

УДК 669.187.526

А.В. ШИЯН, д-р техн. наук

старший научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹

E-mail: shyian_av@ukr.net

Ю.Я. МЕШКОВ, член-корр. НАН Украины, д-р техн. наук

главный научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹

E-mail: meshkov100@gmail.com

¹Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина

Поступила в редакцию 19.09.2016.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ КСУ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Характеристика ударной вязкости широко используется для тестирования металла по признаку хрупкости или охрупчивания. В настоящее время, в связи с необходимостью экономии материала, процедура определения характеристик ударной вязкости конструкционных титановых сплавов является достаточно проблематичной и затратной, что требует разработки новых способов ее прогнозирования. Целью работы является разработка методики оптимизации и расчета величины ударной вязкости КСУ титановых сплавов по данным базовых механических характеристик металла. В рамках развития концепции механической стабильности использованы методы оптимизации свойств конструкционных титановых сплавов в системе их взаимосвязи «пластичность — прочность — механическая стабильность», разделения сплавов на два вида поведения механических характеристик в этой системе и оценки механического качества металла. Установлена зависимость, при помощи которой можно прогнозировать величину ударной вязкости КСУ конструкционных титановых сплавов с использованием только базовых механических характеристик металла — условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B и относительного сужения ψ_K в момент разрушения образца, определяемых по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение. Показано, что величину КСУ конструкционного титанового сплава формируют базовые механические характеристики $\sigma_{0,2}$, σ_B , а также комплексные показатели деформационного упрочнения n и механического качества μ_{Kms}^σ с учетом вида поведения механических характеристик и определенного интервала изменения показателей $\sigma_{0,2}$, n , $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. Разработанная методика расчетного прогнозирования величины ударной вязкости КСУ позволит сэкономить время и затраты при тестировании конструкционных титановых сплавов по признаку хрупкости или охрупчивания.

Ключевые слова: ударная вязкость, механическая стабильность, охрупчивание, оптимизация механических свойств, мера механического качества

Введение. По комплексу физико-механических свойств конструкционные титановые сплавы (КТС) являются универсальными и используются в авиационной, космической и криогенной технике, а также для создания особо ответственных конструкций. При этом эффективность использования КТС и их сварных соединений в большинстве случаев можно повысить легированием, методами термической (ТО) и термомеханической обработки (ТМО).

При тестировании КТС по признаку хрупкости или охрупчивания часто используют стандартные характеристики ударной вязкости (удельной работы разрушения), которые определяют методом ударного изгиба призматических образцов с различными концентраторами напряжений (КСУ — типа Менаже, КСВ — типа Шарпи, КСТ — усталостная трещина). В настоящее время, в связи с

высокой стоимостью титана, легирующих элементов, необходимых при создании новых перспективных сплавов, и, в соответствии с этим, необходимостью экономии материала, процедура определения характеристик ударной вязкости КТС является достаточно проблематичной и затратной. В связи с этим разработка метода расчетного прогнозирования и оптимизации величины КСУ по данным базовых механических характеристик металла — условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B и относительного сужения в момент разрушения образца ψ_K , которые всегда входят в протоколы испытаний КТС на одноосное растяжение и легко определяются в любой заводской или научной лаборатории, — является весьма актуальной задачей.

Методики исследований. В работах [1, 2] показано, что свойство *механической стабильности*, как уникальная способность материала проявлять

упруго-пластическую форму поведения под действием нагрузки, можно рассматривать в качестве важнейшего механического свойства металлических материалов, имеющего не менее фундаментальное значение, чем привычные свойства прочности и пластичности. В количественной форме характеристику механической стабильности K_{ms} определяют, используя зависимость [1, 2]:

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

где R_x — хрупкая прочность — напряжение разрушения образца при предельной деформации $e_c \approx 2\%$ в состоянии перехода из пластического состояния в хрупкое при одноосном растяжении в криогенной области температур; σ_2 — текущая прочность металла на этапе деформации, равной критической $e_c \approx 2\%$; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; n — показатель деформационного упрочнения.

Проведенный в работе [1] детальный анализ сопротивляемости хрупкому разрушению КТС показал, что, в зависимости от соотношения значений величины показателя деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной, все сплавы можно разделить на две группы. Первая характеризуется практически неизменным значением n , а вторая — увеличением показателя n в области локализованной пластической деформации. При помощи полученных в [1] зависимостей для расчета характеристик хрупкой прочности R_x для КТС I-й группы:

$$R_x^I = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n \cdot \lg \bar{e}_{\text{экв}}^I} = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n \cdot (1+a \cdot n)}, \quad (2)$$

где $\bar{e}_{\text{экв}}^I = e_{\text{экв}}^I / 0,002$ — приведенное значение эквивалентной деформации для сплавов I-й группы; $a = 38,497$ — эмпирический коэффициент; показатель деформационного упрочнения $n = \lg \times \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot (1-\psi_p)} + 500 \cdot \ln(1-\psi_p) \right]$, где параметр равно-

мерной деформации $\psi_p = \psi_K \cdot \frac{1-\sigma_{0,2}/\sigma_B}{1+0,684 \cdot \psi_K - \sigma_{0,2}/\sigma_B}$

(величины ψ_K и ψ_p — в частях);

для КТС II-й группы:

$$R_x^{II} = S_B \cdot 10^{n^{II} \cdot \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II}}, \quad (3)$$

где $\lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II} = a \cdot \left(\frac{n^{II}}{n} - 1 \right)^b$; $a = \frac{A \cdot T_{\text{исп}} - B}{T_{\text{исп}} + C}$; $b = D + F \cdot T_{\text{исп}} - N \cdot T_{\text{исп}}^2$; $A = 4,680$; $B = 132,190$; $C = 132,170$; $D = 0,566$; $F = 0,749 \cdot 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$; $N = 4,410 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-2}\text{]}$ — эмпирические коэффициенты; $m = n^{II} \cdot \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II} - n$; $\bar{e}_{\text{экв}}^{II} = e_{\text{экв}}^{II} / e_p$ — приведенное значение эквивалентной деформации для сплавов II-й группы; $T_{\text{исп}}$ — температура испытаний на одноосное растяжение, [K]; истинное напряжение на пределе

прочности $S_B = \frac{\sigma_B}{1-\psi_p}$, [МПа]; истинная равномер-

ная деформация $e_p = -\ln(1-\psi_p)$; показатель деформационного упрочнения в области локальной деформации для сплавов II-й группы

$$n^{II} = \frac{\lg(S_B/\sigma_{0,2})}{\lg(e_K/e_p)} \cdot \left\{ a - \frac{b}{1 + c \cdot \left[\frac{\lg(e_K/e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \right]^d} \right\},$$

где истинная деформация в момент разрушения образца $e_K = -\ln(1-\psi_K)$, величина ψ_K — в частях; $a = 82,23 \pm 2,42$; $b = 82,156 \pm 2,41$; $c = 0,041 \pm 0,11 \cdot 10^{-2}$; $d = 1,692 \pm 0,031$ — эмпирические коэффициенты.

Таким образом, величину характеристики хрупкой прочности R_x для КТС можно определить с достаточной высокой для научно-технических целей достоверностью [1], используя для этого только значения базовых механических характеристик сплава $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_K , а величину характеристики механической стабильности K_{ms} , используя зависимость (1).

Оптимизация, т. е. поиск наилучших соотношений механических характеристик металлических сплавов, является ключевым этапом оценки их механического качества в условиях линейного напряженно-деформированного состояния (НДС) и конструкционного качества в условиях концентрации напряжений [1].

Для КТС взаимосвязь свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» была установлена в [3], а их оптимизация проведена в [1, 4–6]. В указанных работах на основе экспериментальных данных, было показано, что уравнения регрессии, описывающие зависимость пластичности (ψ_K) от прочности ($\sigma_{0,2}$) при условии постоянства механической стабильности K_{ms} , имеют параболический характер и их можно аппроксимировать параболическими функциями:

$$\psi_K = a_{1,2} \pm b_{1,2} \cdot \sigma_{0,2} \mp c_{1,2} \cdot \sigma_{0,2}^2, \quad (4)$$

где $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$ — эмпирические коэффициенты; ψ_K — в процентах, %; $\sigma_{0,2}$ — в МПа.

Проведенный анализ показал, что при этом их можно разделить на два вида поведения механических характеристик:

1) параболы, обращенные выпуклостью вверх и характеризующиеся возрастанием характеристики пластичности ψ_K с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до максимального значения (максимума) $\psi_K^{\text{макс}}$ и последующим ее убыванием при дальнейшем повышении $\sigma_{0,2}$, далее по тексту — выпуклые зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ вида 1, у которых коэффициенты в (4): $b_1 > 0$; $c_1 < 0$;

2) параболы, обращенные вогнутостью вверх и, наоборот, характеризующиеся убыванием характеристики пластичности ψ_K с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до минимального значения (минимума) $\psi_K^{\text{макс}}$ и последующим ее возрастанием при даль-

нейшем повышении $\sigma_{0,2}$, далее по тексту – вогнутые зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ вида 2, у которых коэффициенты в (4): $b_2 < 0$; $c_2 > 0$.

При этом в [1] было установлено, что принадлежность к определенному виду поведения механических характеристик сплава оказывает решающее влияние на его склонность к охрупчиванию под действием различных охрупчивающих факторов (низкие температуры, концентраторы напряжений, динамика нагружения и т. п.).

На основе системы оптимизации свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КТС в работах [1, 7] было показано, что отношение величины механической стабильности выбранного сплава K_{ms} к ее оптимальному (наилучшему) значению $K_{ms}^{\text{опт.}}$ может быть использовано в виде меры механического качества металла $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, отражающей сравнительную способность металла сопротивляться охрупчиванию при одноосном растяжении:

$$\mu_{K_{ms}}^\sigma = K_{ms} / K_{ms}^{\text{опт.}}, \quad (5)$$

где $K_{ms}^{\text{опт.}}$ – оптимальное (наивысшее) значение механической стабильности КТС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ на кривой оптимизации [1, 7]. В [1] были получены зависимости $K_{ms}^{\text{опт.}} = f(\sigma_{0,2})$ для обоих видов поведения механических характеристик КТС:

- для КТС 1-го вида (зависимость откорректирована авторами):

$$K_{ms}^{\text{опт.}} = a - b \cdot \ln \left[\left(\frac{c - d \cdot \sigma_{0,2}}{e - k \cdot \sigma_{0,2}} \right)^m - 1 \right], \quad (6)$$

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

- для КТС 2-го вида:

$$K_{ms}^{\text{опт.}} = a - b \cdot \sigma_{0,2}, \quad (7)$$

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

Величина показателя механического качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ в части отражения сопротивления металла охрупчиванию не является неизменным признаком качества, присущим сплаву с данной структурой, а всецело зависит от внешних условий испытания – температуры, динамики нагружения и др., т. е. от всех факторов, влияющих на его прочность $\sigma_{0,2}$, а, следовательно, на показатели как его механической стабильности K_{ms} , так и ее оптимального значения $K_{ms}^{\text{опт.}}$. Поэтому величина $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ отображает исключительно реальное состояние сплава, проявляющего заведомо обозначенный уровень его прочности $\sigma_{0,2}$.

Таким образом, разработанные в [1, 3–7] принципы оптимизации механических свойств и оценки механического качества конструкционных сплавов на основе концепции механической ста-

бильности, могут найти свое применение при решении важной практической задачи – разработки методики оптимизации и расчетного определения величины ударной вязкости КСУ титановых сплавов по данным базовых механических характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_K . При этом, не менее важным научным приобретением должно быть установление набора ключевых характеристик, взаимосвязь которых формирует величину ударной вязкости.

Материалы. С целью разработки способа прогнозирования величины ударной вязкости КСУ для сплава ВТ22 после серии разных режимов его термической обработки (ТО) использовали данные собственных экспериментов и исходные данные, предоставленные для анализа коллегами из отдела «Физики прочности и пластичности негетерогенных сплавов» Института металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. С использованием этих данных проводили также промежуточные исследования по определению режима ТО, который обеспечивает наивысшее механическое качество сплава ВТ22, а также прогнозированию оптимальной (наилучшей) величины ударной вязкости ($K_{CU}^{\text{опт.}}$) и соответствующих значений оптимизированных базовых характеристик для такой серии режимов ТО указанного сплава. К анализу были также привлечены исходные данные, полученные из литературных источников для пяти типов КТС (сварных швов), находящихся в разных структурных состояниях и сформированных в результате использования специальных режимов ТО, ТМО или сварки (таблица 1).

Результаты исследований. Анализ данных, приведенных в таблице 1, привел к установлению зависимостей $K_{CU} = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ и $K_{CU} = f(K_{ms})$, которые имеют линейный характер для всех исследованных групп КТС по признаку типа сплава с достаточно высоким коэффициентом корреляции R : для зависимостей $K_{CU} = f(\mu_{K_{ms}}^\sigma)$ $R \geq 0,89$, а для $K_{CU} = f(K_{ms})$ $R \geq 0,84$ (рисунок 1).

С целью поиска оптимальной величины ударной вязкости $K_{CU}^{\text{опт.}}$ использовали критерий $\mu_{K_{ms}}^\sigma = 1$ [7]. Определенной таким способом на примере сплава ВТ22 (№ 1–4 в таблице 1) величине $K_{CU}^{\text{опт.}} = 35$ Дж/см² (см. рисунок 1 а) соответствует оптимальное значение механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт.}} = 2,64$, характерное для такого перспективного сплава этой серии (см. рисунок 1 б). Это позволяет рассчитать величины других базовых механических характеристик для каждого вида их поведения оптимизированного сплава ВТ22, которые согласно [1, 3] должны составлять:

- в случае его принадлежности к 1-му виду поведения механических характеристик: оптимальная пластичность $\psi_K^{\text{опт.}} = 68$ % при прочности $\sigma_{0,2} = 990$ МПа;
- в случае его принадлежности ко 2-му виду поведения механических характеристик: оптимальная пластичность $\psi_K^{\text{опт.}} = 53$ % при прочности $\sigma_{0,2} = 970$ МПа.

Таблица 1 — Данные базовых механических характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K и комплексных параметров n , K_{ms} , $\mu_{K_{ms}}^\sigma$, KCU при 293 К

№ п/п	КТС	Обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	n	K_{ms}	$\mu_{K_{ms}}^\sigma$	KCU, Дж/см ²
1	BT22 ¹	3 920 °C + ОП 550 °C	1295	1370	10,0	0,033	1,22	0,55	11,0
2		3 920 °C	820	825	55,0	0,018	2,16	0,86	27,0
3		3 820 °C + ОП 550 °C	1275	1370	10,0	0,038	1,32	0,59	14,0
4		3 820 °C + ОП 650 °C	1000	1065	30,0	0,038	1,81	0,76	22,0
5	BT22 [8]	$T_{\text{д.}} = 1123 \text{ К}; 1023 \text{ К}, 1 \text{ ч}$	1230	1260	48,0	0,020	1,97	0,97	30,0
6		$T_{\text{д.}} = 1123 \text{ К}; 848 \text{ К}, 8 \text{ ч}$	1270	1310	20,0	0,023	1,60	0,81	27,0
7		$T_{\text{д.}} = 1323 \text{ К}; 848 \text{ К}, 8 \text{ ч}$	1270	1310	10,6	0,023	1,40	0,71	20,0
8		0 % ² ; ОЖ 1233 К, 1 ч	1280	1295	3,3	0,013	1,02	0,52	10,0
9		20 % ² ; $T_{\text{д.}} = 1223 \text{ К}; 1023 \text{ К}, 1 \text{ ч} + 848 \text{ К}, 8 \text{ ч}$	1270	1300	13,0	0,019	1,48	0,75	20,0
10		40 % ² ; та же	1270	1310	20,0	0,023	1,60	0,81	27,0
11		60 % ² ; та же	1270	1305	28,5	0,022	1,73	0,87	34,0
12	ТЛЗ [9]	Литая лопатка $t = 60 \text{ мм}$	490	568	31,1	0,067	1,48	0,47	85,5
13		та же $t = 100 \text{ мм}$	478	555	32,0	0,067	1,49	0,47	90,0
14		та же $t = 80 \text{ мм}$	474	560	28,5	0,072	1,57	0,49	91,0
15		та же $t = 240 \text{ мм}$	508	585	29,5	0,064	1,44	0,46	85,2
16		Литые образцы	608	642	29,5	0,034	1,78	0,63	100,0
17	BT5Л [9]	Литое состояние	735	796	15,5	0,042	1,17	0,42	55,0
18		ТВО	863	910	32,3	0,034	1,83	0,70	60,0
19	BT6Л [9]	Литое состояние	870	940	18,0	0,041	1,17	0,45	46,0
20		ТВО; 0,9 % Н	1080	1130	16,0	0,029	1,51	0,67	42,0
21		ТВО; 0,6 % Н	1030	1090	25,0	0,035	1,70	0,72	55,0
22	BT20 [10]	Основной металл	840	1016	22,0	0,076	1,67	0,63	54,0
23		МШ (верх шва)	716	824	40,0	0,066	2,21	0,84	90,0
24		МШ (середина шва)	738	815	42,0	0,052	2,14	0,82	91,0
25		МШ (низ шва)	758	842	41,0	0,054	2,13	0,83	89,0

Примечания: 1 — результаты собственных экспериментов (режимы ТО и значения KCU — предоставлены отделом «Физики прочности и пластичности неомогенных сплавов» ИМФ НАН Украины); 2 — деформация из β -области; $T_{\text{д.}}$ — температура деформации; t — толщина; МШ — металл сварного шва; 3 — закалка; ОП — отпуск; ОЖ — отжиг; ТВО — термоводородная обработка

Разумеется, что аналогичным способом можно сформировать оптимальный комплекс показателей механических характеристик и для любой другой группы серийных обработок КСТ.

Из рисунка 1 а следует общая зависимость для определения параметра KCU:

$$KCU = KCU^{\text{опт.}} - \text{tg}\alpha \cdot (1 - \mu_{K_{ms}}^\sigma), \quad (8)$$

где показатель $\text{tg}\alpha$ отображает интенсивность изменения ударной вязкости KCU сплава с изменением его механического качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$.

Дальнейший поиск связи величины ударной вязкости KCU с базовыми механическими характеристиками металла привел к установлению зависимостей следующего вида: $KCU^{\text{опт.}} \cdot S = f(n \cdot 10^3)$ и $\text{tg}\alpha \cdot S = f(n \cdot 10^3)$, где параметр $S = \sigma_{0,2} / \sigma_B$ (рисунок 2).

Из зависимости $KCU^{\text{опт.}} \cdot S = f(n \cdot 10^3)$ на рисунке 2 а следует:

$$KCU^{\text{опт.}} = S^{-1} \cdot (c - d \cdot n), \quad (9)$$

а из зависимости $\text{tg}\alpha \cdot S = f(n \cdot 10^3)$ на рисунке 2 б:

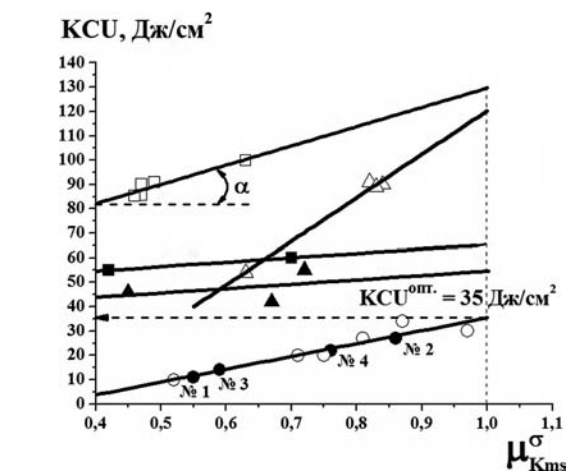
$$\text{tg}\alpha = S^{-1} \cdot (a - b \cdot n). \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в (8), получаем конечную зависимость для расчета величины ударной вязкости KCU:

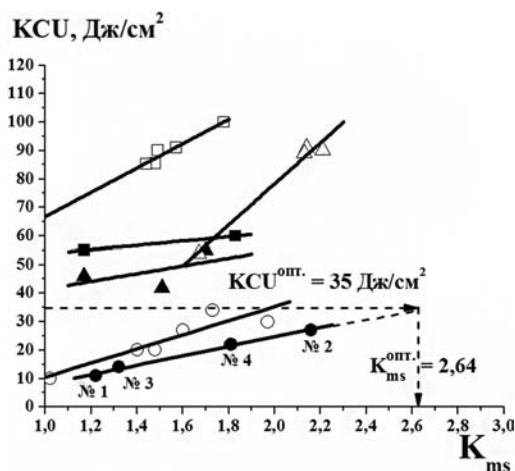
$$KCU = (\sigma_B / \sigma_{0,2}) \cdot [a - b \cdot n - (c - d \cdot n) \cdot (1 - \mu_{K_{ms}}^\sigma)], \quad (11)$$

где a , b , c , d — эмпирические коэффициенты, зависящие от интервалов изменения показателей $\sigma_{0,2}$, n , S , значения которых для исследованных КТС приведены в таблице 2.

Комплексные параметры, которые входят в (11): показатель деформационного упрочнения $n = f(\sigma_{0,2}, \sigma_B, \psi_p)$, см. (2), где характеристика относительного равномерного сужения образца $\psi_p = f(\sigma_{0,2}, \sigma_B, \psi_K)$, см. (2); мера механического качества



а



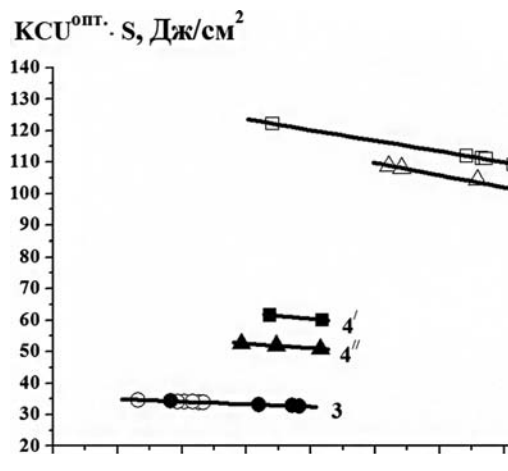
б

Рисунок 1 — Зависимости ударной вязкости KCU от:

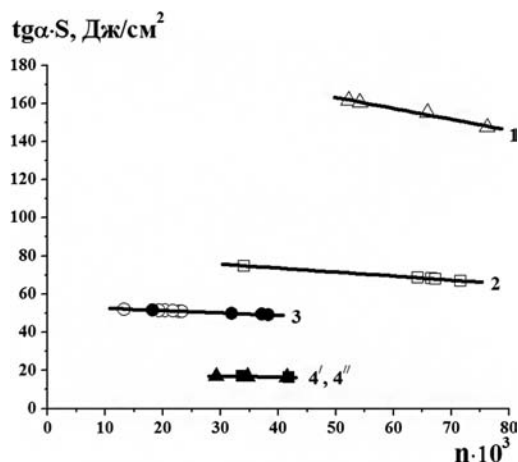
а — меры механического качества $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$; б — механической стабильности K_{ms} ; № 1–4 — номера ТО сплава ВТ22 в таблице 1 (экспериментальные данные сплавов: □ — ТЛ3; Δ — ВТ20; ■ — ВТ5Л; ▲ — ВТ6Л; ● — ВТ22 (собственный эксперимент); ○ — ВТ22 [8]; $K_{ms}^{opt.}$, $K_{ms}^{opt.}$ — оптимальные значения показателей ударной вязкости и механической стабильности)

металла $\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = f(K_{ms}^{\sigma}, K_{ms}^{opt.})$ и вида сплава), где характеристики механической стабильности K_{ms} , $K_{ms}^{opt.}$ и видовая принадлежность конструкционного сплава также определяются через его базовые механические характеристики $\sigma_{0.2}$, σ_B и ψ_K , см. (1)–(3), (5)–(7) [1].

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований можно сделать важный научный вывод о том, что величина ударной вязкости



а



б

Рисунок 2 — Зависимости показателя деформационного упрочнения n от: а — параметра $KCU^{opt.} \cdot S$; б — параметра $tg\alpha \cdot S$ (экспериментальные данные сплавов: □ — ТЛ3; Δ — ВТ20; ■ — ВТ5Л; ▲ — ВТ6Л; ● — ВТ22 (собственный эксперимент); ○ — ВТ22 [8]; кривые 1–4 соответствуют интервалам изменения показателей $\sigma_{0.2}$, n , S в таблице 2)

металла в общем случае формируется величинами базовых механических характеристик $\sigma_{0.2}$, σ_B и ψ_K путем их сложной взаимосвязи через комплексные параметры n и $K_{ms}^{opt.}$ с учетом вида их поведения (1-го или 2-го) и определенного интервала изменения показателей $\sigma_{0.2}$, n , $\sigma_{0.2}/\sigma_B = S$.

Статистический анализ результатов определения величин ударной вязкости KCU исследованных КСТ с использованием зависимости (11) показал, что точность, при которой абсолютное отклонение

Таблица 2 — Интервалы изменения показателей $\sigma_{0.2}$, n , S для исследованных КТС и соответствующие значения эмпирических коэффициентов a , b , c , d в (9), (10) и (11)

№ кривой на рисунке 2	Интервалы изменения показателей			a , Дж/см ²	b , Дж/см ²	c , Дж/см ²	d , Дж/см ²
	$\sigma_{0.2}$, МПа	n	$S = \sigma_{0.2}/\sigma_B$	(9), (11)	(9), (11)	(10), (11)	(10), (11)
1	715–840	0,052–0,076	0,83–0,91	129,01	385,91	191,88	573,93
2	475–610	0,034–0,072	0,85–0,95	133,80	340,0	82,18	208,70
3	820–1280	0,013–0,038	0,93–0,99	35,78	81,31	53,97	122,50
4'	735–860	0,034–0,042	0,92–0,95	68,32	198,53	18,34	45,0
4''	870–1080	0,029–0,041	0,93–0,96	56,64	137,31		

Δ расчетных значений $KCU_{расч.}$ от экспериментальных $KCU_{эксп.}$ не превышает ± 5 Дж/см², достаточна для практического использования разработанной методики, а это позволит сэкономить время и затраты при оценке ударной вязкости титановых сплавов.

Дополнительно следует отметить, что в случае, если значения показателей $\sigma_{0,2}$, n и $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$ выходят за пределы интервалов, указанных в таблице 2, необходимо провести калибровочные испытания не менее двух серийных партий образцов сплавов одного типа, у которых значения KCU будут существенно различаться (например, вследствие использования разных режимов ТО или изменения температур испытаний), после чего необходимо провести аналогичные операции, которые приведут к определению коэффициентов a, b, c, d в (11).

В заключение этого исследования, важно также отметить, что установленная связь характеристики KCU с мерой механического качества металла $\mu_{K_{ms}}^\sigma$, которая имеет достаточно высокую корреляцию ($R \geq 0,89$), принципиально доказывает корректность использования показателей ударной вязкости в многолетней практике тестирования и ранжировки конструкционных сплавов по их склонности к хрупкости или охрупчиванию, однако для достоверности такой оценки необходимо также учитывать влияние на величину KCU других параметров, входящих в зависимость (11).

Таким образом, разработанная методика расчетного прогнозирования величины ударной вязкости KCU конструкционных титановых сплавов с использованием только базовых механических характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K позволит сэкономить время и затраты при их тестировании по признаку хрупкости или охрупчивания. При этом, логика и последовательность операций для прогнозирования величин ударной вязкости по результатам испытаний стандартных образцов КТС или других конструкционных сплавов (например, сталей), в том числе с другими концентраторами напряжений (KCV — по Шарпи или КСТ — усталостная трещина), может быть аналогичной.

Выводы. 1. На формирование величины ударной вязкости KCU конструкционных титановых сплавов имеют влияние значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B , показателей деформационного упрочнения n и механического качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$, а также вид поведения механических характеристик и определенный интервал изменения показателей $\sigma_{0,2}$, n , $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$.

2. Возможность определения оптимального (наилучшего) значения ударной вязкости $KCU_{опт.}$ для любой группы серийных обработок конструкционных титановых сплавов с использованием предлагаемой методики позволяет рассчитать оптимальные величины других механических характеристик ($\sigma_{0,2}$, $K_{ms}^{опт.}$, $\psi_K^{опт.}$), которые формируют величину $KCU_{опт.}$ такого перспективного сплава в зависимости от его видовой принадлежности.

3. Методика экспресс-оценки величины ударной вязкости KCU с использованием базовых механических характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) металла позволит сэкономить время и затраты при тестировании конструкционных титановых сплавов по признаку хрупкости или охрупчивания.

4. При создании моделей для прогнозирования величин ударной вязкости KCV или КСТ конструкционных сплавов логика и последовательность операций могут быть аналогичными.

Список условных обозначений:

КТС — конструкционные титановые сплавы;
ТО — термическая обработка;
ТМО — термомеханическая обработка;
ударная вязкость (удельная работа разрушения) образцов с концентраторами:
 KCU — типа Менаже, KCV — типа Шарпи, КСТ — усталостная трещина;
 T_d — температура деформации;
 t — толщина;
МШ — металл сварного шва;
З — закалка;
ОП — отпуск;
ОЖ — отжиг;
ТВО — термоводородная обработка.

Список литературы

1. Мешков, Ю.Я. Механическая стабильность металлов и сплавов / Ю.Я. Мешков, С.А. Котречко, А.В. Шиян. — Киев: Наук. думка, 2014. — 278 с.
2. Мешков, Ю.Я. Проблема хрупкости конструкций / Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 1(30). — С. 30–36.
3. Шиян А.В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2014. — № 4. — С. 54–75.
4. Оптимизация свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / О.М. Ивасишин // В сб. науч. трудов МК «Тi-2013 в СНГ». — Донецк: Изд-во ИМФ НАН Украины, МА «Титан», 2013. — С. 297–306.
5. Пат. 103814, МПК 13, G01N, № 3/00, 3/18. Украина. Способ определения оптимального соотношения пластичности, прочности и механической стабильности конструкционных металлических сплавов / О.М. Ивасишин, П.Е. Марковский, Ю.В. Матвийчук, С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян, Н.Н. Стеценко // Промышленная собственность. — 2013. — Бюл. № 22.
6. Шиян, А.В. Влияние структуры титановых сплавов на взаимосвязь характеристик их пластичности, прочности и механической стабильности / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков, Д.Г. Саввакин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 4(33). — С. 70–75.
7. Шиян, А.В. Оценка механического качества конструкционных титановых сплавов по их способности сопротивляться охрупчиванию при одноосном растяжении / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2015. — № 1. — С. 5–26.
8. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пос. в 4-х т. / под ред. В.В. Панасюка. — Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. — К.: Наук. думка, 1988. — 436 с.
9. Ильин, А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справ. / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. — М.: ВИЛС — МАТИ, 2009. — 520 с.

10. Ахонин, С.В. Сварка в узкий зазор соединений толщиной 110 мм из титанового сплава VT20 / С.В. Ахонин, В.Ю. Белоус // Сб. науч. тр. междунар. конф. «Титан-2011 в

СНГ». — Львов: Изд-во ИМФ НАН Украины, МА «Титан», 2011. — С. 338–342.

SHYIAN Artur V., D. Sc. in Eng.

Senior Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture¹

E-mail: shyian_av@ukr.net

MESHKOV Yuriy Ya., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, D. Sc. in Eng.

Chief Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture¹

E-mail: meshkov100@gmail.com

¹Kurdyumov Institute of Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 19 September 2016.

PREDICTION VALUES TOUGHNESS KCU STRUCTURAL TITANIUM ALLOYS

Toughness characteristic is widely used for testing on the basis of metal brittleness or embrittlement. Currently, due to the need to save material, the procedure for determining the toughness of the structural characteristics of titanium alloys is quite problematic and costly, requiring the development of new ways to predict. The purpose is to develop methods of optimization and calculation of the value of toughness KCU titanium alloys according to the basic mechanical characteristics of the metal. Within the concept of the mechanical stability of optimization methods used structural properties of titanium alloys in the system of the relationship “plasticity — strength — mechanical stability” alloys separating into two kinds of behavior of the mechanical characteristics of the mechanical system and evaluation of metal quality. The dependence, with which we can predict the value of toughness KCU structural titanium alloys using only basic mechanical characteristics of the metal—proof stress $\sigma_{0.2}$, tensile strength σ_s and the percentage reduction ψ at the time of the destruction of the sample, determined by the results of tests on the quasi-static uniaxial stretching. It is shown that the amount of KCU structural titanium alloy forming the basic mechanical properties $\sigma_{0.2}$, σ_s , as well as comprehensive indicators of strain hardening n and mechanical quality $\mu_{K_{ms}}$ for the kind of behavior of mechanical characteristics and a certain interval changes $\sigma_{0.2}$, n , $\sigma_{0.2}/\sigma_s$. The developed method of settlement prediction KCU toughness values will save time and costs for testing structural titanium alloys on the basis of brittleness or embrittlement.

Keywords: toughness, mechanical stability, the embrittlement, the optimization of the mechanical properties, mechanical quality measure

References

- Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyani A.V. *Mekhanicheskaya stabilnost metallov i spлавov* [The mechanical stability of metals and alloys]. Kiev, Naykova Dumka, 2014. 278 p.
- Meshkov Yu.Ya., Shiyani A.V. Problema khrupkosti konstruktsiy [The problem of the fragility of structures]. *Mechanica machin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, tools and materials], 2015, no 1(30), pp. 30–36.
- Shiyani A.V., Meshkov Yu.Ya. Vzaimosvyaz svoystv prochnosti, plastichnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh titanovykh spлавov [Properties correlation of strength, ductility, and mechanical stability of the structural titanium alloys]. *Metallorazvedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2014, no. 4, pp. 54–75.
- Ivasishin O.M., Markowski P.E., Savvakini D.G., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyani A.V. Optimizatsiya svoystv prochnosti, plastichnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh titanovykh spлавov [Optimization of properties of strength, ductility, and mechanical stability of the structural titanium alloys]. *Trudy Mezhdunarodnoy Konferentsii “Ti-2013 v SNG”* [Proc. of the International Conference “Ti-2013 in CIS”]. Donetsk, Ukraine, 2013, pp. 297–306.
- Ivasishin O.M. [et al.] *Sposob opredeleniya optimalnogo sootnosheniya plastichnosti, prochnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh metallicheskih spлавov* [A method of determining the optimal ratio of ductility, strength and mechanical stability of the structural metal alloys]. Patent UK, no. 103814, 2013.
- Shiyani A.V., Meshkov Yu.Ya., Savvakini D.G. Vliyaniye struktury titanovykh spлавov na vzaimosvyaz kharakteristik ih plastichnosti, prochnosti i mekhanicheskoy stabilnosti [Effect of structure of titanium alloys on the relationship characteristics of their ductility, toughness and mechanical stability]. *Mechanica machin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no 4(33), pp. 70–75.
- Shiyani A.V., Meshkov Yu.Ya. Otsenka mekhanicheskogo kachestva konstruktsionnykh titanovykh spлавov po ih sposobnosti soprotivlyatsya ohrupchivaniyu pri odnoosnom rastyazhenii [Evaluation of mechanical properties of structural titanium alloys for their ability to resist embrittlement in uniaxial tension]. *Metalovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2015, no. 1, pp. 5–26.
- Mechanika razrusheniya i prochnost materialov. Spravochnoe posobie [Fracture mechanics and strength of materials. A Reference guide]. Vol. 3: *Kharakteristiki kratkovremennoy treshinostoykosti materialov i metody ih opredeleniya* [Characteristics of short-term fracture toughness of materials and methods of their determination]. Kiev, Naykova Dumka, 1988. 436 p.
- Ilyin A.A., Kolachov B.A., Polkin I.S. *Titanovye spлавy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys. The composition, structure and properties. Directory]. Moscow, VILS-MATI, 2009. 520 p.
- Akhonin S.V., Belous V. Yu. Svarka v uzkiy zazor soedineniy tolshchiny 110 mm iz titanovogo spлавa VT20 [Welding into narrow gap joints thickness of 110 mm of titanium alloy VT20]. *Trudy Mezhdunarodnoy Konferentsii “Ti-2011 v SNG”* [Proc. of the International Conference “Ti-2011 in CIS”]. Lvov, Ukraine, 2011, pp. 338–342.