

УДК 669.187.526

**ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПО ИХ СПОСОБНОСТИ
СОПРОТИВЛЯТЬСЯ ОХРУПЧИВАНИЮ ПРИ ОДНООСНОМ
РАСТЯЖЕНИИ**

А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, д. т. н., проф.

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

Состояние вопроса

Титановые сплавы, обладающие уникальным сочетанием свойств высокой прочности, малой плотности и коррозионной стойкости, являются весьма привлекательными материалами для широкого использования в машиностроении, медицине, химической промышленности. Конструкционные титановые сплавы (КТС) применяются для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях значительных нагрузок, в авиации, автомобиле- и судостроении, для получения ортопедических и зубных имплантатов в медицине. Такие условия применения КТС выдвигают жесткие требования к комплексу их механических характеристик и их стабильности в условиях длительной эксплуатации, а ранжировка сплавов на качественном уровне является практической задачей, актуальность которой имеет первостепенное значение в связи с глобальной тенденцией к повышению прочности конструкционных материалов, что сопряжено с риском их охрупчивания.

В существующей методологии оценки качества металлических сплавов [1; 2] определяются характеристики, лишь косвенно отражающие степень удаленности металла от «хрупкого» состояния при соответствующем виде испытания: ψ_K , δ_K (δ_5 , δ_{10}) – относительное сужение и относительное удлинение после разрушения образца, определяемые при испытании стандартных образцов на одноосное статическое растяжение [3–5], ударная вязкость (KCV – удельная работа разрушения с надрезом Шарпи, KCU – с надрезом Менаже), определяемая при динамических (ударных) испытаниях [6–8], а также вязкость разрушения K_{IC} , K_{JC} , определяемая при испытаниях на статическую трещиностойкость [8; 9]. Но характеристики пластичности ψ_K и ударной вязкости KCV (KCU) не дают однозначного ответа на вопрос об охрупчиваемости металла в изделии [10; 11], а характеристики трещиностойкости K_{IC} (K_{JC}) являются частным случаем отклика нагруженного металла на содержащийся в нем дефект в виде определенного типа трещины и не отражают степени угрозы хрупкости [12; 13].

Альтернативой вышеупомянутым характеристикам является предложенная в работах [12–14] характеристика механической стабильности K_{ms} , которая представляет собой количественную меру особого механического свойства металла – способности устойчиво сохранять упруго-пластическое состояние при нагружении. Согласно [12; 13], показатель K_{ms} характеризует силовой интервал между двумя уровнями предельной

прочности металла: σ_2 – прочностью пластичного металла при критической степени деформации e_C , равной 2 %, и хрупкой прочностью металла R_X (или для сталей – R_{MC}). Характеристика механической стабильности K_{ms} металла является базовой в условиях одноосного растяжения и для конструкционных, в том числе титановых, сплавов определяется согласно зависимости [2; 12; 13]:

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

где: $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; n – показатель деформационного упрочнения.

Существующая в настоящее время методология классификации КТС по качественным признакам [15–17] является весьма общей и в полной мере не отражает их склонности к охрупчиванию.

Согласно [15–17], КТС группируются по способу изготовления, уровню прочности и целевому назначению. Анализ таких общепринятых принципов классификации КТС в рамках концепции механической стабильности позволяет обозначить условные интервалы изменения показателей прочности $\sigma_{0,2}$, а соответствующие им диапазоны изменения механической стабильности K_{ms} определить при комнатной температуре испытаний согласно данным работы [2] (табл. 1).

Условная классификация КТС по качеству осуществляется только для катаных прутков согласно [18]. При этом сплавы разделяются на два вида – обычного (без маркировки) и повышенного качества (маркировка буквой «П»), а признаками, разделяющими их по качеству, служат повышенный уровень пластичности ψ_K (или δ_K) при заданном значении предела прочности σ_B и более широкий (в сторону увеличения) диапазон значений σ_B для КТС повышенного качества.

Из вышеизложенного можно сделать заключение, что главным недостатком общепринятых классификационных признаков и характеристик является отсутствие количественной оценки важнейшего свойства металла, обеспечивающего его эксплуатационную надежность в конструкции, – сопротивления охрупчиванию. Поэтому анализ конструкционных материалов с позиции оценки их качества должен быть в большей степени детализирован, иметь количественную оценку и проводиться на основе показателя, непосредственно отражающего степень их сопротивления охрупчиванию под воздействием различных внешних факторов, т. е. характеристики механической стабильности K_{ms} .

Таблица 1

Соответствие общепринятой классификации КТС интервалам изменения характеристик прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms}

при $T_{исп.} = 293 \text{ К}$

Способ изготовления сплавов	Уровень $\sigma_{0,2}$, МПа*	Уровень K_{ms} **	Целевое назначение, другие признаки
Литье/деформация [15]	≤ 600	$\geq 2,7$	Листы (холодная штамповка) с повышенной пластичностью
	> 600 ≤ 1000	$< 2,7$ $\geq 1,15$	Листы (штамповка с подогревом) с удовлетворительной технологической пластичностью
	> 1000	$< 2,5$	Высокопрочное состояние после термообработки
	~ 1000 *** > 1200 ****	$1,15-2,5$ $< 2,3$	Состояние с повышенной прочностью при $400-600 \text{ }^\circ\text{C}$; штамповки
Литье [15]	> 700	$< 2,7$	Литые α -сплавы, псевдо- α -сплавы, двухфазные
	~ 1000	$1,15-2,5$	Отливки простой конфигурации
	≥ 850 ≤ 950	$< 2,7$ $\geq 1,15$	Фасонное литье
Порошковая металлургия [16; 17]	≥ 970 ≤ 1170	$< 1,22$	Сплавы средней прочности и высокопрочные
	≥ 790 ≤ 1010	$\geq 1,5$	Сплавы низкой и средней прочности
Примечание: * – условные границы в соответствии с данными [15–17]; ** – условные границы в соответствии с данными [2]; *** – в отожженном состоянии; **** – после упрочняющей термообработки.			

Разработанная в [19] методика определения характеристик хрупкой прочности R_X и механической стабильности K_{ms} для широкого круга КТС, а также установленная в [2] система взаимосвязи комплекса базовых механических свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» этих сплавов, не только позволили осуществлять прогнозирование степени сопротивляемости металла охрупчиванию, но и создали предпосылки для количественной интерпретации категории качества металла на основе статистически достоверного банка данных этих свойств.

Первичная оценка качества КТС осуществляется путем испытаний в условиях одноосного статического растяжения, а ключевым этапом в этой процедуре является оптимизация, т. е. поиск наилучших сочетаний их базовых механических характеристик.

В работе [2] были установлены закономерности согласованного изменения характеристик прочности ($\sigma_{0,2}$) и пластичности (ψ_K) КТС при условии постоянства уровня механической стабильности ($K_{ms} = \text{const}$), проведена оптимизация комплекса этих свойств и построены *кривые оптимизации* для системы их взаимосвязи.

Смысл таких кривых оптимизации заключается в том, что они характеризуют оптимальное (наилучшее) сочетание характеристик пластичности $\psi_K^{\text{opt.}}$ и механической стабильности $K_{ms}^{\text{opt.}}$ КТС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Таким образом, анализ результатов, полученных в [2], показал, что отношения характеристик пластичности ψ_K и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям $\psi_K^{\text{opt.}}$ и $K_{ms}^{\text{opt.}}$ на кривых оптимизации при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества КТС.

При этом сочетание характеристик $\psi_K^{\text{opt.}}$ и $K_{ms}^{\text{opt.}}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ характеризует наивысшее качество металла и дает возможность в инженерной практике выбрать или заказать такой сплав, который по своим свойствам наиболее близок к оптимальным значениям указанных механических характеристик.

Исходя из вышеизложенного, предлагаемая методология оценки механического качества КТС содержит два вида оценок: 1) по степени оптимальности механических свойств; 2) по мере сопротивления охрупчиванию под действием концентраторов напряжений.

В рамках настоящей работы авторами будет представлена методика первичной оценки механического качества КТС с использованием критерия механической стабильности K_{ms} в условиях одноосного растяжения, а развитие этой классификации для оценки служебной надежности сплавов в условиях концентрации напряжений представляет задачу дальнейших исследований.

Таким образом, **целью настоящей работы** является разработка метода оценки механического качества конструкционных титановых сплавов по степени близости значений их пластичности ψ_K и механической стабильности K_{ms} к оптимальному сочетанию этих свойств в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность» при заданной прочности $\sigma_{0,2}$.

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 [3; 4; 20–24], а также справочные и литературные данные из других источников [5; 6; 8; 25; 26] с целью получения информации о значениях базовых механических характеристик КТС в диапазоне температур от 77 К до 293 К, в том числе механической стабильности с использованием методики [19]. 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 структурных состояний КТС.

Оценка механического качества КТС при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$

В работе [2] было установлено, что взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» 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 различных вида поведения механических характеристик этих сплавов – 1-й с повышенной (выпуклые параболы) и 2-й со сниженной (вогнутые параболы) пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 1).

Вопрос о причинах такого разделения КТС на виды поведения механических характеристик, в основе которых, по-видимому, лежит изменение показателя деформационного упрочнения сплава в связи с изменением его структурного и/или механического состояния, выходит за рамки настоящей работы и будет рассмотрен далее.

Впервые метод оценки категории качества как количественной меры близости к оптимальным значениям свойств пластичности ψ_K^{opt} и механической стабильности K_{ms}^{opt} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая

стабильность» был описан в работе [1] для конструкционных сталей. Принцип такой оценки механического качества аналогичен для КТС независимо от вида поведения их механических характеристик. Схематически метод показан для КТС 1-го вида поведения механических характеристик на рисунке 2, где точкой «а» обозначены оптимальные значения свойств механической стабильности $K_{ms}^{onm.}$ и пластичности $\Psi_K^{onm.}$ на кривой оптимизации 1 (рис. 1, 2), а точкой «а*» – фактические значения этих свойств (K_{ms}, Ψ_K) у выбранного сплава при заданном значении прочности (в случае выбранного сплава $\sigma_{0,2} = 1302$ МПа, рис. 2).

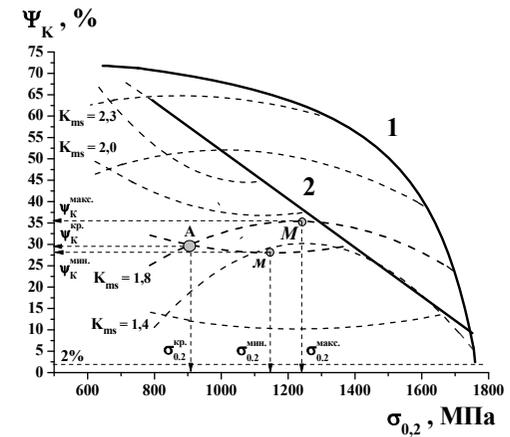


Рис. 1. Зависимости пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ для двух видов поведения механических характеристик КТС: 1-го – кривая оптимизации 1; 2-го – кривая оптимизации 2; штриховые изолинии – при некоторых фиксированных уровнях механической стабильности K_{ms} для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик соответственно; «А» – точка пересечения зависимостей 1-го (выпуклая парабола) и 2-го (вогнутая парабола) видов поведения механических характеристик; максимальные $\Psi_K^{max.}$, $\sigma_{0,2}^{max.}$ и минимальные $\Psi_K^{min.}$, $\sigma_{0,2}^{min.}$ значения пластичности и прочности в точках экстремумов зависимостей $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (соответственно, точки «М» и «М*»); $\sigma_{0,2}^{kp.}$, $\Psi_K^{kp.}$ – критические значения прочности и пластичности в точке «А»

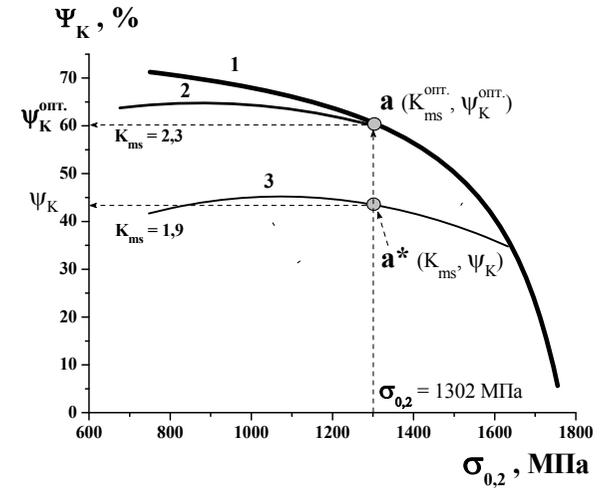


Рис. 2. Зависимости для 1-го вида поведения механических характеристик КТС: оптимального значения пластичности $\Psi_K^{opt.}$ от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 1); пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии $K_{ms} = 2,3$ для оптимизированного сплава (кривая 2); та же при условии $K_{ms} = 1,9$ для выбранного сплава (кривая 3); точка «a» с координатами $(K_{ms}^{opt.}, \Psi_K^{opt.})$, точка «a*» с координатами (K_{ms}, Ψ_K) при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$

Из рисунка 2 видно, что меру близости значений свойств K_{ms}, Ψ_K у выбранного сплава (точка «a*») к их оптимальным значениям $K_{ms}^{opt.}, \Psi_K^{opt.}$ на кривой оптимизации (точка «a») при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ можно определить в виде следующих соотношений этих свойств:

$$\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = \frac{K_{ms}}{K_{ms}^{opt.}}; \quad (2)$$

$$\mu_{\Psi}^{\sigma} = \frac{\Psi_K}{\Psi_K^{opt.}}, \quad (3)$$

где: $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$ – мера оптимальности (механического качества) по механической стабильности K_{ms} , а μ_{Ψ}^{σ} – мера оптимальности по пластичности Ψ_K при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ [1]; оптимальные значения $K_{ms}^{opt.}$ и $\Psi_K^{opt.}$

для КТС определяются согласно зависимостям [2]:

– для сплавов 1-го вида механического состояния:

$$K_{ms}^{omm.} = a - b \cdot \ln \left[\left(\frac{c - d \cdot \sigma_{0,2}}{1 - k \cdot \sigma_{0,2}} \right)^m \right], \quad (4)$$

где: $a = 0,674$; $b = 0,108$; $c = 75,745$; $d = 0,043$ [МПа⁻¹]; $k = 5,1 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $m = -3,270$;

$$\Psi_K^{omm.} = \frac{a - b \cdot \sigma_{0,2}}{1 - c \cdot \sigma_{0,2}}, \quad (5)$$

где: $a = 75,745$; $b = 0,043$ [МПа⁻¹]; $c = 5,1 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹];

– для сплавов 2-го вида механического состояния:

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

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

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

где: $a = 108,887$; $b = 0,057$ [МПа⁻¹]; a, b, c, d, k, m – эмпирические коэффициенты.

Следует отметить, что, согласно концепции механической стабильности и выводам работы [1], основным «индикатором» качества, отражающим способность металла сопротивляться охрупчиванию в количественном измерении, является мера механического качества μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$. При этом мера оптимальности по пластичности μ_ψ^σ является вспомогательным параметром, отражающим в количественном измерении степень близости пластичности Ψ_K выбранного сплава к ее оптимальной величине $\Psi_K^{omm.}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$.

Метод количественной оценки механического качества при заданной прочности наиболее удобен для практического применения, вследствие того, что характеристика прочности $\sigma_{0,2}$ всегда принимает участие в инженерных расчетах и технологических прогнозах – эта характеристика легко определяется экспериментально по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение, она включается в технические условия на поставку металлических конструкционных материалов, в паспорта приемочных испытаний, является наиболее привычной и легкодоступной в любых справочных источниках.

Анализ результатов оценки механического качества конструкционных титановых сплавов

Все исследованные КТС можно условно расположить по уровням механического качества, границы между которыми будут отражать характер

поведения базовых механических характеристик сплавов в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность». В такой постановке можно определить следующие условные уровни механического качества сплавов: ВК – высококачественные; К – качественные; УК – удовлетворительного качества; НК – низкого качества. Ниже по тексту будут использоваться указанные условные обозначения уровней механического качества.

Диаграмма расположения КТС 1-го вида поведения механических характеристик по уровням механического качества приведена на рисунке 3. На диаграмме отражены общие принципы определения указанных уровней, границ между ними и некоторые особенности, свойственные для этого вида сплавов, а именно:

– уровень механического качества ВК имеет место во всем исследованном интервале свойств в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность», однако доверительный интервал границ этого уровня по показателю пластичности Ψ_K уменьшается по мере повышения прочности $\sigma_{0,2}$ и снижения уровня механической стабильности K_{ms} , обеспечивая при этом все более «жесткие» условия для достижения оптимальных значений характеристик механической стабильности K_{ms}^{opt} и пластичности Ψ_K^{opt} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Таким образом, уровень ВК характеризуется наивысшими показателями механического качества сплавов, при этом верхняя и нижняя границы уровня ВК (рис. 3 – кривые 1+ и 1-) описываются зависимостью, производной от (5):

$$\Psi_K^{1+,1-} = \pm 3 \cdot s \cdot \left(\frac{a - b \cdot \sigma_{0,2}}{1 - c \cdot \sigma_{0,2}} \right), \quad (8)$$

где: $s = 1,70$ – выборочный стандарт для 1-го вида поведения механических характеристик КТС [2]; знак «+» для верхней, знак «-» – для нижней границы уровня ВК (здесь и ниже доверительный интервал между верхней и нижней границами определялся по правилу «трех сигм», согласно которому погрешность $\delta = \pm 3 \cdot s$ [27]); a, b, c – эмпирические коэффициенты, входящие в (5);

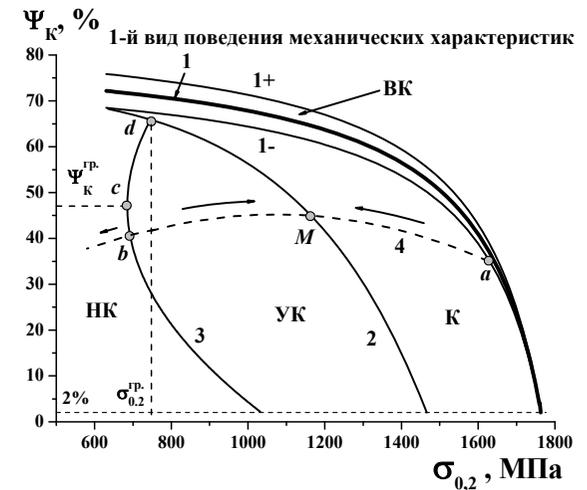


Рис. 3. Диаграмма расположения КТС 1-го вида поведения механических характеристик по уровням качества: ВК, К, УК, НК – уровни механического качества; зависимость оптимальной пластичности Ψ_K^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 1); верхняя граница уровня ВК (кривая 1+); нижняя граница уровня ВК (кривая 1-); зависимость максимальной пластичности Ψ_K^{max} от максимальной прочности $\sigma_{0,2}^{max}$ в точках экстремумов зависимостей $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (кривая 2); зависимость критического значения пластичности Ψ_K^{kp} от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{kp}$ (кривая 3); зависимость пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при $K_{ms} = const$ (кривая 4); точки пересечения кривых: a – 1- и 4; M – 2 и 4; b – 3 и 4; c – уровень граничной пластичности Ψ_K^{sp} на кривой 3; d – 3 и 2 при $\sigma_{0,2}^{sp}$; $\sigma_{0,2}^{sp}$ – граничная прочность

– уровень механического качества К для 1-го вида поведения механических характеристик КТС не имеет ограничений по прочности и характеризуется повышением пластичности сплава Ψ_K до уровня Ψ_K^{max} при снижении его прочности $\sigma_{0,2}$ до уровня $\sigma_{0,2}^{max}$ на зависимости $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (рис. 1, рис. 3 – интервал изменения свойств Ψ_K , $\sigma_{0,2}$ от точки «а» к точке максимума «М», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня механического качества К по определению совпадает

с нижней границей уровня ВК, а нижняя представляет собой зависимость $\Psi_K^{макс.} = f(\sigma_{0,2}^{макс.})$ и описывается гиперболической функцией обобщенного вида:

$$\Psi_K^{макс.} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2}^{макс.})^d}, \quad (9)$$

где: $a = 74,253$; $b = 0,894$; $c = 3,860 \cdot 10^{-6}$ [МПа⁻¹]; $d = -781,250$ – эмпирические коэффициенты;

– уровень механического качества УК характеризуется увеличением пластичности сплава Ψ_K до уровня $\Psi_K^{макс.}$ при повышении его прочности $\sigma_{0,2}$ до уровня $\sigma_{0,2}^{макс.}$ (рис. 3 – интервал изменения свойств Ψ_K , $\sigma_{0,2}$ от точки «b» к точке максимума «M», что отмечено стрелкой на кривой 4) и имеет ограничение по прочности $\sigma_{0,2}^{zp.} = 750$ МПа (рис. 3 – точка «d» на кривой 2). Верхняя граница уровня механического качества УК по определению совпадает с нижней границей уровня К в интервале изменения прочности $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{zp.} = 750$ МПа, а нижняя представляет собой функцию регрессии между критическими параметрами пластичности $\Psi_K^{kp.}$ и прочности $\sigma_{0,2}^{kp.}$ в точке пересечения зависимостей $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ для 1-го (выпуклая парабола) и 2-го (вогнутая парабола) видов механического состояния (рис. 1, точка «A»). Функция $\Psi_K^{kp.} = f(\sigma_{0,2}^{kp.})$ описывает границу, разделяющую КТС на два вида поведения механических характеристик, и представляет собой следующую зависимость (рис. 3 – кривая 3):

$$\Psi_K^{kp.} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot c \cdot (a - \sigma_{0,2}^{kp.})}}{2 \cdot c}, \quad (10)$$

где: $a = 1\,066,0$ [МПа]; $b = 16,0$; $c = 0,17$ [МПа⁻¹] – эмпирические коэффициенты.

При построении нижней границы уровня УК следует выполнять следующие условия: если критическая величина пластичности $\Psi_K^{kp.} \geq \Psi_K^{zp.} = 47\%$ (рис. 3 – точка «c»), то перед квадратным корнем в уравнении (10) следует использовать знак «+», если же $\Psi_K^{kp.} < \Psi_K^{zp.} = 47\%$, то знак «-»;

– уровень механического качества НК характеризуется уменьшением пластичности сплава Ψ_K при снижении его прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 3 – изменение свойств Ψ_K , $\sigma_{0,2}$ влево от точки «b»), что отмечено короткой стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня качества НК по определению совпадает с нижней границей уровня УК и описывается с помощью функции (10).

На рисунке 4 представлена диаграмма расположения по уровням механического качества для 2-го вида поведения механических характеристик КТС. Диаграмма отражает общие принципы определения уровней механического качества, границ между ними и некоторые особенности, свойственные для этого вида сплавов, а именно:

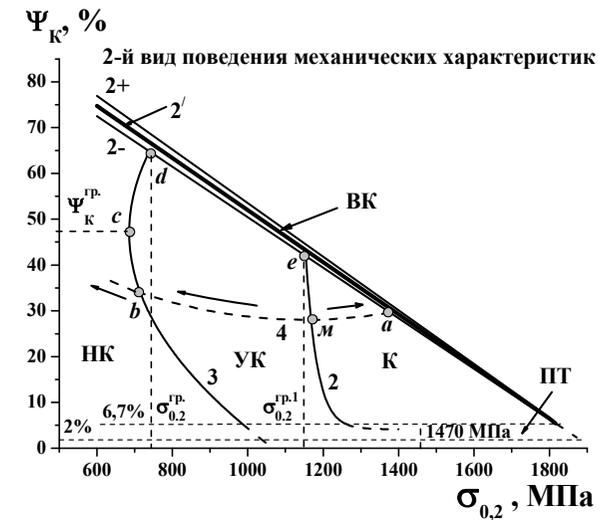


Рис. 4. Диаграмма расположения КТС 2-го вида поведения механических характеристик по уровням качества: ВК, К, УК, НК – уровни механического качества; зависимость оптимальной пластичности Ψ_K^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 2'); верхняя граница уровня ВК (кривая 2+); нижняя граница уровня ВК (кривая 2-); зависимость минимальной пластичности Ψ_K^{min} от минимальной прочности $\sigma_{0,2}^{min}$ в точках экстремумов зависимостей $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (кривая 2); зависимость критического значения пластичности Ψ_K^{kp} от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{kp}$ (кривая 3); зависимость пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при $K_{ms} = const$ (кривая 4); точки пересечения кривых: a – 2- и 4; m – 2 и 4; b – 3 и 4; c – уровень граничной пластичности Ψ_K^{gp} на кривой 3; d – 2- и 3 при $\sigma_{0,2}^{gp}$; e – 2- и 2 при $\sigma_{0,2}^{gp.1}$; $\sigma_{0,2}^{gp.2}$, $\sigma_{0,2}^{gp.3}$ – граничные значения прочности; ПТ – перспективные технологии

– расположение уровня механического качества ВК, его характерные особенности и принцип построения границ аналогичны таким же факторам для 1-го вида поведения механических характеристик КТС, изложенным

выше, а верхняя и нижняя границы уровня ВК для КТС 2-го вида поведения механических характеристик (рис. 4 – кривые 2+ и 2-) описываются линейной зависимостью, производной от (7):

$$\Psi_K^{2+,2-} = \pm 3 \cdot s \cdot (a - b \cdot \sigma_{0,2}), \quad (11)$$

где: $s = 0,99$ – выборочный стандарт для 2-го вида поведения механических характеристик КТС [2]; знак «+» для верхней, знак «-» – для нижней границы уровня механического качества ВК; a, b – эмпирические коэффициенты, входящие в (7);

– уровень механического качества К имеет ограничение по прочности $\sigma_{0,2}^{sp.1} = 1\ 150$ МПа и, таким образом, характерен только для высокопрочных КТС при $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{sp.1}$. Это ограничение связано с тем, что точка минимума «м» ($\Psi_K^{мин.}, \sigma_{0,2}^{мин.}$) зависимости $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = const$ (рис. 1) практически совпадает с кривой оптимизации уже на уровне механической стабильности $K_{ms} = 2,3$, а это, в свою очередь, приводит к пересечению зависимости $\Psi_K^{мин.} = f(\sigma_{0,2}^{мин.})$ с нижней границей уровня качества ВК (рис. 4 – точка «e» на пересечении кривых 2 и 2-) при достижении граничной прочности $\sigma_{0,2}^{sp.1} = 1\ 150$ МПа. Таким образом, уровень механического качества К характеризуется повышением пластичности сплава Ψ_K , начиная от уровня $\Psi_K^{мин.}$ при возрастании его прочности $\sigma_{0,2}$ от уровня $\sigma_{0,2}^{мин.}$ (рис. 1, 4 – интервал изменения свойств $\Psi_K, \sigma_{0,2}$ от точки минимума «м» к точке «a», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня К по определению совпадает с нижней границей уровня ВК, а нижняя представляет собой зависимость $\Psi_K^{мин.} = f(\sigma_{0,2}^{мин.})$ и описывается экспоненциальной функцией вида:

$$\Psi_K^{мин.} = a + b \cdot \exp\left[\frac{c - \sigma_{0,2}^{мин.}}{d}\right], \quad (12)$$

где: $a = 4,391$; $b = 45,626$; $c = 1\ 148,0$ [МПа]; $d = 30,0$ [МПа] – эмпирические коэффициенты;

– уровень механического качества УК характеризуется увеличением пластичности сплава Ψ_K от уровня $\Psi_K^{мин.}$ при снижении его прочности $\sigma_{0,2}$ от уровня $\sigma_{0,2}^{мин.}$ (рис. 1, 4 – интервал изменения свойств $\Psi_K, \sigma_{0,2}$ от точки минимума «м» к точке «b», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня УК по определению совпадает с нижней границей уровня К в интервале изменения прочности $750\ \text{МПа} < \sigma_{0,2} \leq 1150\ \text{МПа}$ (рис. 4 – интервал изменения свойств $\Psi_K, \sigma_{0,2}$ от точки «d» до точки «e»), а нижняя представляет собой зависимость $\Psi_K^{sp.} = f(\sigma_{0,2}^{sp.})$ и описывается, как и в случае

1-го вида поведения механических характеристик КТС, функцией (10) в интервале изменения прочности как $\sigma_{0,2} \leq 750$ МПа, так и $\sigma_{0,2} > 750$ МПа. При построении нижней границы уровня УК следует выполнять условия, сформулированные выше для КТС 1-го вида поведения механических характеристик;

– уровень механического качества НК характеризуется увеличением пластичности сплава ψ_K за счет снижения его прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 4 – изменение свойств ψ_K , $\sigma_{0,2}$ слева от точки «b», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня НК по определению совпадает с нижней границей уровня УК и описывается с соблюдением тех же условий.

Из рисунка 4 видно, что все границы уровней механического качества ограничены снизу уровнем минимальной пластичности $\psi_K^{min.} \approx 6,7$ %. Это связано с тем, что исследованная выборка КТС 2-го вида поведения механических характеристик не содержит сплавов, у которых прочность $\sigma_{0,2}$ превышала бы значение 1 470 МПа на уровнях механической стабильности $K_{ms} < 1,35$ [2].

В предлагаемой системе взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» оптимизированным свойствам механической стабильности, например, в интервале $1,2 \leq K_{ms}^{onm.} \leq 1,3$ отвечал бы интервал оптимизированной пластичности $6,4 \% \leq \psi_K^{onm.} \leq 8,5$ %, а прочность $\sigma_{0,2}$ таких сплавов изменялась бы в пределах от 1 770 МПа до 1 800 МПа. Вследствие этого, область, ограниченная на рисунке 4 уровнями прочности $\sigma_{0,2} > 1 470$ МПа и минимальной пластичности $\psi_K^{min.} < 6,7$ %, названа областью перспективных технологий (ПТ)¹ для КТС.

Результаты определения мер механического качества μ_{Kms}^σ и расположения по уровням механического качества некоторых КТС различных групп, в зависимости от соотношения значений величины показателя деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной [28], а также обоих видов поведения механических характеристик представлены в таблице 2.

¹ При этом все предлагаемые методики вполне пригодны для анализа сплавов с уровнем прочности $\sigma_{0,2} \leq 1 470$ МПа и $K_{ms} < 1,35$.

Таблица 2

Значения базовых характеристик $\sigma_{0,2}$, Ψ_K , K_{ms} ; результаты определения мер механического качества μ_{Kms}^σ и расположения по уровням механического качества некоторых КТС различных групп и видов поведения механических характеристик в интервале температур испытаний $77 \text{ K} \leq T_{исп.} \leq 293 \text{ K}$

№ п/п	КТС	Обработка	Группа	Вид	$T_{исп.}$ К	$\sigma_{0,2}$ МПа	Ψ_K %	K_{ms}	μ_{Kms}^σ (2)	УМК
1	BT16 [20, 21]	НГ 920 °С, 0,5 ч, ОХ с печью	II	1	293	760	62,0	2,351	1,080	ВК
2		НГ 800 °С, 1 ч, ОХ с печью 500 °С, 8 ч	I	1	77	1500	16,0	1,278	0,627	К
3		НГ 920 °С, 0,5 ч, 80 °С с ⁻¹ + 750 °С, 0,5 ч, 40 °С·ч ⁻¹	II	2	293	800	54,0	2,286	0,847	УК
4		НГ 1050 °С, 0,5 ч, + 830 °С, 4 ч, 40 °С·ч ⁻¹	II	2	293	770	36,0	1,859	0,678	УК
5		50 К·с ⁻¹ , 920 °С +700 °С, 6 ч	II	1	293	930	64,0	2,293	0,916	К
6		НГ 800 °С, 1 ч, +550 °С, 4 ч	II	2	293	940	55,0	2,514	1,012	ВК
7	Ti-7Al-3Mo [6]	Состояние поставки	I	1	77	1540	21,5	1,245	0,618	К
8	AT2 [5]	Состояние поставки	II	2	200	700	60,0	2,230	0,782	НК
9			II	1	77	940	67,0	1,548	0,716	ВК
10	BT5-1кг. [5]	Состояние поставки	II	2	293	770	26,4	1,757	0,640	УК
11			II	1	200	950	23,7	1,525	0,705	УК
12			II	1	77	1230	21,6	1,210	0,569	УК
13	BT6 [8]	ПК 1 050 °С	I	1	293	1286	14,1	1,364	0,645	УК
14	BT9Л [8]	НГ 850 °С, вода, + 480 °С, 16 ч, воздух	I	1	293	970	15,0	1,322	0,612	УК
15	Timetal-LCB [4]	НГ 560 °С, 8 ч, 0,25 К·с ⁻¹	II	1	293	1600	36,5	1,840	0,941	К
16		НГ 520 °С, 8 ч, 0,25 К·с ⁻¹	II	1	293	1685	28,0	1,907	1,067	ВК
17		20 К·с ⁻¹ , 815 °С + 520 °С, 8 ч	II	2	293	1382	17,6	1,620	0,896	К

Окончание таблицы 2

18	Ti-15-3 [4]	НГ 900 °С, 45 мин., ОХ с печью +CD15 % + 500 °С, 8 ч	II	2	293	1435	20,4	1,610	0,933	К
19		CD70 % + 538 °С, 16 ч	II	2	293	1271	14,1	1,481	0,749	К
20	Ti-3Al- 4,5Fe- 7,2Cr [3]	НГ 780 °С, 30 мин.	II	2	293	1470	5,1	1,292	0,772	К
21		10 К·с ⁻¹ до 820 °С + 300 °С, 90 мин., + 450 °С, 6,5 ч	I	2	293	1448	10,1	1,395	0,817	К
22	Beta-21S [4]	CD80 % + RR + 538 °С, 8 ч	II	1	293	1339	42,2	1,932	0,918	К
23		НГ 520 °С, 16 ч, 0,25 К·с ⁻¹	II	1	293	1532	45,0	1,987	0,984	ВК
24		10 К·с ⁻¹ до 820 °С + 540 °С, 8 ч	II	2	293	1347	18,3	1,559	0,838	К
25	Ti-10V- 2Fe-3Al [23]	Синтез 1 350 °С + 510 °С, 8ч	II	2	293	1008	17,5	1,548	0,651	УК
26		Синтез 1 200 °С + 785 °С, 1 ч, ОХ с печью+785 °С, 1 ч	I	1	293	1091	5,1	1,216	0,566	УК
27		Синтез 1 250 °С + 900 °С, 15 мин.	I	1	293	776	9,1	1,642	0,755	НК
28	Ti-5Al- 5V-5Mo- 3Cr [24]	Синтез 1 250 °С + 850 °С, 1 ч + 750 °С, 1 ч	II	1	293	838	28,9	1,835	0,845	УК
29		Синтез 1 350 °С + 750 °С, 1 ч + 630 °С, 2 ч	I	2	293	904	12,7	1,694	0,667	УК
30	Ti-6Al- 4V [25]	ОЖ 700 °С, 2 ч, ОХ, воздух	II	1	200	1130	39,0	1,856	0,866	УК
Примечания: УМК – уровень механического качества; НГ – нагрев; ОХ – охлаждение; ОЖ – отжиг; ПК – прокатка; CD – холодная деформация; RR – скоростная рекристаллизация										

Анализ представленных в таблице 2 результатов показал, что:
– условия термообработки влияют не только на принадлежность КТС к определенному виду поведения механических характеристик, но и на

расположение по уровням механического качества в широком температурном интервале. Например, сравнение разных механических состояний сплава ВТ16 показывает, что повышенным уровнем пластичности при $T_{исп.} = 293$ К обладают сплавы пп. 1 и 5, относящиеся к 1-му виду поведения механических характеристик (для которого характерна повышенная пластичность при данной прочности $\sigma_{0,2}$ – сравнить со сплавами пп. 3, 4, 6, которые относятся ко 2-му виду). Соответственно, для сплавов пп. 1, 5 характерны более высокие показатели мер механического качества ($\mu_{Kms}^{\sigma} = 1,080$ на уровне механического качества ВК для п. 1 и $\mu_{Kms}^{\sigma} = 0,916$ на уровне механического качества К для п. 5) по сравнению с аналогичными более низкими показателями для пп. 3, 4, 6 ($\mu_{Kms}^{\sigma} = 0,831$ и $\mu_{Kms}^{\sigma} = 0,831$ на уровне механического качества УК для пп. 3, 4 и $\mu_{Kms}^{\sigma} = 1,012$ на уровне механического качества ВК для п. 6);

– принадлежность сплава к определенному виду поведения механических характеристик не всегда зависит от его группы при данной температуре испытаний (сравнить пп. 2–4, 6 и пп. 1, 5 для сплава ВТ16; п. 8 и п. 9 для сплава АТ2; пп. 25–27 и 28, 29 для сплавов Ti–10V–2Fe–3Al и Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr, полученных способом порошковой металлургии). Это свидетельствует о том, что интенсивность изменения деформационного упрочнения n в области локальной деформации не является единственным определяющим фактором для идентификации принадлежности КТС к определенному виду поведения механических характеристик, хотя определенное влияние этого фактора очевидно (см. пп. 2–4, 17–20, 26, 27 и др.). Однако более глубокое исследование природы связи видовой принадлежности и изменения вида поведения механических характеристик сплава под воздействием различных внешних факторов (температура, напряженно-деформированное состояние, воздействие концентраторов напряжений и т. п.) с соотношением значений величины показателя деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной [28] выходит за рамки настоящей работы и будет представлено отдельно;

– показательными примерами перехода из одного вида поведения механических характеристик в другой при снижении температуры испытаний являются сплавы АТ2 и ВТ5-1кт. (при $T_{исп.} = 200$ К и 293 К – принадлежность ко 2-му (пп. 8 и 10), а при $T_{исп.} = 77$ К и 200 К, 77 К – к 1-му (пп. 9, 11, 12) виду соответственно). Это свидетельствует о сохранении высокого уровня пластичности (см. пп. 9, 11, 12) и механического качества (см. п. 9) в условиях низких и криогенных температур, что характерно для сплавов, используемых в криогенной технике;

– потеря надежности (утрата механического качества) металла в смысле снижения его сопротивляемости охрупчиванию, что отражается снижением

величины меры механического качества μ_{Kms}^σ и переходом сплава на более низкий уровень механического качества, зависит от условий термообработки и соответствующих структурных состояний (сравнить пп. 1, 6 и 1–5 для сплава низкой прочности VT16; пп. 16 и 15, 17; 23 и 22, 24 для высокопрочных сплавов Timetal-LCB и Beta-21S; пп. 25, 26 и 27).

Особый интерес для анализа представляет сравнение высококачественных КТС 1 и 2-го видов поведения механических характеристик (на уровне механического качества ВК). В [2] была получена зависимость $\Psi_K^{onm.} = f(K_{ms}^{onm.})$, из которой видно, что характер поведения показателя оптимальной пластичности $\Psi_K^{onm.}$ зависит от уровня оптимальной механической стабильности $K_{ms}^{onm.}$ следующим образом: для сплавов с уровнем $K_{ms}^{onm.} > 1,95$ величина оптимальной пластичности для сплавов обоих видов поведения механических характеристик превышает значение 34,5%, при этом величина $\Psi_K^{onm.}$ для КТС 1-го вида превышает значения $\Psi_K^{onm.}$ для сплавов 2-го вида во всем интервале изменения $K_{ms}^{onm.}$, а при $K_{ms}^{onm.} \leq 1,95$ наблюдается обратная тенденция. Вследствие этого, принадлежность высококачественных КТС ответственного назначения к определенному виду поведения механических характеристик обуславливают повышенные показатели пластичности Ψ_K при соответствующем уровне механической стабильности K_{ms} : сравнить, например, свойства следующих сплавов, имеющих уровень механического качества ВК при комнатной температуре испытаний – сплав Ti–15–3 (скоростная рекристаллизация, холодная деформация 15 %, 500 °C, 16 час.; $\Psi_K = 33,0$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 333$ МПа, $K_{ms} = 1,87$), принадлежащий ко 2-му виду поведения механических характеристик, и сплав Timetal–LCB (520 °C, 8 ч, 0,25 К·с⁻¹; $\Psi_K = 28,0$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 685$ МПа, $K_{ms} = 1,90$), принадлежащий к 1-му виду или сплав Ti–15–3 (538 °C, 16 ч, 0,25 К·с⁻¹; $\Psi_K = 69,0$ %, $\sigma_{0,2} = 975$ МПа, $K_{ms} = 2,70$), принадлежащий к 1-му виду поведения механических характеристик, и VT-16 (1 200 °C, 3 ч, 100 °C с⁻¹; $\Psi_K = 62,0$ %, $\sigma_{0,2} = 830$ МПа, $K_{ms} = 2,70$), принадлежащий ко 2-му виду.

Итоговый вывод по развитой здесь системе расположения КТС по уровням механического качества сводится к следующему: с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$, вызванным действием различных факторов внешнего влияния (температуры, динамики нагружения и др.), требования по свойствам, защищающим от охрупчивания, кардинально различаются для сплавов разных уровней механического качества. Однако это различие не

относится к абсолютным значениям показателей пластичности ψ_K и/или механической стабильности K_{ms} , т. к. практически одинаково высокий уровень ψ_K и K_{ms} возможен как для сплавов уровня качества ВК и НК, но ключевое различие состоит в соответствующих уровнях прочностей $\sigma_{0,2}$ этих групп КТС. Низкокачественные сплавы (уровень НК) могут иметь довольно высокие значения ψ_K (~ 60–70 %), но только для КТС с низкой прочностью $\sigma_{0,2}$ (~ 600–750 МПа), а с повышением прочности, например, до 1 000 МПа уровень ψ_K и K_{ms} для таких сплавов катастрофически падает. Более качественные КТС (уровни УК и К) проявляют такое неизбежное падение характеристик ψ_K и K_{ms} при более высоких уровнях прочности $\sigma_{0,2}$ (~ 1 300–1 700 МПа). И только сплавы с уровнем механического качества ВК обязаны сохранять наивысший уровень защиты от охрупчивания во всем интервале изменения прочности – от ~ 600 до ~ 1 800 МПа.

Таким образом, признак стабильно наивысшего уровня защищенности от охрупчивания независимо от уровня прочности сплава – есть признак наивысшего механического качества металла (ВК) и, напротив, резкая ограниченность возможностей сплава по его защите от охрупчивания вследствие увеличения прочности – есть неперенный признак его плохого качества. Таковы общие закономерности в предлагаемой системе оценки механического качества КТС. При этом основным «индикатором» качества, отражающим способность металла сопротивляться охрупчиванию в количественном измерении, остается мера механического качества μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$.

ВЫВОДЫ

1. Отношение величины механической стабильности выбранного сплава K_{ms} к ее оптимальному значению K_{ms}^{opt} может быть использовано в виде меры механического качества металла μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, отражающей сравнительную способность металла сопротивляться охрупчиванию при одноосном растяжении.

2. Величина показателя механического качества μ_{Kms}^σ 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}^{opt} . Поэтому величина μ_{Kms}^σ и принадлежность к определенному

уровню качества (ВК, К, УК, НК) относятся исключительно к реальному состоянию сплава, проявляющему заведомо обозначенный уровень его прочности $\sigma_{0,2}$.

3. Расположение конструкционных титановых сплавов по уровням механического качества и определение границ между этими уровнями отражается характером поведения их базовых механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность». Принципы определения уровней механического качества и границ между ними зависят от вида поведения механических характеристик сплава и имеют свои отличительные особенности.

4. При помощи предлагаемых подходов к оценке механического качества конструкционных титановых сплавов можно дополнить их общепринятую условную классификацию новой, позволяющей провести разделение на условные уровни механического качества и детализировать количественную оценку внутри каждого уровня по величине индикатора качества – меры механического качества металла μ_{Kms}^{σ} . Такая детализированная оценка механического качества сплава будет способствовать более точной ориентации потребителя при определении области его надежного технического применения.

Литература

1. Мешков Ю. Я. Новый подход к оценке качества конструкционных сталей / Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, В. И. Большаков, О. П. Носенко, А. В. Мурашкин // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 66–71.
2. Шиян А. В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков // МиТОМ. – Д. : ГВУЗ ПГАСА, 2014. – № 4. – С. 54–75.
3. Markovsky P. E. Balancing of Mechanical Properties of Ti–4.5Fe–7.2Cr–3.0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment / P. E. Markovsky, M. Ikeda // Mater. Trans., Vol. 46, № 7. – 2005. – Pp. 1515–1524.
4. Ivasishin O. M. A comparative study of the mechanical properties of high-strength β -titanium alloys / O.M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk, S. L. Semiatin, C. H. Ward, S. Fox // J. of Alloys and Compounds, 457. – 2008. – Pp. 296–309.
5. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г. С. Писаренко. – К. : Наукова думка, 1980. – 1, 2.
6. Hickey C. F. Mechanical properties of titanium and aluminum alloys at cryogenic temperatures/ C. F. Hickey // Proceedings ASTM. – 1962. – 62. – P. 765–777.
7. Spretnak J. W. et. al., Noched and unnoched tensile and fatigue properties of the engineering alloys at 25 °C and –196 °C / J. W. Spretnak et. al. // (ASM Transactions: 1951, vol. 43, p. 547).
8. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие / Под

- ред. В. В.Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988. – С. 1–4.
9. Дроздовский Б. А. Трещиностойкость титановых сплавов / Б. А. Дроздовский, Л. В. Проходцева, Н. И. Новосельцева. – М. : Металлургия, 1983. – 192 с.
10. 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.
11. Котречко С. А. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // *Проблемы прочности*. – 2010. – № 1. – С. 112–119.
12. Котречко С. А. Предельная прочность / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // *Кристаллы, металлы, конструкции*. – К. : Наукова думка, 2008. – 295 с.
13. 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.
14. Котречко С. А. Концепция механической стабильности конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // *Проблемы прочности*. – 2009. – № 2. – С. 55–78.
15. *Авиационные материалы. Магниево-титановые сплавы* / Под ред. А. Т. Туманова. – М. : ОНТИ ВИАМ, 1973. – 5.
16. Ильин А. А. Титановые сплавы / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин // *Состав, структура, свойства* / Справочник. – М. : ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
17. Froes F. H. Powder metallurgy of titanium alloys / F. H. Froes., D. Eylon // *Inter. Mater. Rev.* – 1990. – V. 35, № 3. – P. 162–182.
18. ГОСТ 26492-85 «Прутки катаные из титана и титановых сплавов». – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 32 с.
19. 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.
20. Ivasishin O. M. Mechanical properties of ($\alpha+\beta$) titanium alloys at cryogenic temperatures / O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, G. A. Pakhareno, A. V. Shevchenko // *Material Science & Engineering*. – 1995. – A196. – P. 65–70.
21. Ивасишин О. М. Влияние структуры на сопротивление хрупкому разрушению и запас вязкости отожженного титанового сплава BT16 / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, А. В. Шевченко // *Металлофизика*, 1992. – 14, № 4. – С. 70–74.
22. Ivasishin O. M. The Impact of Diffusion on Synthesis of High-Strength Titanium Alloys from Elemental Powder Blends / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakina // *Key Engineering Materials*. – 2010. – V. 436. – P. 113–121.
23. 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.

24. Івасишин О. М. Вплив способу легування на мікроструктуру і властивості сплаву Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr, синтезованого методом сумішей порошкових компонентів / О. М. Івасишин, Д. Г. Саввакин, М. В. Матвийчук, О. Г. Моляр // Наукові вісті НТУУ КПІ, 2009. – № 4. – С. 79–84.

25. Кошелев П. Ф. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах / П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев. – М. : Машиностроение, 1967. – 315 с.

26. Belton J. H. et al., Materials for use at liquid hydrogen temperature // ASTM Spec. Techn. Publ. – 1960. – №. 287. – Pp. 108.

27. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – К. : Техника, 1977. – 768 с.

28. Івасишин О. М. Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных титановых сплавов в области неравномерной деформации / О. М. Івасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – 35, № 1. – С. 129–141.