$)–деформационная стойкость (B_r)» КТС с использованием критерия $B_r = \text{const}$ в условиях одноосного квазистатического растяжения и формирование оптимального комплекса этих характеристик, т.е. поиск их наилучших

соотношений.

Такой анализ, естественно, будет предполагать как оценку меры исходного механического качества сплава по деформационной стойкости B_r при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, так и меру его остаточного конструкционного качества, сохранённую после охрупчивания металла в результате действия неоднородных силовых полей при критической прочности $\sigma_{0,2C}$ [2], но в этой работе мы пока ограничимся только оценкой исходного механического качества КТС в условиях линейного напряженного состояния (ЛНС).

2. МАТЕРИАЛЫ

В качестве объектов анализа выбирали титановые сплавы, которые относятся к разным классам по прочности, структурному состоянию, качеству, химическому составу и назначению. Для полноты анализа использовали экспериментальные данные, полученные с участием авторов, для КТС, подвергнутых различным видам термической обработки [2, 9], в том числе, полученные с использованием технологий порошковой металлургии (ПТС), а также литературные данные [12–15]. Базовые механические характеристики исследованных КТС представлены в табл. 1.

3. ВЗАИМОСВЯЗЬ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОСТИ, ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Для построения системы согласованной взаимосвязи комплекса механических свойств КТС «пластичность–прочность–деформационная стойкость» рационально использовать подход, аналогичный предложенному в [1, 2, 4] для построения системы взаимосвязи свойств « ψ_K – $\sigma_{0,2}$ – K_{ms} » с разными уровнями сопротивляемости хрупкому разрушению при $K_{ms} = \text{const}$, но, в этом случае, с разными уровнями сопротивляемости охрупчиванию при $B_r = \text{const}$. При этом видовая принадлежность исследуемых конструкционных сплавов останется без изменений.

На рисунке 2 представлена система согласованной взаимосвязи комплекса механических свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость», сформированная в виде обобщенных диаграмм с использованием критерия $B_r = \text{const}$ для КТС 1-го (рис. 2, а, в) и 2-го (рис. 2, б, г) видов поведения механических характеристик.

Построенная по принципу объединения зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при разных фиксированных значениях B_r обобщённая диаграмма на рис. 2 будет отображать резерв изломостойкости КТС, который отвечает за потенциальные возможности конструкционного применения

сплавов в условиях неоднородных напряжённо-деформированных состояний (НДС) за счёт величины B_r в зависимости от их прочности $\sigma_{0,2}$.

Важно заметить, что, как и в случае объединения зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при разных фиксированных значениях K_{ms} , обобщённая диаграмма взаимосвязи комплекса механических свойств КТС «пластичность–прочность–деформационная стойкость» имеет системный характер, а точность её построения достаточна для практического использования.

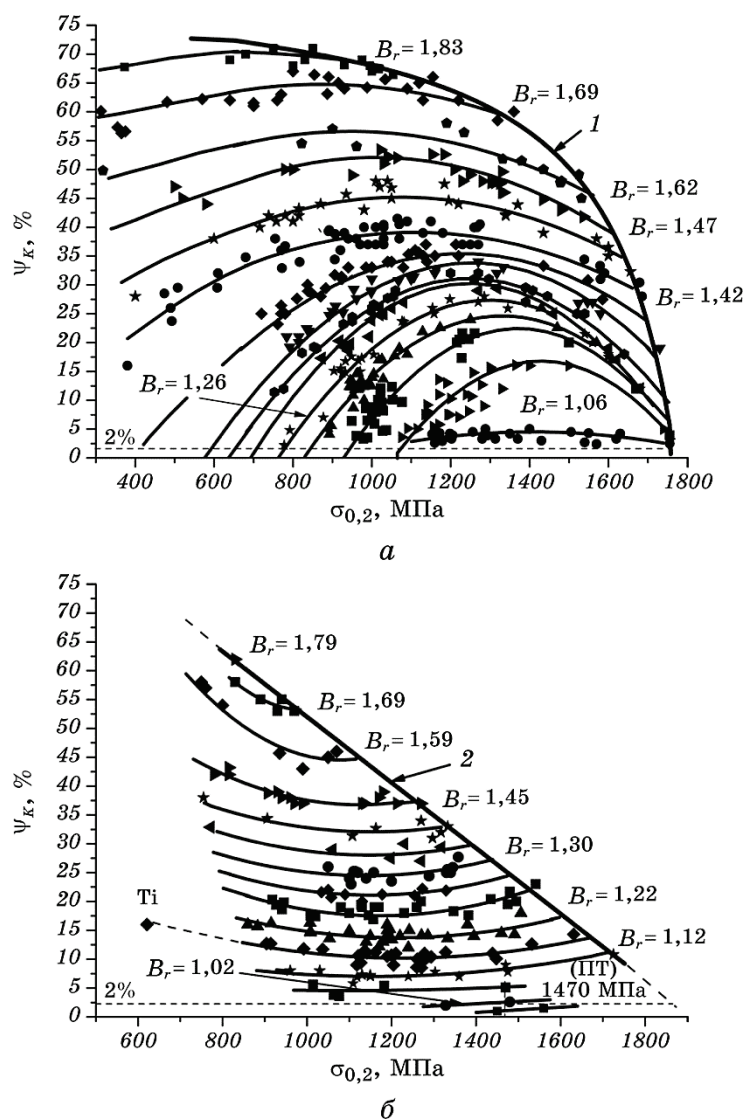


Рис. 2. / Fig. 2. (см. далее / see below).

Продолжение рис. 2 / Continuation of Fig. 2.

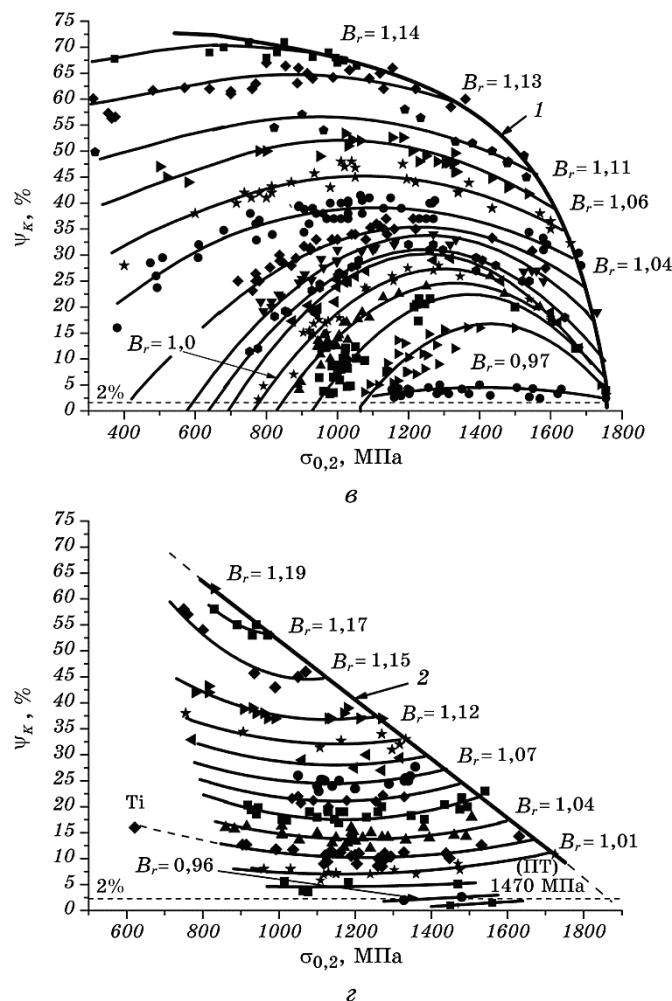


Рис. 2. Обобщенная диаграмма взаимосвязи комплекса механических свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость»: *a* — 1-го вида, *б* — 2-го вида для КТС широкого круга использования, *в* — 1-го вида, *г* — 2-го вида для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъемного крепления (1, 2 — кривые оптимизации, темные знаки — экспериментальные данные КТС, B_r — уровни фиксированных значений деформационной стойкости, ПТ — область перспективных технологий).

Fig. 2. The generalized diagram of the interrelation between mechanical properties of complex 'plasticity–strength–deformation resistance': *a*—the 1-st type, *б*—the 2-nd type for CTA of a wide range of uses, *в*—the 1-st type, *г*—the 2-nd type for CTA intended for the manufacture of parts of detachable fastening (1, 2—optimization curves, dark signs—experimental data of the CTA, B_r —levels of fixed values of deformation resistance, ПТ—area of advanced technologies).

Особую роль в системе взаимосвязи комплекса механических свойств конструкционных сплавов «пластичность–прочность–деформационная стойкость» играют кривые оптимизации: 1 — для сплавов 1-го вида (рис. 2, а, в) и 2 — для сплавов 2-го вида (рис. 2, б, г). Аналогичную роль они играют и в системе взаимосвязи «пластичность–прочность–механическая стабильность» [1, 2, 4], но в первом случае они представляют собой геометрическое место точек, которое ограничивает такой граничный комплекс свойств сплавов, при котором каждому фиксированному значению деформационной стойкости B_r отвечает наибольшее значение прочности $\sigma_{0,2}$. В данном случае смысл кривых оптимизации заключается в том, что они характеризуют оптимальные (наилучшие) соотношения свойств пластичности ψ_K и деформационной стойкости B_r КТС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. При этом величины B_r и ψ_K всегда принимают наибольшие значения для заданной прочности $\sigma_{0,2}$.

Кривые оптимизации 1 и 2 (рис. 2) построены на основе экспериментальных данных исследованной выборки комплекса механических свойств КТС в характерном для этих сплавов диапазоне изменения величины деформационной стойкости (изломостойкости) $0,96 \leq B_r \leq 1,83$ и имеют аналитическое описание.

Зависимость оптимального значения деформационной стойкости B_r от величины прочности $\sigma_{0,2}$ для оптимизированных КТС широкого круга использования 1-го вида поведения механических характеристик (рис. 2, а) может быть описана степенной функцией:

$$B_r^{\text{опт}} = \frac{1}{C} \left[\left(\frac{B}{A - \sigma_{0,2}} \right)^D - 1 \right], \quad (8)$$

где $A = 1788,211 \pm 6,069$ МПа, $B = 4,0 \cdot 10^{-5} \pm 3,5 \cdot 10^{-6}$ МПа, $C = 1,922 \pm 0,320$, $D = -0,089 \pm 0,033$ — эмпирические коэффициенты, а для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (рис. 2, в) степенной функцией:

$$B_r^{\text{опт}} = A - \frac{B}{(1 + C\sigma_{0,2})^{1/D}}, \quad (9)$$

где $A = 1,144 \pm 0,011$, $B = 7,79 \cdot 10^{-6} \pm 0,13 \cdot 10^{-6}$, $C = 5,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,21 \cdot 10^{-6}$ МПа⁻¹, $D = -0,009 \pm 0,003$ — эмпирические коэффициенты.

Для КТС широкого круга использования 2-го вида поведения механических характеристик зависимость $B_r^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ (рис. 2, б) может быть описана линейной функцией:

$$B_r^{\text{опт}} = A - B\sigma_{0,2}, \quad (10)$$

где $A = 2,394 \pm 0,136$, $B = 7,3 \cdot 10^{-4} \pm 0,3 \cdot 10^{-5}$ МПа⁻¹ — эмпирические

коэффициенты, а для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (рис. 2, з) степенной функцией вида:

$$B_r^{\text{опт}} = A - \frac{B}{(1 + C\sigma_{0,2})^D}, \quad (11)$$

где $A = 1,236 \pm 0,061$, $B = 6,9 \cdot 10^{-4} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$, $C = 6,81 \cdot 10^{-3} \pm 7,37 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$, $D = -2,281 \pm 0,257$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важно проанализировать принципы изменения оптимальных значений деформационной стойкости (изломостойкости) $B_r^{\text{опт}}$ в сравнении изменением показателя оптимальной механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$, а также наилучших значений истинного напряжения разрушения $S_K^{\text{опт}}$ с изменением прочности $\sigma_{0,2}$ КТС в условиях ЛНС (рис. 3).

При этом величина $S_K^{\text{опт}}$ определяется согласно зависимости, следующей из (5):

$$S_K^{\text{опт}} = \sigma_{0,2} B_r^{\text{опт}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{0,2}$ — прочность, соответствующая уровню $B_r^{\text{опт}}$ на кривых оптимизации, величина $B_r^{\text{опт}}$ определяется согласно зависимостям (8) для КТС широкого круга использования и (9) для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, 1-го вида, а для КТС 2-го вида — согласно зависимостям (10) и (11) для 1-го и 2-го видов соответственно.

Из рисунка 3 видно, что уровень показателя $B_r^{\text{опт}}$ находится ниже уровня $K_{ms}^{\text{опт}}$ во всём реальном для КТС интервале изменения прочности $\sigma_{0,2}$ независимо от их видовой принадлежности — этот факт является той отличительной особенностью титановых сплавов (в частности, от конструкционных сталей (КС) [16]), которая обеспечивает резерв по переходу в хрупкое состояние, превышающий резерв по охрупчиванию (изломостойкости), для КТС различных классов прочности.

Такая особенность связана с принципиально различным температурным поведением характеристики S_K (и, соответственно, $S_K^{\text{опт}}$) — у КТС $S_K < R_X$ независимо от уровня их прочности $\sigma_{0,2}$, а у КС средней прочности и высокопрочных $S_K > R_X$ (исключение составляют стали низкой прочности с $\sigma_{0,2} \leq 300 \text{ МПа}$ при температурах, близких к комнатной ТК [1, 9, 16]).

Зависимости $B_r^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ и $K_{ms}^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ (кривые 1 и 2, 2' на рис. 3 соответственно) имеют закономерный монотонно убывающий характер с повышением прочности $\sigma_{0,2}$ для оптимизированных КТС обоих видов.

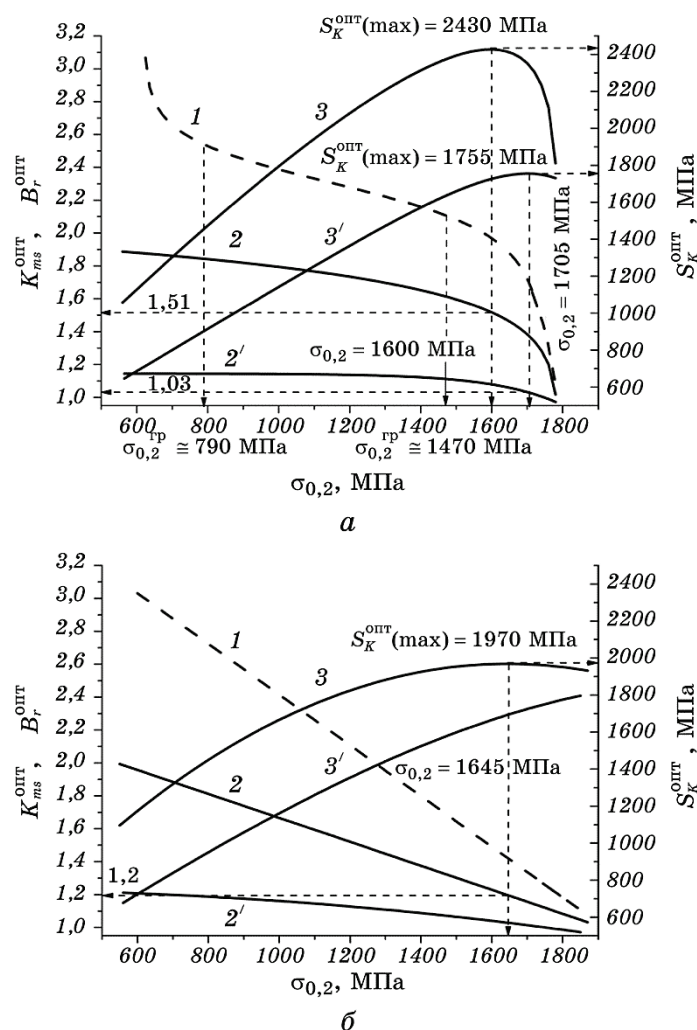


Рис. 3. Зависимости от прочности $\sigma_{0,2}$ оптимальных значений КТС: *a* — сплавы вида 1, *б* — сплавы вида 2 (1 — механической стабильности K_{ms}^{opt} (штриховая линия), 2 — изломостойкости B_r^{opt} и 3 — истинного напряжения разрушения S_K^{opt} для сплавов широкого круга использования, 2' — изломостойкости B_r^{opt} и 3' — истинного напряжения разрушения S_K^{opt} для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, $\sigma_{0,2}^{gp}$ — граничная прочность).

Fig. 3. Dependence of the optimum values of the CTA on the strength σ_Y : *a* — alloys of the type 1, *б* — alloys of the type 2 (1 — mechanical stability K_{ms}^{opt} (dashed line), 2 — break resistance B_r^{opt} , and 3 — true fracture stress S_K^{opt} (S_f^{opt}) for alloys of a wide range of uses, 2' — break resistance B_r^{opt} and 3' — true fracture stress S_f^{opt} for alloys intended for the manufacture of parts for detachable fastening, $\sigma_{0,2}^{gp}$ (σ_Y^b) — boundary strength).

Но сила этой тенденции разная: для КТС 1-го вида низкой прочности в интервале $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{\text{гр}} \approx 790$ МПа и высокопрочных сплавов в интервале $\sigma_{0,2} \geq \sigma_{0,2}^{\text{гр}} \approx 1470$ МПа имеет место повышенная скорость убывания ($dK_{ms}^{\text{опт}}/d\sigma_{0,2}$) зависимости $K_{ms}^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ (кривая 1 на рис. 3), тогда как увеличение скорости убывания ($dB_r^{\text{опт}}/d\sigma_{0,2}$) зависимости $B_r^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ наблюдается только для высокопрочных КТС независимо от способа их использования (кривые 2, 2' на рис. 3, а); для КТС 1-го вида широкого круга использования в интервале $790 < \sigma_{0,2} < 1470$ МПа имеет место примерно равномерное снижение резервов по K_{ms} и по B_r при повышении $\sigma_{0,2}$. Замедленное снижение резерва по изломостойкости B_r наблюдается только для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (кривая 2' на рис. 3); для КТС 2-го вида имеют место равномерные скорости убывания $dK_{ms}^{\text{опт}}/d\sigma_{0,2}$ и $dB_r^{\text{опт}}/d\sigma_{0,2}$ независимо от классов прочности этих сплавов. При этом наблюдается повышенное равномерное снижение резерва по K_{ms} , умеренное по B_r для КТС широкого круга использования и замедленное по B_r для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (кривые 1, 2 и 2' на рис. 3, б соответственно).

Анализируя тенденции изменения зависимости $S_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ для оптимизированных КТС независимо от способа их использования (кривые 3, 3' на рис. 3), необходимо отметить следующее: для КТС 1-го вида зависимости $S_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ монотонно возрастают с повышением прочности $f(\sigma_{0,2})$ (кривые 3 и 3' на рис. 3, а) для наилучших сплавов низкой и средней прочности, однако после достижения максимумов $S_K^{\text{опт}}(\text{max}) = 2430$ МПа при $\sigma_{0,2} \approx 1600$ МПа для КТС широкого круга использования и $S_K^{\text{опт}}(\text{max}) = 1755$ МПа при $\sigma_{0,2} \approx 1705$ МПа для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, дальнейшее повышение прочности $\sigma_{0,2}$ оптимизированных высокопрочных КТС приводит к падению величины $S_K^{\text{опт}}$ за счёт критического снижения показателя изломостойкости в первом случае $B_r^{\text{опт}} < 1,51$, а во втором — $B_r^{\text{опт}} < 1,03$ (рис. 3, а). Этот факт свидетельствует о высокой вероятности потери конструкционной пригодности ($P_{me} = B_r/B_{rb}$, где B_{rb} — критическое значение изломостойкости [6]) наилучшими высокопрочными КТС широкого круга 1-го вида с прочностью $\sigma_{0,2} > 1600$ МПа, а также сплавами того же вида, предназначенными для изготовления деталей разъёмного крепления, с прочностью $\sigma_{0,2} > 1705$ МПа и требует особого контроля выполнения критерия силовой надёжности изделия с концентраторами напряжений (кН) по [6]; для наилучших КТС широкого круга использования 2-го вида зависимость $S_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ монотонно возрастает с повышением прочности $\sigma_{0,2}$ до момента достижения максимума при $S_K^{\text{опт}}(\text{max}) = 1970$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 1645$ МПа и $B_r^{\text{опт}} = 1,20$ (кривая 3 на рис. 3, б), а для наилучших КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепле-

ния, того же вида зависимость $S_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ монотонно возрастает с повышением прочности $\sigma_{0,2}$ во всём реальном диапазоне её изменения без проявления экстремума (кривая 3' на рис. 3, б). Это свидетельствует о вероятности потери P_{me} оптимизированными высокопрочными КТС широкого круга использования 2-го вида с прочностью $\sigma_{0,2} > 1970$ МПа. Незначительное падение показателя $S_K^{\text{опт}}$ у КТС широкого круга использования и отсутствие падения величины $S_K^{\text{опт}}$ для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, связано с некоторым повышением пластических свойств (ψ_K), характерным для КТС 2-го вида поведения механических характеристик (рис. 2, б, в), так как $S_K = f(\psi_K)$ по (6) и (7) соответственно.

Свойство пластичности (ψ_K) играет важную роль в формировании показателей K_{ms} [1] и B_r [6], поэтому важно проанализировать поведение закономерностей $B_r^{\text{опт}} = f(\psi_K^{\text{опт}})$ для КТС, которые легко получить путём объединения по показателю $\sigma_{0,2}$ известных зависимостей [1, 2, 9]:

для КТС 1-го вида поведения механических характеристик:

$$\psi_K^{\text{опт}} = (a - b\sigma_{0,2}) / (1 - c\sigma_{0,2}), \quad (13)$$

где $a = 75,745 \pm 0,920$, $b = 0,043 \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹, $c = 5,1 \cdot 10^{-4} \pm 1,2 \cdot 10^{-5}$ МПа⁻¹ — эмпирические коэффициенты;

для КТС 2-го вида поведения механических характеристик:

$$\psi_K^{\text{опт}} = a - b\sigma_{0,2}, \quad (14)$$

где $a = 108,887 \pm 4,522$, $b = 0,057 \pm 0,002$ МПа⁻¹ — эмпирические коэффициенты с соответствующими по видовой принадлежности зависимостями (8) для сплавов широкого круга использования 1-го вида и (10) для аналогичных сплавов 2-го вида (кривые 1 и 2 на рис. 4, а соответственно). Для КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, закономерности $B_r^{\text{опт}} = f(\psi_K^{\text{опт}})$ были получены так же путём объединения по $\sigma_{0,2}$ зависимостей (13), (9) и (14), (11) — кривые 1' и 2' на рис. 4, а соответственно для каждого вида.

Из рисунка 4, а видно, что наилучшие КТС для широкого круга использования 1-го вида (кривая 1) имеют повышенные показатели $\psi_K^{\text{опт}}$ при заданном значении оптимальной изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ в сравнении со сплавами 2-го вида (кривая 2), начиная с граничных значений $\psi_K^{\text{опт}} > 43\%$ и $B_r^{\text{опт}} > 1,56$ при $\sigma_{0,2} \approx 1550$ МПа для КТС 1-го вида и $\sigma_{0,2} \approx 1155$ МПа для КТС 2-го вида. При $\psi_K^{\text{опт}} \leq 43\%$ и $B_r^{\text{опт}} \leq 1,56$ наблюдается противоположная ситуация — более высокие показатели $\psi_K^{\text{опт}}$ при заданном значении $B_r^{\text{опт}}$ будут иметь КТС 2-го вида, что аналогично поведению зависимостей $\psi_K^{\text{опт}} = f(K_{ms}^{\text{опт}})$ для

обоих видов этих сплавов [1, 9] и поведению тех же зависимостей для КС, но с другими граничными показателями свойств [16].

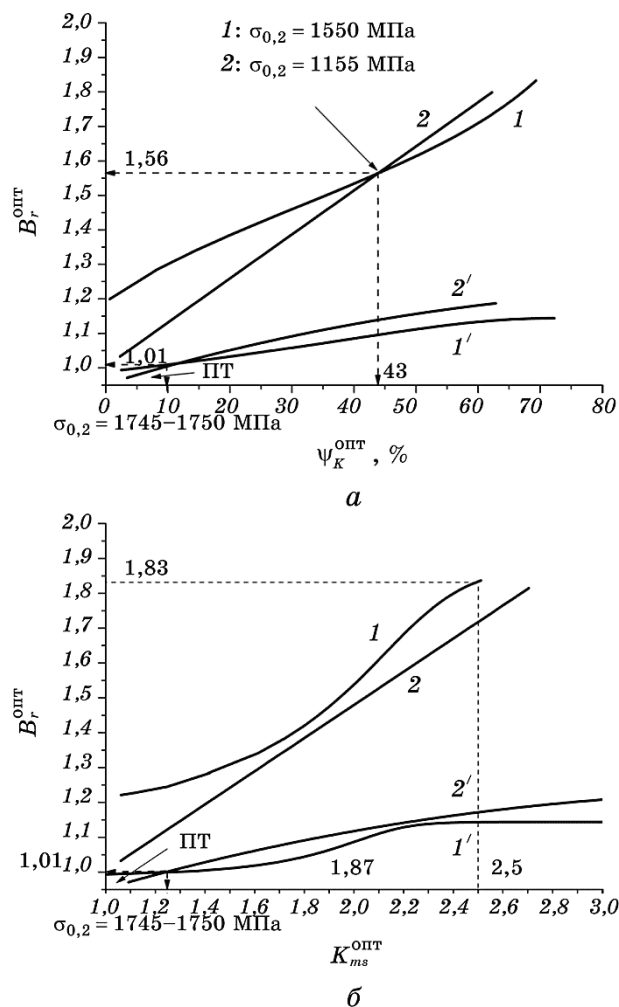


Рис. 4. Закономерности изменения оптимальных свойств КТС: *а* — изломостойкости B_r^{opt} от пластичности ψ_K^{opt} , *б* — изломостойкости B_r^{opt} от механической стабильности K_{ms}^{opt} (сплавы для широкого круга использования: 1 — 1-го вида, 2 — 2-го вида; сплавы для изготовления деталей разъёмного крепления: 1' — 1-го вида, 2' — 2-го вида).

Fig. 4. The patterns of change of the optimum properties of the CTA: *a*—break resistance B_r^{opt} from plasticity ψ_K^{opt} (ψ_f^{opt}), *б*—break resistance B_r^{opt} from mechanical stability K_{ms}^{opt} (alloys for a wide range of uses: 1—1-st type, 2—2-nd type; alloys for the manufacture of parts detachable mount: 1'—1-st type; 2'—2-nd type).

Для наилучших КТС, предназначенных для изготовления деталей разъемного крепления, наблюдается аналогичное поведение зависимостей $B_r^{\text{опт}} = f(\psi_K^{\text{опт}})$: повышенные показатели $\psi_K^{\text{опт}}$ при заданном значении оптимальной изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ имеют сплавы 1-го вида (кривая 1' в сравнении с кривой 2' на рис. 4) вплоть до достижения показателями свойств граничных значений ПТ $\psi_K^{\text{опт}} \approx 10\%$ и $B_r^{\text{опт}} \approx 1,01$ при $\sigma_{0,2} \approx 1745-1750$ МПа. При дальнейшем повышении прочности $\sigma_{0,2} \geq 1745-1750$ МПа при использовании новых (перспективных) технологий прогнозируется изменение поведения указанных зависимостей — повышение пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$ при заданной изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ для КТС 2-го вида при $\psi_K^{\text{опт}} \leq 10\%$ и $B_r^{\text{опт}} \leq 1,01$.

Информация об областях с разным поведением закономерности $B_r^{\text{опт}} = f(\psi_K^{\text{опт}})$ для разных видов поведения механических характеристик КТС, а также о граничных значениях характеристик $\psi_K^{\text{опт}}$ и $B_r^{\text{опт}}$, которые разделяют эти области, имеет значение при оценке механического качества этих сплавов по характеристикам K_{ms} и B_r .

При исследовании резервов прочности для защиты металла от охрупчивания с использованием показателя B_r в концепции конструкционной пригодности [6] и от хрупкого разрушения с использованием показателя K_{ms} в концепции механической стабильности [1] важно найти взаимосвязь между этими механическими характеристиками и изучить особенности такой связи.

Поэтому целесообразно проанализировать поведение закономерностей $B_r^{\text{опт}} = f(K_{ms}^{\text{опт}})$, которые легко получить из системы зависимостей (3) и (8) для КТС 1-го вида широкого круга использования (кривая 1 на рис. 4, б):

$$B_r^{\text{опт}} = [(B / (A - \sigma_{0,2}))^D - 1] / C, \quad (15)$$

где из (3) находим

$$\sigma_{0,2} = \frac{e[1 + \exp(a - K_{ms}^{\text{опт}})/b]^{1/m} - c}{k[1 + \exp(a - K_{ms}^{\text{опт}})/b]^{1/m} - d},$$

эмпирические коэффициенты A, B, C, D определены в (8); a, b, c, d, e, k, m — в (3); а для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъемного крепления (кривая 1' на рис. 4, б), из системы зависимостей (3) и (9):

$$B_r^{\text{опт}} = A - B / (1 + C\sigma_{0,2})^{1/D}, \quad (16)$$

где $\sigma_{0,2}$ найдено выше, а эмпирические коэффициенты A, B, C, D определены в (9); a, b, c, d, e, k, m — в (3). Для КТС 2-го вида широкого круга использования (кривая 2 на рис. 4, б) из системы зави-

симостей (4) и (10) получаем:

$$B_r^{\text{опт}} = A - B(a - K_{ms}^{\text{опт}})/b, \quad (17)$$

где эмпирические коэффициенты A, B определены в (10); a, b — в (4), а для сплавов, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (кривая 2' на рис. 4, б), из системы зависимостей (4) и (11) находим:

$$B_r^{\text{опт}} = A - B / [1 + C(a - K_{ms}^{\text{опт}})/b]^D, \quad (18)$$

где коэффициенты A, B, C, D определены в (11); a, b — в (4).

Из рисунка 4, б видно, что КТС для широкого круга использования 1-го вида имеют повышенные показатели оптимальной изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ при заданном значении оптимальной механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$ в сравнении с КТС 2-го вида практически во всём реальном для титановых сплавов интервале изменения этих характеристик вплоть до $K_{ms}^{\text{опт}} = 2,5$ и $B_r^{\text{опт}} = 1,83$ (кривые 1, 2 на рис. 4, б).

У КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления, имеет место аналогичная ситуация, которая может измениться на противоположную только в области ПТ при $K_{ms}^{\text{опт}} \leq 1,25$, $B_r^{\text{опт}} \leq 1,01$ и $\sigma_{0,2} \approx 1745\text{--}1750$ МПа (кривые 1', 2' на рис. 4, б). Информация о закономерности изменения $B_r^{\text{опт}} = f(K_{ms}^{\text{опт}})$ или эквивалентной ей зависимости $B_r = f(K_{ms})$ для разных видов поведения механических характеристик КТС имеет значение при установлении взаимосвязи между механическим качеством этих сплавов по показателям K_{ms} и B_r при заданной прочности.

Таким образом, анализ зависимостей $B_r^{\text{опт}} = f(K_{ms}^{\text{опт}})$ на рис. 4, б позволяет сделать заключение о более высокой вероятности повышенных значений показателя конструкционной пригодности P_{me} для КТС 1-го вида любого класса прочности (по сравнению с КС 1-го вида, для которых повышенные значения P_{me} характерны только для высокопрочных сталей с $\sigma_{0,2} \geq 1065$ МПа [16]).

Зависимости $\psi_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$, $K_{ms}^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ и $R_X^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ [9], дополненные зависимостями $B_r^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ и $S_K^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ (рис. 3), представлены на рис. 5 с целью определения опорных значений оптимальных свойств для обоих видов КТС разных классов прочности и различного назначения.

С учётом ранее указанных в работах [1, 9] интервалов изменения прочности $\sigma_{0,2}$, для которых характерно соотношение оптимальных (наиболее высоких) значений характеристик пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$ и механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$, а также зависимостей (3), (8), (9), (12), (13) и (4), (10), (11), (12), (14), как и зависимости $R_X^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$, полученной в [9], для оптимизированных КТС разных классов прочности 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик, на рис. 5 можно выделить интервалы с наилучшими

соотношениями показателей $\psi_K^{\text{опт}}$, $R_X^{\text{опт}}$, $K_{ms}^{\text{опт}}$, $B_r^{\text{опт}}$ и $S_K^{\text{опт}}$ в системах взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–механическая стабильность» [1, 9] и «пластичность–прочность–деформационная стойкость», которые представлены в табл. 2.

Анализируя зависимости на рис. 5 и данные табл. 2, важно отметить: существенное снижение показателей пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$, ψ_K у КТС 2-го вида средней и высокой прочности в сравнении с аналогичными по прочности $\sigma_{0,2}$ сплавами 1-го вида при примерно одинаковых уровнях механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$, K_{ms} ; повышенная деформационная стойкость (изломостойкость) $B_r^{\text{опт}}$ наилучших КТС для широкого круга использования 1-го вида средней и высокой прочности делает их предпочтительными для использования в изделиях и элементах конструкций (ЭК), находящихся в условиях неоднородных НДС, по причине повышенной вероятности их конструкционной пригодности P_{me} ; повышенные значения характеристики хрупкой прочности $R_X^{\text{опт}}$ у наилучших КТС 1-го вида по сравнению со сплавами 2-го вида всех классов прочности (у КС – наоборот [16]). Более высокие уровни $R_X^{\text{опт}}$, чем уровни $S_K^{\text{опт}}$ для КТС всех классов прочности обоих видов (у КС – наоборот, за исключением сталей низкой прочности с $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа [16]), что обуславливает повышенные резервы прочности по предотвращению хрупкого разрушения по K_{ms} сравнительно с резервами прочности по предотвращению охрупчивания по B_r ; повышенная деформационная стойкость (изломостойкость) $B_r^{\text{опт}}$ наилучших высокопрочных КТС, предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления 1-го вида, делает их предпочтительными для использования в изделиях (ЭК), особенно при прочностях $\sigma_{0,2} \geq 1400$ МПа, вследствие более высокой вероятности их конструкционной пригодности P_{me} .

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $B_r = \text{const}$ (рис. 2), которые на разных уровнях деформационной стойкости (изломостойкости) формируют изолинии для построения обобщенных диаграмм систем взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость» для КС и КТС, как показано в [16] и настоящей работе, инвариантны относительно разных соотношений свойств прочности, пластичности и изломостойкости сплавов, режимам их ТО и/или ТМО, а также температуры испытаний.

При этом важно помнить, что далеко не всегда повышение прочности $\sigma_{0,2}$ конструкционного сплава приводит к потере свойства пластичности или увеличивает его склонность к хрупкости или охрупчиванию. Современный спектр технологических возможностей в металлургии настолько богат, что практически всегда существует возможность реализовать повышение пластических свойств, а также сопротивляемости хрупкости и охрупчиванию для качественного высокопрочного сплава.

Однако примечательно то обстоятельство, что высокие резервы прочности по предотвращению хрупкого разрушения по K_{ms} и по

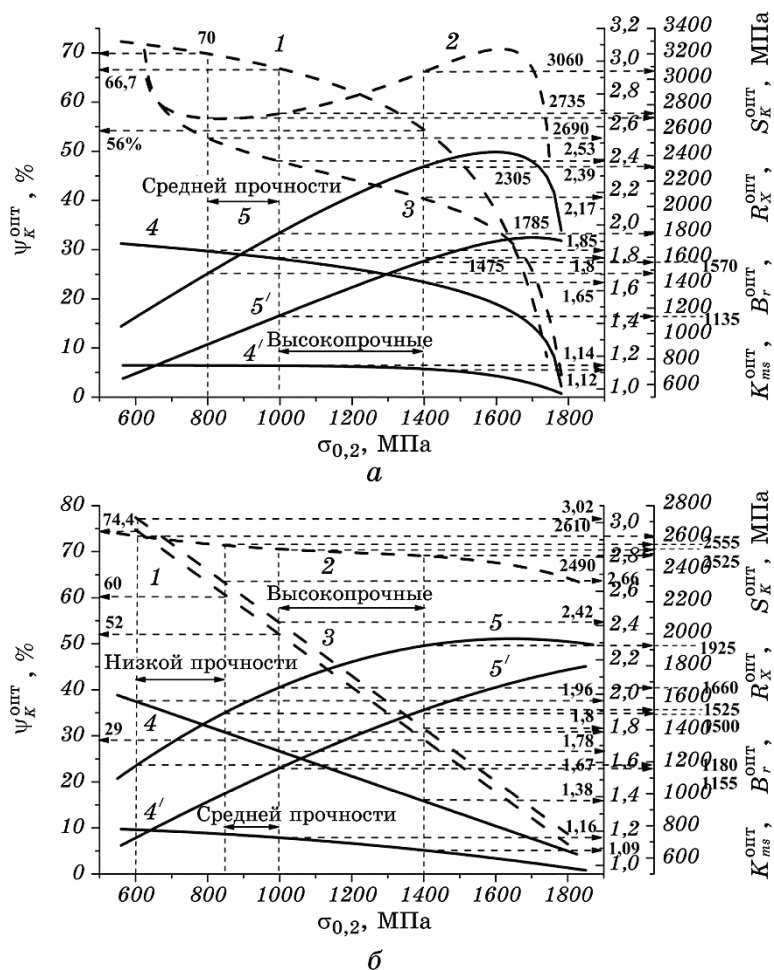


Рис. 5. Зависимости от прочности $\sigma_{0,2}$ оптимальных значений КТС: 1 — пластичности ψ_K^{opt} ; 2 — хрупкой прочности R_x^{opt} ; 3 — механической стабильности K_{ms}^{opt} (штриховые линии) [1, 9]; 4, 4' — изломостойкости B_r^{opt} ; 5, 5' — истинного напряжения разрушения S_K^{opt} соответственно для сплавов широкого круга использования и предназначенных для изготовления деталей разъёмного крепления (рис. 3); а — сплавы 1-го вида, б — сплавы 2-го вида.

Fig. 5. Dependences of optimum values of the CTA on the strength σ_Y : 1 — plasticity ψ_f^{opt} ; 2 — brittle strength R_x^{opt} (R_b^{opt}); 3 — mechanical stability K_{ms}^{opt} (dashed line) [1, 9]; 4, 4' — break resistance B_r^{opt} ; 5, 5' — true fracture stress S_f^{opt} for alloys of a wide range of uses and intended for the manufacture of parts of detachable fastening respectively (Fig. 3); а — alloys of the type 1, б — alloys of the type 2.

ТАБЛИЦА 2. Интервалы изменения прочности $\sigma_{0,2}$ и оптимальных значений механических свойств $\psi_K^{\text{опт}}$, $R_X^{\text{опт}}$, $K_{ms}^{\text{опт}}$, $B_r^{\text{опт}}$ и $S_K^{\text{опт}}$ для наилучших КТС разных классов прочности и различного назначения в соответствии с рис. 5.

TABLE 2. Intervals of strength σ_Y change and optimal values of mechanical properties ψ_f^{opt} , R_b^{opt} , K_{ms}^{opt} , B_r^{opt} and S_f^{opt} for the best CTA of different strength classes and for different purposes in accordance with Fig. 5.

Вид	Свойства	ФЗ и источники	Классы прочности КТС (интервалы изменения свойств)		
			Низкой прочности	Средней прочности	Высокопрочные
1	$\sigma_{0,2}$, МПа	—	—	800–1000	1000–1400
	$\psi_K^{\text{опт}}$, %	(13)	—	70–66,7	66,7–54,2
	$R_X^{\text{опт}}$, МПа	[9]	—	2690–2735	2735–3060
	$K_{ms}^{\text{опт}}$	(3)	—	2,53–2,39	2,39–2,17
	$B_r^{\text{опт}}$	(8)	—	1,85–1,80	1,80–1,65
	$B_r^{\text{опт}}$	(9)	—	—	1,14–1,12
	$S_K^{\text{опт}}$, МПа	(12)	—	1475–1785	1785–2305
	$S_K^{\text{опт}}$, МПа	(12)	—	—	1135–1570
2	$\sigma_{0,2}$, МПа	—	600–850	850–1000	1000–1400
	$\psi_K^{\text{опт}}$, %	(14)	74,4–60,0	60,0–52,0	52,0–29,0
	$R_X^{\text{опт}}$, МПа	[9]	2610–2555	2555–2525	2525–2490
	$K_{ms}^{\text{опт}}$	(4)	3,02–2,66	2,66–2,42	2,42–1,80
	$B_r^{\text{опт}}$	(10)	1,96–1,78	1,78–1,67	1,67–1,38
	$B_r^{\text{опт}}$	(11)	—	—	1,16–1,09
	$S_K^{\text{опт}}$, МПа	(12)	1180–1500	1500–1660	1660–1925
	$S_K^{\text{опт}}$, МПа	(12)	—	—	1155–1525

Примечания: ФЗ — формулы зависимостей показателей свойств от прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 5), + — сплавы для широкого круга использования; ++ — сплавы, предназначенные для изготовления деталей разъёмных креплений; * — показатели $R_X^{\text{опт}}$ по [9] и $S_K^{\text{опт}}$ по (12) определяются с учётом видовой принадлежности КТС через оптимальные характеристики $K_{ms}^{\text{опт}}$ и $B_r^{\text{опт}}$ соответственно.

предотвращению охрупчивания по B_r не обязательно сопровождается повышенным значением пластичности ψ_K потому, что эти три характеристики по-разному защищают сплав от хрупкости и охрупчивания — K_{ms} и B_r в общем случае НДС, а ψ_K только в условиях ЛНС. Отсюда следует, что введение в практику оценки конструкционных возможностей металлических сплавов новой характеристики — деформационной стойкости (изломостойкости) B_r , наряду с характеристикой механической стабильности K_{ms} , не исключает, а в значительной мере дополняет информативность параметра пластичности сплава ψ_K в решении задачи обеспечения высокой силовой надежности (конструкционной пригодности) металлических ЭК.

5. ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ИЗЛОМОСТОЙКОСТИ B_R ПРИ ЗАДАННОМ ЗНАЧЕНИИ ПРОЧНОСТИ $\sigma_{0,2}$

Соотношения характеристик $\psi_K^{\text{опт}}$ и $B_r^{\text{опт}}$ на кривых оптимизации (рис. 2) для заданного значения исходной прочности $\sigma_{0,2}$ будет характеризовать наивысшее механическое качество сплава по показателю B_r в условиях ЛНС при комнатной температуре T_K . Метод оценки механического качества КТС по показателю изломостойкости B_r при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ разработан на основе принципов рационального формирования свойств в системе их взаимосвязи «пластичность–прочность–деформационная стойкость» и аналогичен методу в системе взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–механическая стабильность», разработанному в [1, 5] (рис. 6).

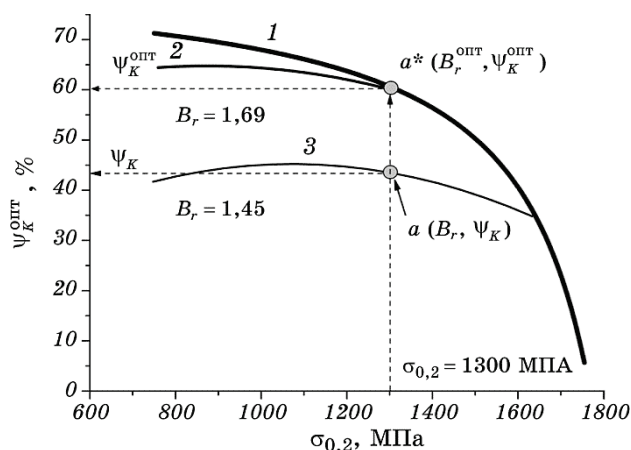


Рис. 6. Регулирующие зависимости основных характеристик механических свойств для условного КТС 1-го вида при $\sigma_{0,2} = 1300$ МПа [5]: 1 — оптимальной пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$ от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации), 2 — пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии $B_r = 1,69$ для оптимального сплава, 3 — та же зависимость при условии $B_r = 1,45$ для искомого сплава, точка « a^* » с координатами $(B_r^{\text{опт}}, \psi_K^{\text{опт}})$ для оптимального сплава на кривой оптимизации, точка « a » с координатами (B_r, ψ_K) для искомого сплава.

Fig. 6. Regulating dependences of the main characteristics of mechanical properties for the conditional CTA of the 1-st type at $\sigma_Y = 1300$ MPa [5]: 1—optimal plasticity ψ_f^{opt} from strength σ_Y (optimization curve), 2—plasticity ψ_f from strength σ_Y under the condition $B_r = 1.69$ for the optimal alloy, 3—the same under the condition $B_r = 1.45$ for the desired alloy; the point ‘ a^* ’ with the coordinates $(B_r^{\text{opt}}, \psi_f^{\text{opt}})$ for the optimal alloy on the optimization curve, the point ‘ a ’ with the coordinates (B_r, ψ_f) for the desired alloy.

На рисунке 6 в системе взаимосвязи комплекса механических свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость» для условной КС 1-го вида, точкой «а*» обозначено оптимальное (наилучшее) соотношение свойств изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ и пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$ на кривой оптимизации 1, а точкой «а» — соотношение этих свойств (B_r , ψ_K) у искомого сплава при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$.

При этом для оценки категории исходного механического качества конструкционных сплавов по показателю деформационной стойкости (изломостойкости) B_r в условиях ЛНС предлагается количественный параметр: $\mu_{B_r}^{\sigma}$ — мера исходного механического качества по изломостойкости B_r , отнесённая к её оптимальной величине $B_r^{\text{опт}}$ при заданной прочности $\sigma_{0,2}$:

$$\mu_{B_r}^{\sigma} = B_r / B_r^{\text{опт}}, \quad (19)$$

где $B_r^{\text{опт}}$ — оптимальное значение характеристики деформационной стойкости, которое определяется для КТС согласно (8)–(11) в зависимости от видовой принадлежности и предназначения.

Мера исходного механического качества $\mu_{B_r}^{\sigma}$ отображает в количественном измерении степень приближенности показателя изломостойкости B_r искомого сплава к оптимальной (наилучшей) величине деформационной стойкости $B_r^{\text{опт}}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$, т.е. есть мерой качества по признаку способности искомого сплава сопротивляться охрупчиванию.

Методы количественной оценки механического качества $\mu_{B_r}^{\sigma}$ по изломостойкости B_r и $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ по (2) наиболее удобны для практического использования, вследствие того, что характеристика $\sigma_{0,2}$ всегда принимает участие в инженерных расчётах и технологических прогнозах — она легко определяется экспериментально по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение стандартных образцов, включается в технические условия на поставку металлических конструкционных материалов, паспорта приёмных испытаний и является наиболее привычной и доступной из любых справочных источников.

Полученные с использованием расчётных методик [1, 2, 9] данные исходных механических свойств КТС широкого круга использования, их оптимальных значений, а также показателей механического качества $\mu_{B_r}^{\sigma}$ по B_r и $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$ по K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ с учётом видовой принадлежности сплавов представлены в табл. 3.

Анализ данных из табл. 3 позволят установить закономерности изменения показателей исходного механического качества $\mu_{B_r}^{\sigma} = f(\mu_{K_{ms}}^{\sigma})$ для каждого вида поведения механических характеристик КТС широкого круга использования с разным структурным состоя-

ТАБЛИЦА 3. Расчётные данные механической стабильности K_{ms} , изломостойкости B_r , их оптимальных значений K_{ms}^{opt} , B_r^{opt} и показателей качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$, $\mu_{B_r}^\sigma$ при исходной прочности $\sigma_{0,2}$ КТС широкого круга использования [1, 2, 9].

TABLE 3. Calculated data of mechanical stability K_{ms} , break resistance B_r , their optimum values K_{ms}^{opt} , B_r^{opt} and quality indices $\mu_{K_{ms}}^\sigma$, $\mu_{B_r}^\sigma$ at the initial strength σ_Y of CTA of a wide range of uses [1, 2, 9].

Обозначение	КТС	Вид	$\sigma_{0,2}$ МПа	K_{ms}	K_{ms}^{opt}	$\mu_{K_{ms}}^\sigma$	B_r	B_r^{opt}	$\mu_{B_r}^\sigma$
<i>a</i>	BT1-0	1	315	2,26	3,44	0,657	1,46	1,95	0,750
<i>b</i>		2	373	2,38	3,35	0,710	1,62	2,12	0,764
<i>c</i>		1	339	2,63	3,40	0,774	1,62	1,94	0,834
<i>d</i>	BT6	1	1093	1,57	2,34	0,672	1,37	1,79	0,767
<i>e</i>		2	1005	1,72	2,38	0,721	1,29	1,66	0,777
<i>k</i>	BT22	2	1299	1,58	1,93	0,817	1,18	1,45	0,816
<i>n</i>		1	961	2,01	2,41	0,834	1,56	1,82	0,856
<i>m</i>		2	1359	1,58	1,84	0,857	1,18	1,40	0,842
<i>A</i>	BT1-0	1	493	1,74	2,67	0,652	1,43	1,92	0,745
<i>B</i>	Ti-10V-2Fe-3Al	2	998	1,25	2,40	0,522	1,17	1,67	0,703
<i>C</i>	BT6	1	884	1,45	2,46	0,589	1,30	1,84	0,706
<i>1</i>	Ti-7V-3Mo	2	1080	1,82	2,27	0,802	1,32	1,61	0,822
<i>2</i>	BT16	2	870	1,85	2,59	0,714	1,34	1,76	0,762
<i>3</i>	AT2	1	570	2,75	3,20	0,859	1,65	1,91	0,866
<i>4</i>	BT5-1кт.	2	770	1,81	2,74	0,660	1,35	1,83	0,737
<i>5</i>	Ti-7Al-4V	1	990	2,19	2,39	0,915	1,56	1,82	0,859
<i>6</i>	Ti-6,5Al-3Mo-1V	2	890	2,65	2,56	1,035	1,78	1,74	1,020
<i>7</i>	Ti-4Al-3Mo-1V	1	700	2,27	2,66	0,854	1,64	1,88	0,872

нием и разными вариациями базовых свойств $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_K , полученных по результатам собственных экспериментов авторов [3, 7] и из других литературных источников при 293 К (табл. 1). Закономерности $\mu_{B_r}^\sigma = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ позволяют также оценить соотношение каждого из резервов прочности — по охрупчиванию (B_r) и по переходу в хрупкое состояние (K_{ms}) на качественном уровне.

Зависимости $\mu_{B_r}^\sigma = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ для КТС широкого круга использования могут быть аппроксимированы следующими параболическими функциями для каждого исходного вида поведения механических характеристик КТС (рис. 7):

$$\mu_{B_r}^\sigma = A + B\mu_{K_{ms}}^\sigma + C(\mu_{K_{ms}}^\sigma)^2, \quad (20)$$

где эмпирические коэффициенты для 1-го вида: $A = 0,399 \pm 0,203$, $B = 2,712 \pm 0,548$, $C = -1,448 \pm 0,364$; для 2-го вида: $A = 0,898 \pm 0,062$, $B = -0,864 \pm 0,161$, $C = 0,946 \pm 0,102$.

Из анализа данных табл. 3 и рис. 7 можно сделать следующие выводы: в отличие от КС, мера исходного механического качества $\mu_{B_r}^\sigma$ по изломостойкости B_r для КТС 1-го вида поведения механических характеристик больше, чем у сплавов 2-го вида при сопоставимой прочности $\sigma_{0,2}$ только в интервале $0,62 < \mu_{K_{ms}}^\sigma < 0,87$ (для КС 1-го вида показатель $\mu_{B_r}^\sigma$ больше, чем у сплавов 2-го вида во всём реальном интервале изменения $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ [16]), а при $\mu_{K_{ms}}^\sigma \geq 0,87$ и $\mu_{K_{ms}}^\sigma \leq 0,62$ наблюдается обратная ситуация — большими значениями $\mu_{B_r}^\sigma$ обладают КТС 2-го вида; показатели меры качества для КТС обоих видов сравнимы по величине в окрестности пересечения зависимостей $\mu_{B_r}^\sigma = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ — при $\mu_{K_{ms}}^\sigma \approx 0,62$ ($\mu_{B_r}^\sigma \approx 0,73$) и $\mu_{K_{ms}}^\sigma \approx 0,87$, причём вблизи второй точки пересечения $\mu_{B_r}^\sigma \approx \mu_{K_{ms}}^\sigma$.

Анализ соотношения резервов прочности КТС широкого круга использования на качественном уровне приводит к следующим выводам: а — качество резерва по B_r сравнимо по величине с качеством резерва по K_{ms} для КТС обоих видов только вблизи точки пересечения зависимостей $\mu_{B_r}^\sigma = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ при $\mu_{B_r}^\sigma \approx \mu_{K_{ms}}^\sigma \approx 0,87$, б — для сплавов 2-го вида качество резерва по B_r несколько ниже качества резерва по K_{ms} в интервале $\mu_{K_{ms}}^\sigma > 0,87$, в — качество резерва по B_r

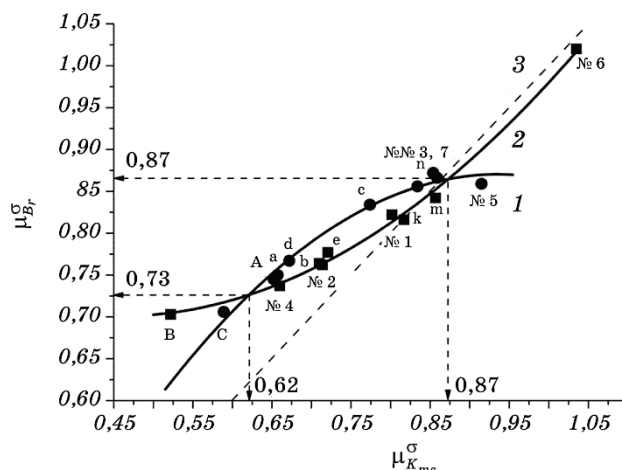


Рис. 7. Зависимости исходного механического качества $\mu_{B_r}^\sigma$ КТС широкого круга использования по изломостойкости B_r от аналогичного показателя $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$: 1 — сплавы 1-го вида (●), 2 — сплавы 2-го вида (■), 3 — условие $\mu_{B_r}^\sigma = \mu_{K_{ms}}^\sigma$ (штриховая линия); латинские буквы и номера обозначают КТС в табл. 1 и 3.

Fig. 7. Dependences of the initial mechanical quality $\mu_{B_r}^\sigma$ of the CTA of a wide range of uses for the brittle resistance B_r from the same index $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ for the mechanical stability of K_{ms} for a given strength $\sigma_{0,2}$: 1—alloys of the type 1 (●), 2—alloys of the type 2 (■), 3—condition $\mu_{B_r}^\sigma = \mu_{K_{ms}}^\sigma$ (dashed line); Latin letters and numbers designate CTAs in Tables 1 and 3.

выше качества резерва по K_{ms} в интервале $\mu_{K_{ms}}^{\sigma} < 0,87$ независимо от видовой принадлежности КТС и их прочности $\sigma_{0,2}$ (положение кривой 3 на рис. 7, обуславливающей равенство $\mu_{B_r}^{\sigma} = \mu_{K_{ms}}^{\sigma}$). Из рассмотренной выборки КТС широкого круга использования наивысшее механическое качество по изломостойкости $\mu_{B_r}^{\sigma} = 0,866$ при прочности $\sigma_{0,2} = 570$ МПа демонстрирует сплав № 3 (сплав АТ2) 1-го вида, который широко используется в криогенной технике, и сплав 2-го вида № 6 (Ti–6,5Al–3Mo–1V) при величинах изломостойкости $\mu_{B_r}^{\sigma} = 1,020$ и прочности $\sigma_{0,2} = 890$ МПа (табл. 3).

6. ВЫВОДЫ

1. Обобщённая диаграмма системы взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость» отображает запас пластичности ψ_K , достаточный для защиты от охрупчивания конструкционных титановых сплавов за счёт изломостойкости B_r в зависимости от их прочности $\sigma_{0,2}$. Кривые оптимизации на обобщённой диаграмме представляют собой геометрическое место точек, которое ограничивает такой предельный комплекс свойств сплавов, при котором каждому фиксированному значению деформационной стойкости B_r отвечает наибольшее значение прочности $\sigma_{0,2}$. Смысл кривых оптимизации состоит в том, что они характеризуют оптимальные (наилучшие) соотношения свойств пластичности $\psi_K^{\text{опт}}$ и изломостойкости $B_r^{\text{опт}}$ конструкционных металлических сплавов при заданной прочности $\sigma_{0,2}$.
2. Способность металла сопротивляться охрупчиванию определяют два вида обобщающих соотношений между его базовыми свойствами. На принадлежность конструкционных титановых сплавов к разным видам поведения механических характеристик в системе взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–деформационная стойкость» влияет их структурное состояние, которое формируется режимами их термической и/или термомеханической обработки.
3. Отношение величины деформационной стойкости искомого сплава B_r к её оптимальному значению $B_r^{\text{опт}}$ может быть использовано как мера механического качества металла $\mu_{B_r}^{\sigma}$ по изломостойкости B_r при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, т.е. как мера качества его прочности. Метод оценки механического качества по изломостойкости B_r при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ может быть использован на практике для конструкционных титановых сплавов в тех случаях, когда выбранный или заказанный сплав должен обеспечивать заданный уровень свойства сопротивляемости охрупчиванию.
4. Проведенный анализ позволяет не только выяснить логику природной взаимосвязи базовых характеристик металла, но и заложить научную основу для практического продвижения определенных технологических поисков на пути к достижению оптимальных

(наилучших) показателей необходимого комплекса механических свойств.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 2014).
2. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы* (Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Acad. Publ.: 2015).
3. J. N. Hollomon, *Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
4. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металознавство та термічна обробка металів*, № 4: 54 (2014).
5. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металознавство та термічна обробка металів*, № 1: 5 (2015).
6. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Механика машин, механизмов и материалов*, **38**, № 1: 79 (2017).
7. П. Є. Марковський, С. О. Котречко, А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, О. М. Івасишин, *Спосіб визначення характеристики відносного рівномірного зруження конструкційного титанового сплаву*, Патент 103967 Україна. МПК, G01N 3/00, 3/08, 3/18 (Промислова власність, № 23) (Опубл. 10 грудня 2013).
8. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 9: 1197 (2017).
9. А. В. Шиян, *Наукові основи формування раціонального комплексу механічних властивостей конструкційних сталей і титанових сплавів* (Автореф. дис. ... докт. техн. наук) (Дніпропетровськ: ДВНЗ «Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури»: 2016).
10. І. М. Гавриш, *Формування високоміцних структурно-фазових станів у деталях кріплення з титанового сплаву VT22 при обробленні в нерівноважних умовах* (Автореф. дис. ... канд. техн. наук) (Київ: Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича: 2017).
11. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 4: 479 (2013).
12. C. F. Hickey, Jr., *ASTM Proceedings*, **62**: 765 (1962).
13. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, А. В. Шевченко, *Металлофизика*, **14**, № 4: 70 (1992).
14. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях* (Ред. Г. С. Писаренко) (Киев: Наукова думка: 1980), т. 1–2.
15. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
16. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Г. П. Зими́на, *Сталь*, **2018**, № 6: 47.

REFERENCES

1. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stablnost Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys]

- (Kyiv: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
2. A. V. Shiyan and Yu. Ya Meshkov, *Okhrupchivanie Metallicheskih Splavov v Usloviyakh Kontsentratsii Napryazheniy. Konstruktsionnye Stali i Titanovye Splavy* [Embrittlement of Metal Alloys in the Conditions of Stress Concentration. Structural Steel and Titanium Alloys] (Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Acad. Publ.: 2015) (in Russian).
3. J. H. Hollomon, *Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
4. A. V. Shiyan and Yu. Ya Meshkov, *Metaloznavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, No. 4: 54 (2014) (in Russian).
5. A. V. Shiyan and Yu. Ya Meshkov, *Metaloznavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, No. 1: 5 (2015) (in Russian).
6. A. V. Shiyan and Yu. Ya Meshkov, *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, **38**, No. 1: 79 (2017) (in Russian).
7. P. Ye. Markovsky, S. O. Kotrechko, A. V. Shyyan, Yu. Ya. Myeshkov, and O. M. Ivasyshyn, *Sposib Vyznachennya Kharakterystyky Vidnosnoho Rivnomirnogo Zvuzhennya Konstruktsiynoho Tytanovoho Splavu* [Method of Determining the Characteristic of the Relative Uniform Constriction of a Structural Titanium Alloy]: Patent 103967 UA. MKI, G01N 3/00, 3/08, 3/18 (Promyslova Vlasnist, No. 23) (Publ. December 10, 2013) (in Ukrainian).
8. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. Ya. Meshkov, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 9: 1197 (2017) (in Russian).
9. A. V. Shiyan, *Naukovi Osnovy Formuvannya Ratsionalnoho Kompleksu Mekhanichnykh Vlastyvostey Konstruktsiynykh Staley i Tytanovykh Splaviv* [Scientific Basis for the Formation of a Rational Complex of Mechanical Properties of Structural Steels and Titanium Alloys] (Thesis of Disser. ... for Dr. Tech. Sci.) (Dnipropetrovsk: State Higher Educational Establishment 'Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture': 2016) (in Ukrainian).
10. I. M. Havrysh, *Formuvannya Vysokomitsnykh Structurno-Phazovykh Staniv u Detalyakh Kriplennya z Tytanovoho Splavu VT22 pry Obroblenni v Nerinovazhnukh Umovakh* [Formation of High-Strength Structural-Phase States in the Details of Fastening of Titanium Alloy VT22 Under Non-Equilibrium Treatment] (Thesis of Disser. ... for Cand. Tech. Sci.) (Kyiv: State Enterprise 'Antonov': 2017) (in Ukrainian).
11. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, S. A. Kotrechko, Yu. Ya. Meshkov, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 4: 479 (2013) (in Russian).
12. C. F. Hickey, Jr., *ASTM Proceedings*, **62**: 765 (1962).
13. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. Ya. Meshkov, G. A. Pakhareno, and A. V. Shevchenko, *Metallofiz.*, **14**, No. 4: 70 (1992) (in Russian).
14. *Prochnost Materialov i Elementov Konstruktsiy v Ekstremalnykh Usloviyakh* [Strength of Materials and Structural Elements under Extreme Conditions], (Ed. G. S. Pisarenko) (Kyiv: Naukova Dumka: 1980), vol. 1–2 (in Russian).
15. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost i Plastichnost Konstruktsionnykh Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* [Strength and Plasticity of Structural Materials at Low Temperatures] (Moscow: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).
16. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Stal'*, No. 6: 47 (2018) (in Russian).