

УДК 669.187.526

**ВЗАИМОСВЯЗЬ СВОЙСТВ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И  
МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

**А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков**

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

**Введение**

В современном машиностроении особую роль играют конструкционные титановые сплавы (КТС), обладающие уникальным сочетанием высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, что делает их весьма привлекательными для широкого использования в авиации и автомобилестроении, химической промышленности, в медицине и прочих сферах.

В существующей методологии оценки качества КТС определяются не ключевые механические характеристики, влияющие на сопротивляемость охрупчиванию, а характеристики, лишь косвенно отражающие степень удаленности металла от «хрупкого» состояния при соответствующем виде испытания:  $\Psi_K$ ,  $\delta_K$  ( $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$ ) – относительное сужение и относительное удлинение после разрушения образца, определяемые при испытании стандартных образцов на одноосное статическое растяжение [1–3], ударная вязкость (KCV – удельная работа разрушения с надрезом Шарпи, KCU – с надрезом Менаже), определяемая при динамических (ударных) испытаниях [4–6], а также вязкость разрушения  $K_{IC}$ ,  $K_{JIC}$ , определяемая при испытаниях на статическую трещиностойкость [6; 7]. Вывод о том, что характеристики пластичности  $\Psi_K$  и ударной вязкости KCV (KCU) не дают однозначного ответа на вопрос об охрупчиваемости металла в изделии был сделан в работах [8; 9], а о том, что характеристики трещиностойкости  $K_{IC}$  ( $K_{JIC}$ ) являются частным случаем отклика нагруженного металла на содержащийся в нем дефект определенного типа (трещину), – в работах [10; 11]. Таким образом, несмотря на многолетнюю практику применения вышеуказанных характеристик для оценки качества металла, ни одна из них не стала полноценной инженерной расчетной характеристикой надежности металла в условиях конструкции, так как отсутствует само понятие физически обоснованных «допускаемых» величин  $\Psi_K$  или KCV (KCU), а характеристики трещиностойкости  $K_{IC}$ ,  $K_{JIC}$  являются частным случаем отклика нагруженного металла на содержащийся в нем дефект определенного типа – трещину [10].

Известно, в частности, что критерием сопротивляемости хрупкому разрушению (охрупчиванию) в условиях одноосного растяжения может являться одна из базовых характеристик металла – характеристика механической стабильности  $K_{ms}$ , которая для конструкционных, в том числе

титановых, сплавов определяется согласно зависимости [10–12]:

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

где:  $R_X$  (для конструкционных сталей (КС)  $R_{MC}$  – сопротивление микросколу) – хрупкая прочность металла;  $\sigma_2$  – прочность пластичного металла при критической степени деформации  $e_C$ , равной 2 %;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $n$  – показатель деформационного упрочнения.

Важно заметить, что хрупкая прочность  $R_X$  является наибольшим значением стабильной прочности как для КС, так и для КТС, однако для КС она одновременно принимает наименьшее, а для КТС – наибольшее значение нестабильной прочности. В то же время, по своей сути, для обоих сплавов  $R_X$  – это исходная (базовая) структурно-детерминированная прочность, которая задается только составом и структурным состоянием металла. Такая хрупкая прочность  $R_X$  может рассматриваться как особая *предельная* прочность [11].

Таким образом, механическая стабильность  $K_{ms}$ , как важнейший признак устойчивости свойства прочности, принципиально дополняет характеристику прочности с точки зрения оценки степени охрупчиваемости металла под воздействием всех внешних факторов влияния на прочность – температуры, динамики, вида напряженного состояния и др. При этом, частным случаем нагружения является «квазистатическое» растяжение гладких образцов, которое применяют для определения базовых механических характеристик металла в большинстве заводских и научных лабораторий. Величина  $K_{ms}$  в безразмерных единицах характеризует способность металла оказывать сопротивление охрупчиванию, поэтому, эту характеристику можно рассматривать как универсальную меру стабильности пластического состояния материала, частным проявлением которой является: относительное сужение  $\Psi_K$  [8], определяемое при одноосном растяжении, ударная вязкость  $KCV$  (КСУ) [10], измеряемая при динамическом нагружении, и характеристики вязкости разрушения  $K_{IC}$  или  $K_{Jc}$  [13], которые рассчитывают по результатам испытаний на статическую трещиностойкость.

Ключевым этапом первичной оценки качества конструкционных металлов является оптимизация, т.е. поиск наилучших сочетаний, их базовых механических характеристик. В работах [14; 15] были установлены закономерности согласованного изменения характеристик прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) и пластичности ( $\Psi_K$ ) КС, при котором уровень механической стабильности оставался постоянным ( $K_{ms} = \text{const}$ ) и проведена оптимизация этих свойств. Анализ результатов, полученных в [14; 15], показал, что зависимость

$\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  для КС, изначально носящая неупорядоченный характер, только предполагающий существование корреляционной связи между указанными параметрами с весьма низким коэффициентом корреляции (рис. 1 а), при использовании критерия  $K_{ms} = \text{const}$ , превращается в систему корреляционных зависимостей для каждого фиксированного уровня  $K_{ms}$  с достаточно высоким ( $> 0,9$ ) коэффициентом корреляции каждой из них (рис. 1 б).

Проведенный в работах [12; 16; 17] детальный анализ сопротивляемости охрупчиванию КТС с последующей первичной оценкой их качества в лабораторных условиях предполагает поиск закономерностей согласованного изменения базовых механических характеристик сплавов, а также их оптимизацию. При помощи полученных в [12] зависимостей для расчета характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности, удалось определить значения  $K_{ms}$  для широкого круга КТС, что, в свою очередь, дает возможность рассмотреть вопрос взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» этих сплавов.

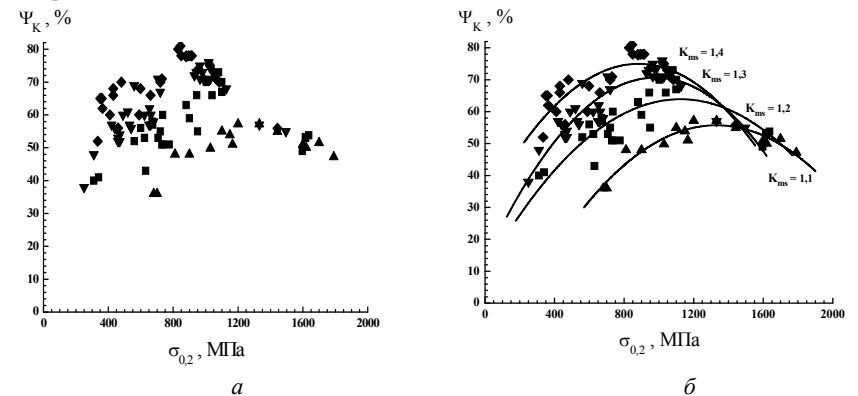


Рис. 1. Зависимость пластичности  $\psi_K$  от прочности  $\sigma_{0,2}$ : а – в общем виде; б – систематизированная при использовании критерия  $K_{ms} = \text{const}$  в диапазоне изменения фиксированных значений  $K_{ms} = 1,1 - 1,4$ ; ▲, ■, ▼, ◆ – экспериментальные данные для КС [14]

Из сказанного вытекает **цель настоящей работы**, которая заключается в установлении закономерностей согласованного изменения прочностных ( $\sigma_{0,2}$ ) и пластических ( $\psi_K$ ) свойств конструктивных титановых сплавов, при фиксированном уровне механической стабильности ( $K_{ms} = \text{const}$ ) и поиске их оптимальных сочетаний.

### **Исследуемые материалы**

Материалы для исследований подбирали по принципу максимально широкого охвата различных комбинаций прочностных и пластических характеристик КТС, при этом характеристики прочности изменялись в пределах от  $\sigma_{0,2} = 600$  МПа до  $\sigma_{0,2} = 1\ 725$  МПа, а характеристики пластичности – от  $\psi_K = 70,0$  % до  $\psi_K = 1,0$  %. Для этого в качестве объектов анализа выбирали КТС с различной структурой и фазовым составом, относящиеся к различным классам по качеству, составу и назначению, в том числе специального назначения, используемые в криогенной технике и для создания особо ответственных конструкций, которые отличались режимами термической обработки. Для анализа использовали экспериментальные данные, полученные в ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины и приведенные в работах [1; 2; 18–22], а также справочные и литературные данные из других источников [3; 4; 6; 23; 24] с целью получения информации о значениях базовых механических характеристик КТС в диапазоне температур от 4 К до 293 К, которые были обработаны при помощи методики [12]. Это позволило получить достаточный объем данных для корректной статистической обработки. Всего в настоящей работе представлены результаты около 500 измерений комплекса механических характеристик более 400 видов различных структурных состояний КТС.

### **Основы оптимизации комплекса механических характеристик КТС**

#### **1. Методика и результаты оптимизации**

Методика оптимизации прочностных ( $\sigma_{0,2}$ ) и пластических ( $\psi_K$ ) свойств КТС с различными уровнями сопротивляемости охрупчиванию при условии постоянства механической стабильности  $K_{ms} = \text{const}$  аналогична соответствующей методике для КС [14, 15] и заключается в следующем:

– из всего массива экспериментальных данных выбирали те сплавы, у которых значения характеристики механической стабильности лежали вблизи определенного значения  $K_{ms} = \text{const}$  с погрешностью, не превышающей  $\pm 5$  %;

– строили диаграммы (изолинии) полученных зависимостей  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ , выполняя условие  $K_{ms} = \text{const}$  во всем реальном для КТС диапазоне изменения величины характеристики механической стабильности в упруго-пластической области нагружения  $K_{ms} = 1,0\text{--}2,7$  с минимальной дискретностью (от 0,05 до 0,2), которую позволяла исследованная выборка (рис. 2).

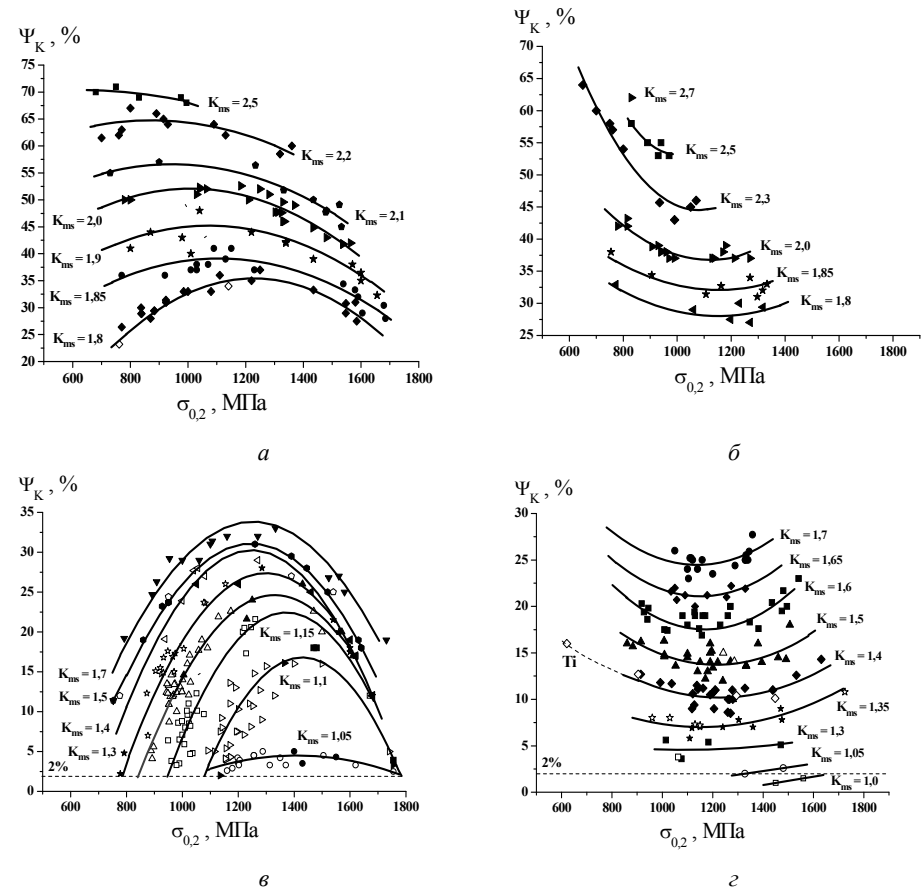


Рис. 2. а, в – зависимости  $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$  вида 1 для диапазонов изменения  $K_{ms} = 2,5-1,8$  и  $K_{ms} = 1,7-1,05$  соответственно; б, г – зависимости  $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$  вида 2 для диапазонов изменения  $K_{ms} = 2,7-1,8$  и  $K_{ms} = 1,7-1,0$  соответственно; экспериментальные данные КТС: темные знаки – сплавы первой группы; светлые знаки – сплавы второй группы [17]

Следует отметить, что КТС I-ой и II-ой группы, которые характеризуются различным характером изменения показателя деформационного упрочнения в области локализованной деформации, а именно, I-ой группы – практически неизменным значением интенсивности деформационного упрочнения, а II-ой группы – ее увеличением [17], имеют

различное распределение по уровням фиксированных значений  $K_{ms}$  (рис. 2).

В результате анализа было установлено, что эмпирические зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при  $K_{ms} = \text{const}$  для всего массива экспериментальных данных КТС хорошо аппроксимируются параболическими функциями регрессии<sup>1</sup>:

$$\psi_K = a \pm b \cdot \sigma_{0,2} \mp c \cdot \sigma_{0,2}^2, \quad (2)$$

которые можно разделить на два вида поведения механических характеристик:

1) параболы, обращенные вогнутостью вниз (рис. 2 а, в) и характеризующиеся возрастанием характеристики пластичности  $\psi_K$  с увеличением прочности  $\sigma_{0,2}$  до максимального значения (максимума)  $\psi_K^{\text{макс.}}$

и последующим ее убыванием с дальнейшим повышением  $\sigma_{0,2}$ , далее по тексту – выпуклые зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  вида 1, у которых  $b > 0$ ;  $c < 0$ ;

2) параболы, обращенные вогнутостью вверх (рис. 2 б, г) и, наоборот, характеризующиеся убыванием характеристики пластичности  $\psi_K$  с

увеличением прочности  $\sigma_{0,2}$  до минимального значения (минимума)  $\psi_K^{\text{мин.}}$  и последующим ее возрастанием с дальнейшим повышением  $\sigma_{0,2}$ , далее по

тексту – вогнутые зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  вида 2<sup>2</sup>, у которых  $b < 0$ ;  $c > 0$ .

Из рисунка 2 видно, что уровень механической стабильности КТС, относящихся к I-ой группе, не превышает значения 1,8 для сплавов 1-го вида поведения механических характеристик и значения 1,5 для сплавов 2-го вида. Это свидетельствует о более низкой сопротивляемости охрупчиванию этой группы КТС, большинство из которых относятся к сплавам, полученным методом порошковой металлургии [17]. Что же касается КТС, относящихся ко II-ой группе, то они демонстрируют полное заполнение высоких уровней  $K_{ms}$ : не менее 1,85 для сплавов 1-го вида поведения механических характеристик и 1,6 – для сплавов 2-го вида, что свидетельствует о высокой сопротивляемости охрупчиванию этой группы КТС. Тенденция к

---

<sup>1</sup> Здесь и далее размерность значений:  $\psi_K$  – в %;  $\sigma_{0,2}$  – в МПа.

<sup>2</sup> При низких значениях характеристики механической стабильности ( $K_{ms} = 1,0-1,05$ ) параболические зависимости 2-го вида поведения механических характеристик вырождаются в линейные, а при  $K_{ms} = 2,7$  в исследованной выборке КТС имеет место только одно экспериментальное значение  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ .

уменьшению распределения этих сплавов со снижением уровней  $K_{ms}$ , по-видимому, связана только с особенностями технологий их получения и диапазоном низких, в том числе, криогенных температур испытаний.

Значения коэффициентов  $a, b, c$  в уравнении (2) для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик при некоторых фиксированных уровнях  $K_{ms}$  приведены в таблице 1. Анализ показал, что указанные коэффициенты связаны с характеристикой механической стабильности  $K_{ms}$  зависимостями, которые хорошо описываются квадратными полиномами вида (рис. 3):

$$a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2} = d + e \cdot K_{ms} - f \cdot K_{ms}^2, \quad (3)$$

значения эмпирических коэффициентов  $d, e, f$  в которых приведены в таблице 2.

Используя зависимости (2) и (3), можно полностью описать взаимосвязь свойств пластичности  $\psi_K$ , прочности  $\sigma_{0,2}$  и механической стабильности  $K_{ms}$  для обоих видов поведения механических характеристик КТС при помощи следующих обобщенных уравнений:

– для КТС 1-го вида:

$$\psi_K^1 = \sigma_{0,2} \cdot (A - B \cdot \sigma_{0,2}) + K_{ms} \cdot (C - D \cdot K_{ms}) + \sigma_{0,2} \cdot K_{ms} \cdot [\sigma_{0,2} \cdot K_{ms} \cdot (E/\sigma_{0,2} + F/K_{ms} - K) - L] - N, \quad (4)$$

где:  $A = 1,028$  [МПа<sup>-1</sup>];  $B = 33,825 \cdot 10^{-5}$  [МПа<sup>-2</sup>];  $C = 696,819$ ;  $D = 138,789$ ;  $E = 0,160$  [МПа<sup>-1</sup>];  $F = 24,735 \cdot 10^{-5}$  [МПа<sup>-2</sup>];  $K = 4,732 \cdot 10^{-5}$  [МПа<sup>-2</sup>];  $L = 0,798$  [МПа<sup>-1</sup>];  $N = 806,812$  – эмпирические коэффициенты,

– для КТС 2-го вида:

$$\psi_K^2 = \sigma_{0,2} \cdot [K_{ms} \cdot (A \cdot \sigma_{0,2} - B) - C \cdot \sigma_{0,2} + D] + E \cdot K_{ms} - F, \quad (5)$$

где:  $A = 7,529 \cdot 10^{-5}$  [МПа<sup>-2</sup>];  $B = 0,170$  [МПа<sup>-1</sup>];  $C = 8,857 \cdot 10^{-5}$  [МПа<sup>-2</sup>];  $D = 0,199$  [МПа<sup>-1</sup>];  $E = 134,415$ ;  $F = 154,316$  – эмпирические коэффициенты.

Таблица 1

Значения коэффициентов  $a, b, c$   
 для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик КТС  
 при некоторых фиксированных уровнях  $K_{ms}$

Уровень $K_{ms}$	Зависимость $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ для 1-го вида			Зависимость $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ 2-го вида		
	a	b [МПа <sup>-1</sup> ]	$c \cdot 10^{-5}$ [МПа <sup>-2</sup> ]	a	b [МПа <sup>-1</sup> ]	$c \cdot 10^{-5}$ [МПа <sup>-2</sup> ]
2,5	63,08	0,018	-1,430	182,20	-0,229	9,968
2,3	--	--	--	155,02	-0,194	8,443
2,2	41,37	0,043	-2,403	--	--	--
2,1	31,45	0,058	-2,794	--	--	--
2,0	15,90	0,071	-3,444	114,41	-0,142	6,220
1,9	1,58	0,081	-3,990	--	--	--
1,85	-7,22	0,094	-4,190	93,95	-0,116	5,131
1,8	-16,01	0,108	-4,800	87,65	-0,108	4,770
1,7	-37,10	0,133	-5,450	74,24	-0,090	3,920
1,65	--	--	--	66,80	-0,081	3,540
1,6	--	--	--	60,50	-0,073	3,180
1,5	-85,68	0,181	-6,986	48,32	-0,057	2,340
1,4	-116,54	0,219	-8,286	37,16	-0,044	1,790
1,35	--	--	--	24,50	-0,030	1,306
1,3	-145,51	0,260	-9,504	19,95	-0,022	0,910
1,2	-182,07	0,300	-11,050	--	--	--
1,15	-201,05	0,322	-11,769	--	--	--
1,1	-218,52	0,342	-12,510	--	--	--
1,05	-30,25	0,049	-1,754	-3,24	-0,004	--
1,0	--	--	--	-5,59	-0,005	--



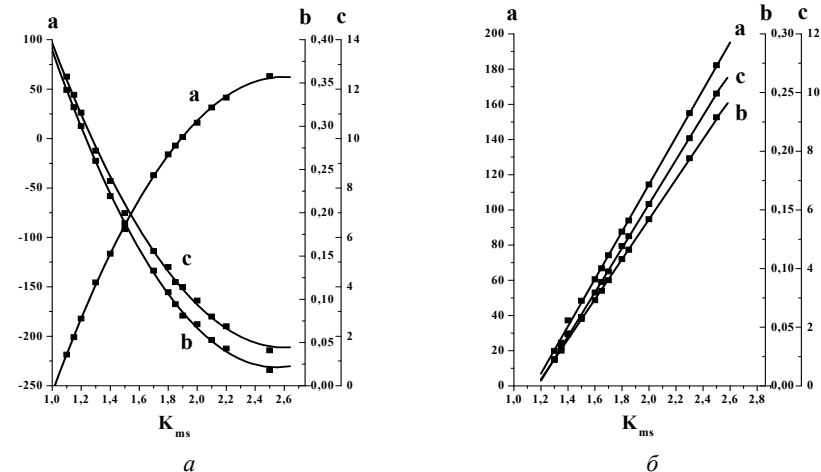


Рис. 3. Зависимости коэффициентов  $a = f(K_{ms})$ ,  $b = f(K_{ms})$ ,  $c = f(K_{ms})$  в функции (2) для двух видов поведения механических характеристик КТС:  $a$  – 1-го;  $\bar{b}$  – 2-го; ■ – данные таблицы 1

Таблица 2  
Значения эмпирических коэффициентов d, e, f в зависимостях (3) для каждого из видов поведения механических характеристик КТС

Вид КТС	Коэффициенты в (3)	Размерность	d	e	f
1	$a_1$	–	-782,47	651,45	125,57
	$b_1$	[МПа <sup>-1</sup> ]	1,016	0,782	0,154
	$c_1 \cdot 10^{-5}$	[МПа <sup>-2</sup> ]	34,018	24,975	4,802
2	$a_2$	–	-154,32	134,42	0,0
	$b_2$	[МПа <sup>-1</sup> ]	-0,199	0,170	0,0
	$c_2 \cdot 10^{-5}$	[МПа <sup>-2</sup> ]	-8,857	7,529	0,0

Графическое отображение зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2}, K_{ms})$  для всей исследованной выборки КТС с использованием уравнений (4) и (5) представлено на рисунке 4.

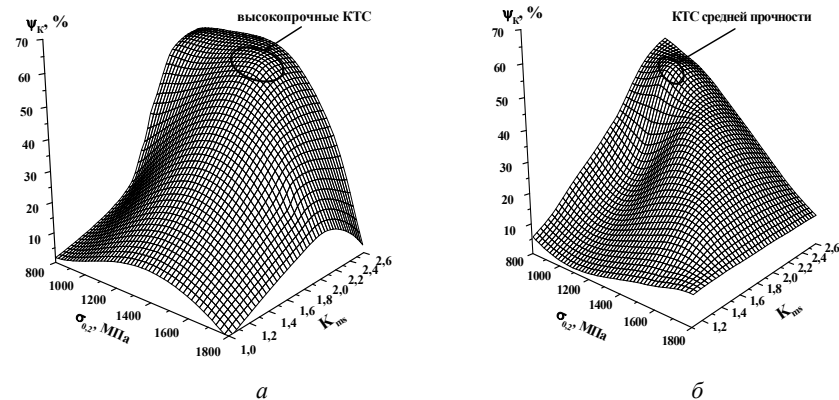


Рис. 4. Взаимосвязь свойств пластичности  $\psi_K$ , прочности  $\sigma_{0,2}$  и механической стабильности  $K_{ms}$  для двух видов поведения механических характеристик КТС: *a* – 1-го; *б* – 2-го

На рисунке 4 обозначены (указаны стрелкой) интервалы изменения значений прочности  $\sigma_{0,2}$ , для которых характерно сочетание наиболее высоких значений характеристик пластичности  $\psi_K$  и механической стабильности  $K_{ms}$ . Для высокопрочных КТС 1-го вида поведения механических характеристик (рис. 4 а) этот интервал составляет от 1 000 МПа до 1 400 МПа, а для КТС средней прочности 2-го вида поведения механических характеристик (рис. 4 б) – от 850 МПа до 1 000 МПа.

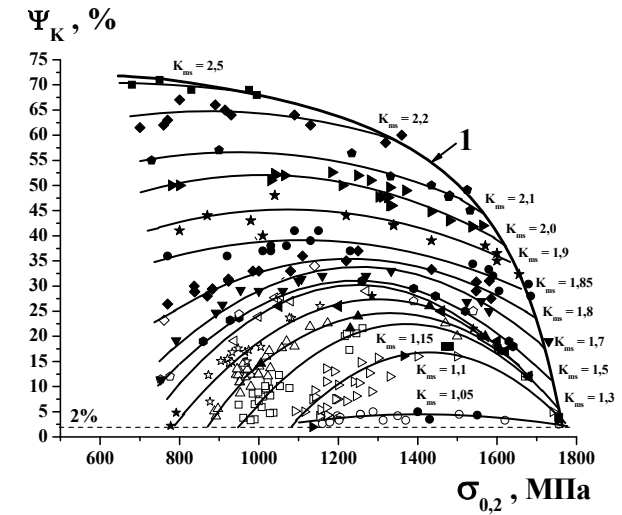
## 2. Обобщенная диаграмма взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность»

На основе объединения зависимостей  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при различных фиксированных значениях  $K_{ms}$  (рис. 2) можно построить обобщенную диаграмму взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность», отражающую запас пластичности, достаточный для защиты от хрупкости металлических сплавов, за счет механической стабильности в зависимости от их прочности для каждого вида поведения механических характеристик. Здесь следует заметить, что принцип построения обобщенной диаграммы взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» для КТС имеет системный характер, а точность этого построения достаточна для практического использования (рис. 5).

Особую роль на обобщенной диаграмме взаимосвязи свойств «пластичность - прочность – механическая стабильность» представляют кривые 1 (рис. 5 а) и 2 (рис. 5 б), которые представляет собой геометрическое место точек, ограничивающих такой предельный комплекс свойств КТС, при

котором каждому фиксированному значению механической стабильности  $K_{ms}$  соответствует максимальное значение прочности  $\sigma_{0,2}$ .

Такие кривые названы *кривыми оптимизации* [14; 25] и их смысл заключается в том, что они характеризуют оптимальные (наилучшие) сочетания свойств пластичности  $\Psi_K$ , и механической стабильности  $K_{ms}$  КТС при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ , другими словами, характеристики  $\Psi_K$  и  $K_{ms}$  принимают оптимальные значения  $\Psi_K^{opt.}$  и  $K_{ms}^{opt.}$  на кривых оптимизации при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ . Здесь следует заметить, что величины  $K_{ms}^{opt.}$  и  $\Psi_K^{opt.}$  всегда максимальны для заданной прочности  $\sigma_{0,2}$  (рис. 5).



a

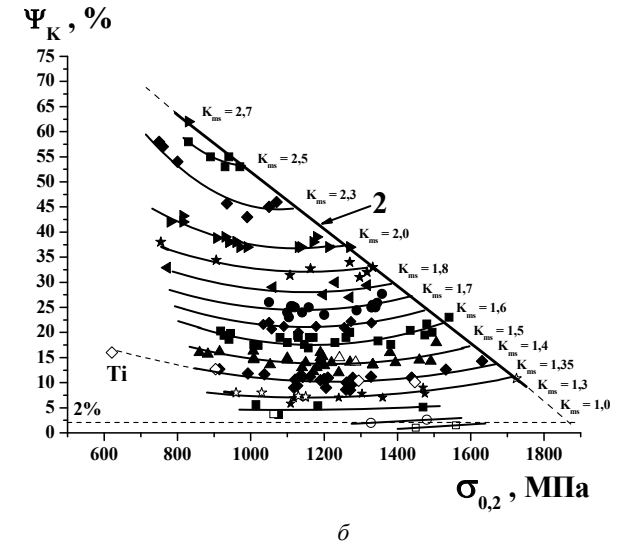


Рис. 5. Взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» в виде обобщенной диаграммы для двух видов поведения механических характеристик КТС: *a* – 1-го – кривая оптимизации 1; *б* – 2-го – кривая оптимизации 2; экспериментальные данные сплавов: светлые знаки – первой группы; темные знаки – второй группы

С другой стороны, заданная прочность  $\sigma_{0,2}$  на кривых оптимизации всегда будет иметь максимальное значение для каждого уровня  $K_{ms}$  (рис. 5 а, б). При этом сочетание характеристик  $\Psi_K^{opt.}$  и  $K_{ms}^{opt.}$  на кривых оптимизации при заданном значении прочности  $\sigma_{0,2}$  характеризует наивысшее *механическое 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.

Кривые оптимизации 1 и 2 (рис. 5) построены на основе экспериментальных данных исследованной выборки комплекса механических свойств КТС (см. раздел 2) в свойственном для КТС диапазоне изменения величины механической стабильности  $1,0 \leq K_{ms} \leq 2,7$  и имеют аналитическое описание.

Кривая 1, ограничивающая значения максимальной прочности  $\sigma_{0,2}$  при фиксированных величинах  $K_{ms}$  1-й части обобщенной диаграммы зависимостей  $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$  1-го вида поведения механических

характеристик КТС (рис. 5 а) может быть аппроксимирована гиперболической функцией:

$$\psi_K^{opt.} = \frac{a - b \cdot \sigma_{0,2}}{1 - c \cdot \sigma_{0,2}}, \quad (6)$$

где:  $a = 75,745$ ;  $b = 0,043$  [МПа<sup>-1</sup>];  $c = 5,1$  [МПа<sup>-1</sup>] – эмпирические коэффициенты, а кривая 2, ограничивающая значения максимальной прочности  $\sigma_{0,2}$  при фиксированных величинах  $K_{ms}$  2-й части обобщенной диаграммы зависимостей  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  2-го вида поведения механических характеристик КТС (рис. 5, б) может быть аппроксимирована линейной функцией:

$$\psi_K^{opt.} = a - b \cdot \sigma_{0,2}, \quad (7)$$

где:  $a = 108,887$ ;  $b = 0,057$  [МПа<sup>-1</sup>] – эмпирические коэффициенты.

Зависимость  $\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$  для кривой оптимизации 1 (рис. 5, а – кривая 1) может быть аппроксимирована S-образной функцией Ричардса [26] (рис. 6, кривая 1):

$$\psi_K^{opt.} = a \left[ 1 + (d - 1) \cdot e^{-b \cdot (K_{ms}^{opt.} - c)} \right]^{1/(1-d)}, \quad (8)$$

где:  $a = 69,229$ ;  $b = 9,243$ ;  $c = 2,046$ ;  $d = 4,270$  – эмпирические коэффициенты.

Аналогичная зависимость  $\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$  для кривой оптимизации 2 (рис. 5, б – кривая 2) может быть аппроксимирована линейной функцией: (рис. 6, кривая 2):

$$\psi_K^{opt.} = a + b \cdot K_{ms}^{opt.}, \quad (9)$$

где:  $a = -36,938$ ;  $b = 37,177$  – эмпирические коэффициенты.

Из рисунка 6 видно, что КТС 1-го вида поведения механических характеристик имеют более высокие показатели оптимальной пластичности  $\psi_K^{opt.}$  при заданном значении оптимальной механической стабильности  $K_{ms}^{opt.}$ , чем КТС 2-го вида, начиная с граничного значения  $\psi_K^{opt.} > 34,5$  %. Этому значению оптимальной пластичности соответствует граничная величина  $K_{ms}^{opt.} = 1,95$ . При  $\psi_K^{opt.} \leq 34,5$  % и  $K_{ms}^{opt.} \leq 1,95$  наблюдается обратная ситуация – более высокие показатели оптимальной пластичности  $\psi_K^{opt.}$  при заданном значении оптимальной механической стабильности  $K_{ms}^{opt.}$  будут иметь КТС 2-го вида.

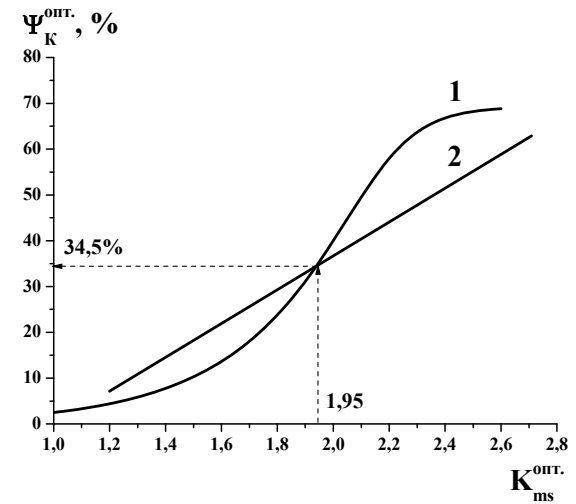


Рис. 6. Закономерности изменения оптимальных значений пластичности  $\Psi_K^{opt}$  от оптимальных значений механической стабильности  $K_{ms}^{opt}$  для двух видов поведения механических характеристик КТС: 1-го – кривая 1; 2-го – кривая 2

#### Обсуждение результатов

Информация об областях различного поведения зависимости  $\Psi_K^{opt} = f(K_{ms}^{opt})$  для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик КТС, а также о граничных значениях характеристик  $\Psi_K^{opt}$  и  $K_{ms}^{opt}$ , разделяющих эти области, найдет в дальнейшем свое практическое применение при оценке качества этих сплавов.

Используя уравнения (6) и (8), можно получить зависимость оптимального значения механической стабильности  $K_{ms}^{opt}$  от прочности  $\sigma_{0,2}$  для КТС 1-го вида:

$$K_{ms}^{opt} = a - b \cdot \ln \left[ \left( \frac{c - d \cdot \sigma_{0,2}}{1 - k \cdot \sigma_{0,2}} \right)^m \right], \quad (10)$$

где:  $a = 0,674$ ;  $b = 0,108$ ;  $c = 75,745$ ;  $d = 0,043$  [МПа<sup>-1</sup>];  $k = 5,1 \cdot 10^{-4}$  [МПа<sup>-1</sup>];  $m = -3,270$  – эмпирические коэффициенты, а проделав те же операции с уравнениями (7) и (9) – для КТС 2-го вида:

$$K_{ms}^{opt} = a - b \cdot \sigma_{0,2}, \quad (11)$$

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

Зависимости  $\Psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$  и  $K_{ms}^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$  для обоих видов поведения механических характеристик КТС представлены на рисунке 7.

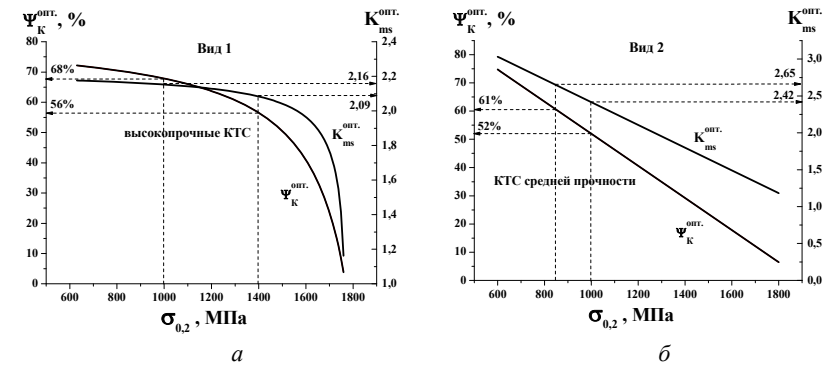


Рис. 7. Зависимости оптимальных значений пластичности  $\Psi_K^{opt.}$  и механической стабильности  $K_{ms}^{opt.}$  от уровня прочности  $\sigma_{0,2}$  для двух видов поведения механических характеристик КТС:  $a$  – 1-го;  $b$  – 2-го

С учетом отмеченных ранее (рис. 4) интервалов изменения значений прочности  $\sigma_{0,2}$ , для которых характерно сочетание оптимальных (наиболее высоких) значений характеристик пластичности  $\Psi_K^{opt.}$  и механической стабильности  $K_{ms}^{opt.}$ , а также зависимостей  $\Psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$  и  $K_{ms}^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$ , представленных на рис. 7, можно выделить области с наилучшими показателями механического качества КТС в системе взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность»:

– для наилучших высокопрочных сплавов 1-го вида поведения механических характеристик в интервале изменения  $\sigma_{0,2}$  от 1 000 МПа включительно и до 1 400 МПа (рис. 7 а) показатели пластичности должны варьироваться в пределах  $56\% \leq \Psi_K \leq 68\%$ , а механической стабильности – в пределах  $2,09 \leq K_{ms} \leq 2,16$ ;

– для наилучших сплавов средней прочности 2-го вида поведения механических характеристик в интервале изменения  $\sigma_{0,2}$  от 850 МПа до 1 000 МПа (рис. 7 б) показатели пластичности должны варьироваться в пределах  $52\% \leq \Psi_K \leq 61\%$ , а механической стабильности – в пределах  $2,42 \leq K_{ms} \leq 2,65$ .

К 1-му виду поведения механических характеристик относится большинство исследованных КТС (~ 65 %), из которых можно выделить следующие:

– некоторые высокопрочные сплавы, в которых стандартными (печными) методами термической обработки было сформированы структурные состояния, характеризуемые средней прочностью и повышенной пластичностью, например, сплав ВТ16 ( $\psi_K = 57\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 900$  МПа при уровне  $K_{ms} = 2,1$ ); сплав ВТ3 ( $\psi_K = 48\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 040$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,9$ ); а также пластичное состояние сплава Ti-10V-2Fe-3Al, полученного по порошковой технологии ( $\psi_K = 17,5\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 008$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,5$ );

– высокопрочные сплавы метастабильного  $\beta$ -класса, термически упрочненные на высокие значения прочности и характеризующие умеренным уровнем пластичности, например, сплав TiMETAL- LCB ( $\psi_K = 42\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 340$  МПа при уровне  $K_{ms} = 2,0$ ); сплав Beta-21S ( $\psi_K = 32\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 656$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,9$ ); сплав Ti-10V-2Fe-3Al, полученный по порошковой технологии ( $\psi_K = 13,6\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1170$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,1$ ).

Ко 2-му виду поведения механических характеристик можно отнести следующие КТС:

– некоторые сплавы термоупрочненные таким образом, что в них была сформирована микроструктура, обеспечивающая средние уровни как прочности, так и пластичности: например, сплав ВТ22 ( $\psi_K = 16\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1190$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,5$ ); сплав ВТ23 ( $\psi_K = 23,5\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 200$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,65$ ); высоколегированный порошковый сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr ( $\psi_K = 12,7\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 904$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,7$ );

– высокопрочные сплавы, в которых специальными методами термообработки наряду с высокими значениями прочности, был достигнут и повышенный уровень пластичности: сплав Ti-15 ( $\psi_K = 37\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 270$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,95$ ); сплав Beta-21S ( $\psi_K = 23\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 541$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,75$ ); а также термоупрочненное состояние порошкового сплава Ti-10V-2Fe-3Al с дисперсным зерном ( $\psi_K = 15\%$ ,  $\sigma_{0,2} = 1\ 242$  МПа при уровне  $K_{ms} = 1,5$ ).

Высокая чувствительность механических свойств КТС к их структурному состоянию и температуре испытаний часто не дает возможности четко определить принадлежность данного сплава к



определенному виду поведения механических характеристик, откуда следует необходимость в разработке методики такого разделения. Однако подобная методика выходит за рамки настоящей работы и будет предложена в последующих материалах, касающихся проблем оптимизации свойств и оценки качества КТС.

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 2, 5 для различных уровней  $K_{ms} = \text{const}$  и полученных на основании достаточно большой выборки экспериментальных данных КТС, позволяет сделать ряд практических рекомендаций:

- значение  $K_{ms}$  как параметра, характеризующего уровень защиты металла от охрупчивания, можно поддерживать на достаточно высоком уровне ( $K_{ms} = \text{const}$ ) при различных сочетаниях значений прочности  $\sigma_{0,2}$  и пластичности  $\psi_K$ ;

- при повышении прочности металла  $\sigma_{0,2}$  с целью недопущения охрупчивания следует соблюдать условие  $K_{ms} = \text{const}$ , повышая при этом значение хрупкой прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) и/или снижая значение показателя деформационного упрочнения  $n$ , так как перечисленные характеристики связаны соотношением (1);

- при снижении прочности  $\sigma_{0,2}$  (левые ветви зависимостей  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ ) при  $K_{ms} = \text{const}$  на рисунке 2 а, в) для сохранения величины  $K_{ms}$  можно допустить снижение  $\psi_K$ , но предпочтительнее задавать повышенный уровень  $\psi_K$ , тем самым переходя к более высоким значениям  $K_{ms}$ , что обеспечивает более низкое значение критической температуры хрупко-пластического перехода  $T_c$  [9];

- в целом, полученные зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при  $K_{ms} = \text{const}$  (рис. 2)

показывают возможность получения одинакового уровня пластичности  $\psi_K$  как для сплавов низкой прочности, так и для высокопрочных КТС при сохранении их способности сопротивляться охрупчиванию, а также определяют необходимое сочетание механических свойств, при котором реализуется эта возможность. Эти соотношения между прочностью  $\sigma_{0,2}$  и пластичностью  $\psi_K$  при  $K_{ms} = \text{const}$  можно рассматривать как показатели механического качества металла;

- характеристика  $\psi_K$  не дает однозначного ответа на вопрос о свойстве охрупчиваемости металла – снижение этого свойства вызывается потерей механической стабильности  $K_{ms}$ ;

- имеет место инвариантность зависимостей  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при условии  $K_{ms} = \text{const}$  к различным сочетаниям прочностных и пластических свойств

сплавов, условиям термической обработки, а также к температуре испытаний.

Важно также констатировать, что принятый в [12] априори для КТС уровень критической степени деформации  $e_c = \psi_K \approx 2\%$ , при которой реализуется напряжение «хрупкого» разрушения («хрупкая» прочность)  $R_X$ , достигнут для этих сплавов экспериментально (рис. 2 г).

В таблице 3 приведены результаты оценки точности аппроксимации корреляционных зависимостей  $\psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$  и  $\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$ , используемых для оптимизации свойств КТС.

Из таблицы 3 видно, что точность аппроксимации зависимостей (6)–(9), при которой выборочный стандарт не превышает 3,0 % с достоверностью не ниже 0,9 в максимальном доверительном интервале  $\pm 5,0\%$ , позволяет использовать эти зависимости для дальнейших заключений и прикладных расчетов.

Таблица 3  
Оценка точности корреляционных зависимостей, используемых для оптимизации свойств КТС

№ зависимости	Зависимость	Стандарт S, %	Параметр для определения достоверности	Доверительный интервал, %	Достоверность P
(6)	$\psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$	3,00	$\psi_K^{opt.}$	5,0	0,900
(7)	$\psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$	0,99	$\psi_K^{opt.}$	3,0	0,988*
(8)	$\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$	0,98	$\psi_K^{opt.}$	3,0	0,989*
(9)	$\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$	1,17	$\psi_K^{opt.}$	3,0	0,970*

Примечание: \* – расчеты проведены с использованием статистики малых выборок и распределения Стьюдента.

Статистический анализ исследованной выборки КТС показывает, что точность всех полученных зависимостей и оценочных результатов может отличаться от соответствующих факторов предполагаемой генеральной (полной) совокупности этих сплавов на величину, не превосходящую:

$$\pm \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{500}} \approx \pm 4,47\%, \text{ где } n - \text{ количество измерений комплекса}$$

механических характеристик КТС (см. раздел 2).

В заключение следует заметить, что принцип построения обобщенной диаграммы взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КТС имеет системный характер, а точность этого построения достаточна для практического использования. Следовательно, можно говорить о том, что обобщенная диаграмма представляет собой систему взаимосвязи свойств « $\psi_K - \sigma_{0,2} - K_{ms}$ » КТС.

Подводя итоги вышеизложенному, следует заметить, что далеко не всегда повышение прочности КТС ведет к ухудшению его пластичности или повышает его склонность к охрупчиванию. Современный спектр технологических возможностей в металлургии настолько богат, что практически всегда имеется возможность реализовать увеличение пластических свойств и сопротивления охрупчиванию для качественного высокопрочного сплава. Однако, примечательно то обстоятельство, что высокая механическая стабильность  $K_{ms}$  (т. е. высокая степень сопротивления охрупчиванию металла) не обязательно сопутствует большим значениям пластичности  $\psi_K$ , т. к. эти две характеристики по-разному защищают сплав от хрупкости – механическая стабильность в общем случае напряженного состояния, а  $\psi_K$  только в условиях линейного напряженно-деформированного состояния. Отсюда следует, что введение в практику оценки конструкционных возможностей сплавов новой характеристики – механической стабильности  $K_{ms}$  не исключает, а дополняет информативность показателя пластичности сплава  $\psi_K$  в задаче обеспечения высокой силовой надежности металлических элементов конструкций. При этом вопрос о правильном и рациональном использовании этих характеристик в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность» будет рассмотрен далее.

## ВЫВОДЫ

1. Взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» конструкционных титановых сплавов (КТС) может быть количественно описана с помощью параболических уравнений регрессии  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при условии  $K_{ms} = \text{const}$ , которые, в зависимости от типа экстремума, можно разделить на два вида поведения механических характеристик. Первый вид характеризуется наличием максимумов, смысл которых заключается в определенном значении  $\sigma_{0,2}$ , при котором некоторые сплавы имеют максимальный уровень пластичности  $\psi_K^{\text{макс.}}$  при заданном значении  $K_{ms}$ . Второй вид характеризуется наличием минимумов, при

соответствующих значениях  $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K^{мин.}$  и  $K_{ms}$ . Характерной особенностью второго вида является некоторое повышение пластичности  $\psi_K$  с увеличением прочности  $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{мин.}$  при заданном уровне  $K_{ms}$ , отмеченное в диапазоне  $1,35 \leq K_{ms} \leq 2,3$ .

2. Виды поведения механических характеристик КТС имеют качественное отличие: первый вид – с повышенной, а второй со сниженной пластичностью  $\psi_K$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ . Соотношения между прочностью  $\sigma_{0,2}$  и пластичностью  $\psi_K$  при фиксированном значении механической стабильности  $K_{ms}$  можно рассматривать как показатели механического качества КТС, а оптимальные соотношения между этими характеристиками на кривых оптимизации – как показатели наивысшего механического качества металла.

3. Для КТС при определенной величине механической стабильности  $K_{ms} = 1,95$  характерно наличие качественного перехода, обусловленного изменением темпа (скорости) снижения максимального значения пластичности  $\psi_K^{макс.}$  с увеличением прочности  $\sigma_{0,2}$  в связи с согласованным падением показателя деформационного упрочнения  $n$ . Это проявление свойств металлических сплавов связано с изменением их структурного состояния и качественных показателей металла. При граничном значении  $K_{ms}$  величина оптимальной пластичности  $\psi_K^{opt.}$  для сплавов обоих видов поведения механических характеристик одинакова, при превышении величины характеристики оптимальной механической стабильности  $K_{ms}^{opt.}$  граничного значения величина  $\psi_K^{opt.}$  у сплавов 1-го вида выше, чем у сплавов 2-го вида, а в области, где  $K_{ms}^{opt.}$  ниже граничного значения, – наблюдается обратная тенденция.

4. Оптимальное сочетание свойств пластичности и механической стабильности для высокопрочных КТС 1-го вида поведения механических характеристик наблюдается в интервале изменения прочности от 1 000 МПа включительно и до 1 400 МПа, а для сплавов средней прочности 2-го вида поведения механических характеристик – в интервале от 850 МПа до 1 000 МПа.

#### Литература

1. Markovsky P. E. Ikeda Balancing of Mechanical Properties of Ti-4.5Fe-7.2Cr-3.0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment // Mater. Trans., Vol. 46, № 7. (2005). pp. 1515–1524.
2. Ivasishin O. M., Markovsky P. E., Matviychuk Yu. V., Semiatin S. L., Ward C. H., Fox S. A comparative study of the mechanical properties of high-

strength  $\beta$ -titanium alloys // *J. of Alloys and Compounds*, 457 (2008), pp. 296–309.

3. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г. С. Писаренко. – К. : Наук. думка, 1980. – 1, 2.

4. Hickey C. F. Mechanical properties of titanium and aluminum alloys at cryogenic temperatures // *Proceedings ASTM*. – 1962. – 62. – P. 765–777.

5. Spretnak J. W. et. al., Notched and unnotched tensile and fatigue properties of the engineering alloys at 25 °C and –196 °C (*ASM Transactions*: 1951, vol. 43, p. 547).

6. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988. – 1–4.

7. Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосельцева Н. И. Трещиностойкость титановых сплавов. – М. : Металлургия, 1983. – 192 с.

8. Котречко С. А. Новые подходы к оценке комплекса механических свойств конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2009. – 31, № 3. – С. 367–380.

9. Котречко С. А. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Проблемы прочности*. – 2010. – № 1. – С. 112–119.

10. Котречко С. А. Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Успехи физики металлов*. – 2009. – 10. – № 2. – С. 207–228.

11. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – К. : Наук. думка, 2008. – 295 с.

12. Ивасишин О. М. Связь характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2013. – 35, № 4. – С. 479–496.

13. Котречко С. А. Концепция механической стабильности конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // *Проблемы прочности*, 2009. – № 2. – С. 55–78.

14. Котречко С. А. Новые подходы к оценке взаимосвязи свойств прочности, пластичности и механической стабильности / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, Н. Н. Стеценко // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – 33, № 9. – С. 1277–1290.

15. Шиян А. В. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности / А. В. Шиян // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – 33, № 12. – С. 1703–1716.

16. Ивасишин О. М. Связь величины равномерной деформации с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов при одноосном растяжении / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2012. – 34, № 12. – С. 1643–1654.

17. Ивасишин О. М. Закономерности изменения показателя деформационного

- упрочнения конструкционных титановых сплавов в области неравномерной деформации / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2013. – 35, 1. – С. 129–141.
18. Ивасишин О. М. Влияние структуры на сопротивление хрупкому разрушению и запас вязкости отожженного титанового сплава ВТ16 / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, А. В. Шевченко // *Металлофизика*. 1992. – 14, № 4. – С. 70–74.
19. Ivasishin O. M. The Impact of Diffusion on Synthesis of High-Strength Titanium Alloys from Elemental Powder Blends / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakín // *Key Engineering Materials*. – 2010. – V. 436. – P. 113–121.
20. Ивасишин О. М. Микроструктура и свойства сплава Ti–10V–2Fe–3Al, синтезированного методом порошковой металлургии / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, М. В. Матвийчук, В. И. Бондарчук // *Технология легких сплавов*. – 2009. – № 2. – С. 70–76.
21. Ивасишин О. М. Вплив способу легування на мікроструктуру і властивості сплаву Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr, синтезованого методом сумішей порошкових компонентів / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, М. В. Матвийчук, О. Г. Моляр // *Наукові вісті НТУУ КПІ*. – 2009. – № 4. – С. 79–84.
22. Ivasishin O. M., Markovsky P. E., Pakharenko G. A., Shevchenko A. V. Mechanical properties of ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys at cryogenic temperatures // *Material Science & Engineering*. – 1995. – A196. – P. 65–70.
23. Кошелев П. Ф., Беляев С. Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах // М. : Машиностроение, 1967. – 315 с.
24. Belton J. H. et al., Materials for use at liquid hydrogen temperature // *ASTM Spec. Techn. Publ.* – 1960. – № 287. – P. 108.
25. Патент 97080, МПК 11, G01N, № 3/00, 3/18. Україна. Спосіб оцінки якості конструкційної сталі / Шиян А. В., Котречко С. О., Мешков Ю. Я., Стеценко Н. М. // *Промислова власність*. – 2011. – Бюл. № 24.
26. Seber G. A. F., Wild C. J. *Nonlinear Regression* // John Wiley & Sons. – 1989. – P. 332–337.

УДК 669.187.526

**Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков // Матеріалознавство та термічна обробка матеріалів : науков. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. –№ 4. – С. – – Табл. 3. – Рис. 7. – Бібліогр. : (26 назв.)**

Рассмотрен вопрос взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» конструкционных титановых сплавов. Установлено, что уравнения регрессии свойств пластичности ( $\Psi_K$ ) от прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) при условии постоянства механической стабильности  $K_{ms}$  имеют параболический вид и их можно разделить на два вида по типу экстремума – с наличием максимумов и с наличием минимумов. Проведена оптимизация свойств пластичности и прочности конструкционных титановых сплавов с различными уровнями сопротивляемости переходу в хрупкое состояние при условии постоянства механической стабильности  $K_{ms}$ . Построена обобщенная диаграмма взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» и получены уравнения, отражающие ее структуру и свойства. Установлены интервалы оптимальных сочетаний характеристик пластичности и механической стабильности для высокопрочных конструкционных титановых сплавов и сплавов средней прочности, характеризующих металл наивысшего качества. Показано, что статистическая точность анализа исследованной выборки конструкционных титановых сплавов может отличаться от их предполагаемой полной совокупности на величину, не превышающую 4,5 %.

Розглянуто питання взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність» конструкційних титанових сплавів. Встановлено, що рівняння регресії властивостей пластичності ( $\Psi_K$ ) від міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) при умові постійності механічної стабільності  $K_{ms}$  мають параболический характер і їх можна розділити на два види по типу екстремуму – з наявністю максимумів та з наявністю мінімумів. Проведено оптимізацію властивостей пластичності і міцності конструкційних титанових сплавів з різними рівнями опору окрихченню при умові постійності механічної стабільності  $K_{ms}$ . Побудовано об'єднану діаграму взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність» та отримані рівняння, що відображають її структуру та властивості. Встановлені інтервали оптимальних сполучень характеристик пластичності та механічної стабільності для високоміцних конструкційних титанових сплавів і сплавів середньої міцності, що характеризують метал найвищої якості. Показано, що статистична точність аналізу дослідженої вибірки конструкційних титанових сплавів може відрізнитись від їх передбачуваної повної сукупності на величину, що не перевищує 4,5 %.

Interrelation of strength, ductility and mechanical stability of structural titanium alloys is considered. It is ascertained that equation relating ductility ( $\psi_f$ ) and strength ( $\sigma_y$ ) at the constant mechanical stability  $K_{ms}$  are parabolic by their behavior. They may be separated by the kind of their critical points – dependences with maximum or dependences with minimum. Ductility and strength of structural titanium alloys with different value to resist embrittlement at constant mechanical stability  $K_{ms}$  were optimized. Generalized diagram “ductility – strength – mechanical stability” was built. Equations describing structure and properties were obtained. Ranges of optimal combination of ductility and mechanical stability, which characterizes the metal of the best quality, were determined for high-strength and medium-strength titanium alloys. It is exhibited that accuracy of analysis of examined population of structural titanium alloys may differ from the those for the supposed whole population by the value that doesn't exceed 4,5 %.