УДК 669.187.526

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

ШИЯН А.В.[1], *к. ф.-м. н., с. н. с.*

[1] *Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульв. акад. Вернадского,36, 03680, ГСП, Киев - 142, Украина, тел. 067-509-35-11, e-mail: shyian_av@ukr.net*

Аннотация: Рассмотрен вопрос о характере поведения функциональных зависимостей характеристик пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии постоянства механической стабильности K_{ms} для конструкционных титановых сплавов. Установлено, что сплавы делятся на два вида, которые характеризуются повышенной и сниженной пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Показано, что разделение на два вида не зависит от соотношений значений показателей деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной. Установлено, что зависимость $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const имеет параболический характер, соответствующий определенному виду сплава по признаку выпуклости или вогнутости. Показано, что характер изменения зависимости $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const определяется величиной параметра отношения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ к пределу прочности σ_B. Предложен экспресс-метод для определения принадлежности конструкционных сплавов к определенному виду. Изучены особенности поведения параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ и найдена его связь с базовыми механическими характеристиками металла. Предложен способ измерения интенсивности изменения пластичности ψ_K при изменении прочности $\sigma_{0,2}$ на заданном уровне механической стабильности K_{ms} при помощи показателя величины радиуса кривизны в вершине параболы R и установлены закономерности изменения этого показателя для каждого из видов сплавов.

Ключевые слова: механическая стабильность; оптимизация свойств; параболическая зависимость; выпуклость и вогнутость; радиус кривизны параболы

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАСТИЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

ШИЯН А.В.[1], *к. ф.-м. н., с. н. с.*

[1] Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, бульв. акад. Вернадського, 36, 03680, ГСП, Київ-142, Україна, *тел. 067-509-35-11, e-mail: shyian_av@ukr.net*

Анотація: Розглянуто питання щодо характеру поведінки функціональних залежностей характеристик пластичності ψ_K від міцності $\sigma_{0,2}$ за умови постійності механічної стабільності K_{ms} для конструкційних титанових сплавів. Встановлено, що сплави розподіляються на два види, які характеризуються підвищеною та зниженою пластичністю ψ_K при заданій міцності $\sigma_{0,2}$. Показано, що розподіл на два види не залежить від співвідношень значень показників деформаційного зміцнення n при деформаціях менших та більших за рівномірну. Встановлено, що залежність $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ за умови K_{ms} = const має параболічний характер, відповідний визначеному виду сплаву за ознакою опуклості або увігнутості. Показано, що характер зміни залежності $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ за умови K_{ms} = const визначається величиною параметра відношення умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ до межі міцності σ_B. Запропоновано експрес-метод для визначення належності конструкційних сплавів до відповідного виду. Досліджені особливості поведінки параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ та знайдений його зв'язок з базовими механічними характеристиками металу. Запропоновано спосіб виміру інтенсивності зміни пластичності ψ_K при зміні міцності $\sigma_{0,2}$ на заданому рівні механічної стабільності K_{ms} за допомогою показника величини радіусу скривлення в вершині параболи R та встановлені закономірності зміни цього показника для кожного з видів сплавів.

Ключові слова: механічна стабільність; оптимізація властивостей; параболічна залежність; опуклість та увігнутість; радіус скривлення параболи

THE EFFECT OF STRENGTH CHARACTERISTICS ON THE REGULARITIES OF CHANGE IN DUCTILE PROPERTIES OF STRUCTURAL TI ALLOYS

SHIYAN A.V. [1], *Cand. Sc. (Tech.), senior staff scientist*

[1] *G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine, 36 Academician Vernadsky Boulevard, 03680 Kyiv-142, Ukraine, tel. 067-509-35-11, e-mail: shyian_av@ukr.net*

Abstract: The issue on the behaviour of dependences of ductile characteristics ψ on strength σ_Y at the constant mechanical stability K_{ms} is considered for structural Ti alloys. It is ascertained that alloys are differentiated in two types characterizing by higher and lower ductility ψ at given strength σ_Y. It is shown that such differentiation doesn't depend on the ratio of strain hardening exponents n at strains less and greater than the uniform one. It is established that dependence $\psi = \mathrm{f}(\sigma_\mathrm{Y})$ has parabolic behaviour of certain type at K_{ms}=const, and this type corresponds to certain type of alloy on the basis of the convexity or concavity, It is exhibited that behaviour of $\psi = \mathrm{f}(\sigma_\mathrm{Y})$ at K_{ms}=const is pre-determined by the ratio of yield stress σ_Y to ultimate strength σ_S. Rapid technique for ranging of structural alloys is offered. Specific features of behaviour of parameter σ_Y / σ_S is studied, and it relation with basic mechanical characteristics of metal is found. Method for measurement of change in ductility ψ at change in strength σ_Y at given level of mechanical stability is suggested on the basis of the value of radius of curvature R in parabola tip. Regularities of change in this value for each type of alloys are ascertained.

Key words: mechanical stability; optimization of properties; parabolic dependence; convexity and concavity; radius of curvature of parabola

1. Введение. Постановка задачи.

Проблема поиска взаимосвязей между базовыми механическими характеристиками конструкционных металлических сплавов с целью их оптимизации является насущной и актуальной для решения практических инженерных и технологических задач.

На практике оптимизация комплекса механических свойств сплава – прочности ($\sigma_{0,2}$), пластичности (ψ_K) и механической стабильности (K_{ms}) во многом зависит от степени взаимной чувствительности изменения одних свойств по отношению к другим. Поэтому детальное рассмотрение взаимосвязи этих свойств между собой в виде определенных аналитических зависимостей должно позволить не только выявить основные закономерности этих связей, но и понять причины, регулирующие как сам характер изменения, так и степень чувствительности характеристик пластичности к изменению свойства прочности сплавов.

В сущности, к этому сводится основной смысл задач данной работы.

Важную роль в решении этой задачи занимает одна из базовых характеристик металла – характеристика механической стабильности K_{ms}, которая для конструкционных, в том числе титановых, сплавов определяется согласно зависимости [1, 2]:

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

где: R_X или R_{MC} (для конструкционных сталей) – уровень хрупкой прочности металла; σ_2 – прочность пластичного металла при критической степени деформации e_C, равной 2%; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; n – показатель деформационного упрочнения.

Попытки найти связь между характеристиками относительного сужения после разрушения образца ψ_K и механической стабильности K_{ms} в условиях одноосного растяжения были сделаны для конструкционных сталей в работах [1, 3], где было показано влияние склонности к деформационному упрочнению на пластичность металла. Такой анализ позволил понять причину того, что хрупкие высокопрочные сплавы могут иметь при комнатной температуре испытаний показатели пластичности, сравнимые с аналогичными показателями для сплавов с низкой прочностью. При этом в [1, 3] было показано, что высокая пластичность высокопрочных сталей при испытаниях на одноосное растяжение достигается не за счет высоких значений K_{ms}, а вследствие их низкой склонности к деформационному упрочнению. Кроме этого, в [3] дополнительно отмечена важность полученных зависимостей $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ согласованного изменения прочностных и пластических свойств сплавов на основе железа при условии фиксации уровня механической стабильности K_{ms}.

Для конструкционных титановых сплавов (КТС) взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» была показана в [4], где, на основе экспериментальных данных, было установлено, 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 разделить на два вида по типу экстремума – с наличием максимумов и с наличием минимумов. На основе объединения зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при различных фиксированных значениях K_{ms} в [4] была представлена обобщенная диаграмма взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность», отражающая запас пластичности, достаточный для защиты от охрупчивания КТС, в зависимости от их прочности при заданном уровне механической стабильности (рис. 1).

Однако полученные в [4] закономерности согласованного изменения прочностных ($\sigma_{0,2}$) и пластических (ψ_K) свойств КТС, при фиксированном уровне характеристики механической стабильности (K_{ms} = const) требуют дальнейшего более детального исследования и ответа на ряд связанных с ними вопросов, в частности, о причинах существования двух видов упомянутых выше параболических зависимостей: выпуклых 1-го вида и вогнутых 2-го вида.

При проведении настоящих исследований был учтен также и тот факт, что, в зависимости от соотношения значений показателей деформационного упрочнения *n* при деформациях меньших и больших равномерной, все КТС делятся на две группы. Первая характеризуется практически неизменным значением *n*, а вторая – увеличением *n* в области локализованной пластической деформации [5]. В настоящей работе будут более детально исследованы параметры, ответственные за разделение КТС на указанные группы.

Из вышесказанного вытекает **цель настоящей работы:** установить особенности влияния характеристик прочности на закономерности изменения пластических свойств конструкционных титановых сплавов.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

- на основе модели деформационного упрочнения по Холломону, расширенной на область локализованной деформации, определить закономерности изменения величин истинной равномерной деформации e_p и отношения истинного напряжения на пределе прочности к условному пределу текучести $S_B/\sigma_{0,2}$, которые ответственны за изменение соотношений значений показателей деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной;
- установить причины параболического характера зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const и изменения поведения этих зависимостей;
- исследовать особенности поведения параметров, ответственных за изменение поведения зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const.

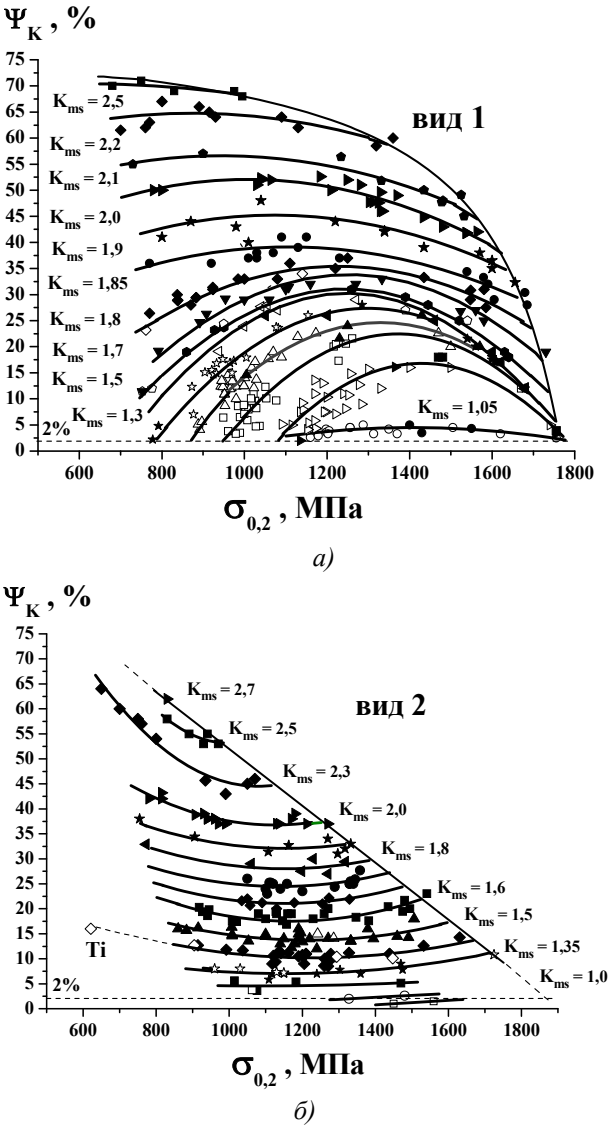


Рис. 1. Обобщенная диаграмма для КТС при заданных уровнях механической стабильности K_{ms} :
а) зависимости пластичности от прочности 1-го вида (выпуклые); б) те же зависимости 2-го вида (вогнутые); светлые знаки – сплавы I-ой группы, темные знаки – сплавы II-ой группы. /

Fig.1. A generalized diagram for the CTA at a given level of mechanical stability K_{ms} :
a) dependences of the plasticity on the strength of the 1st type (bulging); b) the same dependences of the 2nd type (concave); bright marks – alloys of the I-st group, dark marks – alloys of the II-nd group.

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 $\sigma_{0,2}$ = 1725 МПа, а характеристики пластичности – от ψ_K = 70,0% до ψ_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 [6–12], а также справочные и литературные данные из других источников [13–17] с целью получения информации о значениях базовых механических характеристик КТС в диапазоне температур от 4К до 293К, которые были обработаны при помощи методики [2]. Это позволило получить достаточно большой объем данных для корректной статистической обработки. Всего в настоящей работе представлены результаты около 500 измерений комплекса механических характеристик более 400 видов структурных состояний КТС.

3. Связь между пластичностью ψ_K и прочностью $\sigma_{0,2}$ при заданной механической стабильности K_{ms}

3.1. Закономерности изменения сопротивления пластической деформации

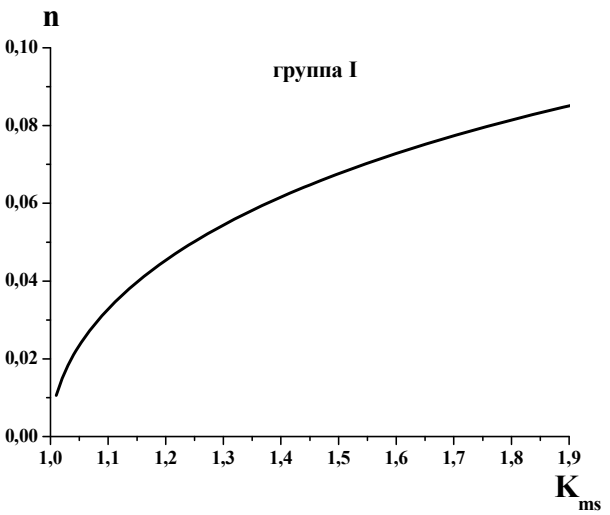
В работе [2] были установлены зависимости для определения характеристик механической стабильности для каждой группы КТС. При этом было показано, что для I-ой группы сплавов, которые характеризуются практически неизменным значением показателя деформационного упрочнения n как в области равномерной, так и в области неравномерной деформации, параметр эквивалентной деформации[1] $\lg \bar{e}^{I}_{экв.}$ является линейной функцией *n*.

Это привело к установлению относительно простой расчетной зависимости K_{ms} для КТС I-ой группы:

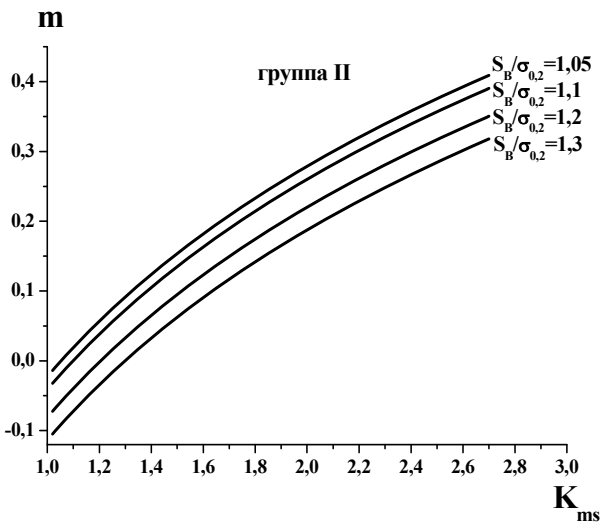
$$\mathrm{K}^{\mathrm{I}}_{\mathrm{ms}} = 10^{n\cdot\left(\lg \bar{e}^{I}_{экв.} - 1\right)} = 10^{\mathrm{a}\cdot n^2}, \qquad (2)$$

где: $\bar{e}^{I}_{экв.} = \mathrm{e}^{\mathrm{I}}_{\text{экв.}}/0{,}002$ – приведенное значение эквивалентной деформации для сплавов I-ой группы; $a = 38{,}497$ – эмпирический коэффициент.

[1] Параметр «эквивалентной деформации» $e_{экв.}$ был введен в работе [18] в качестве особой вспомогательной характеристики, которая характеризует величину пластической деформации, необходимую для достижения за счет деформационного упрочнения *n* уровня растягивающих напряжений σ_{11}, численно равного значению «хрупкой» прочности R_X (R_{MC}).



а)



б)

Рис. 2. Функциональные зависимости:
а) показателя деформационного упрочнения $n(n^I)$ от характеристики механической стабильности K_{ms} для КТС I-й группы; б) комбинации показателей деформационного упрочнения m от K_{ms} для КТС II-ой группы. /

Fig. 2. Functional dependences:
a) the strain hardening characteristics $n(n^I)$ of the mechanical stability of the I-st group CTA; b) a combination of the strain hardening of the II-nd group CTA.

Из (2) видно, что показатель деформационного упрочнения для КТС I-ой группы $n^I \approx n$ и K_{ms} связаны зависимостью:

$$\mathrm{n} \approx \mathrm{n}^{\mathrm{I}} = \sqrt{\frac{\lg K^{I}_{ms}}{a}}, \qquad (3)$$

которая представлена на рис. 2 а. Такой характер зависимости K_{ms} от *n* не противоречит (1), поскольку для конструкционных сплавов величина

деформационного упрочнения зависит от прочности металла.

Модель деформационного упрочнения по Холломону, расширенная на область локализованной деформации [2], для двух различных сплавов, принадлежащих к I-ой группе, при условии K_{ms} = const будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что следствием выполнения условия K_{ms} = const является выполнение равенства $tg\alpha = tg\alpha^{/} = n(n^{I}) = const$, откуда, с учетом известной зависимости для показателя n [2]:

$$n = \frac{\lg\left(\dfrac{S_B}{\sigma_{0.2}}\right)}{\lg\left(\dfrac{e_P}{0.002}\right)}, \qquad (4)$$

где: S_B – истинное напряжение на пределе прочности σ_B:

$$S_B = \frac{\sigma_B}{1-\psi_p}; \qquad (5)$$

e_p – истинная равномерная деформация:

$$e_P = -\ln(1-\psi_p), \qquad (6)$$

ψ_p – относительное равномерное сужение образца.

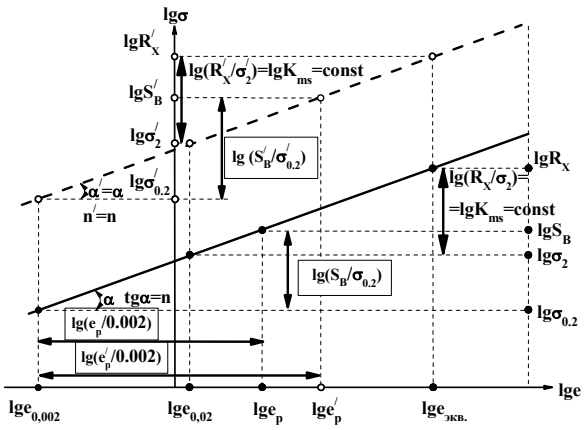


Рис. 3. Зависимости сопротивления пластической деформации для двух разных КТС (сплошная и пунктирная линии) I-ой группы при условии K_{ms} = const в логарифмических координатах (схема) / Fig. 3. The dependences of the resistance of plastic deformation for two different I-st group CTA (solid and dashed lines) in condition K_{ms} = const in logarithmic coordinates (scheme).

Таким образом, для КТС I-ой группы при условии K_{ms} = const должно выполняться условие:

$$\left[\lg\left(S_B/\sigma_{0,2}\right)\right]_i \cdot \left[\lg\left(e_p/0{,}002\right)\right]_k = \\ = \left[\lg\left(S_B/\sigma_{0,2}\right)\right]_k \cdot \left[\lg\left(e_p/0{,}002\right)\right]_i = const, \qquad (7)$$

где: i, k - номера сплавов из указанной выборки.

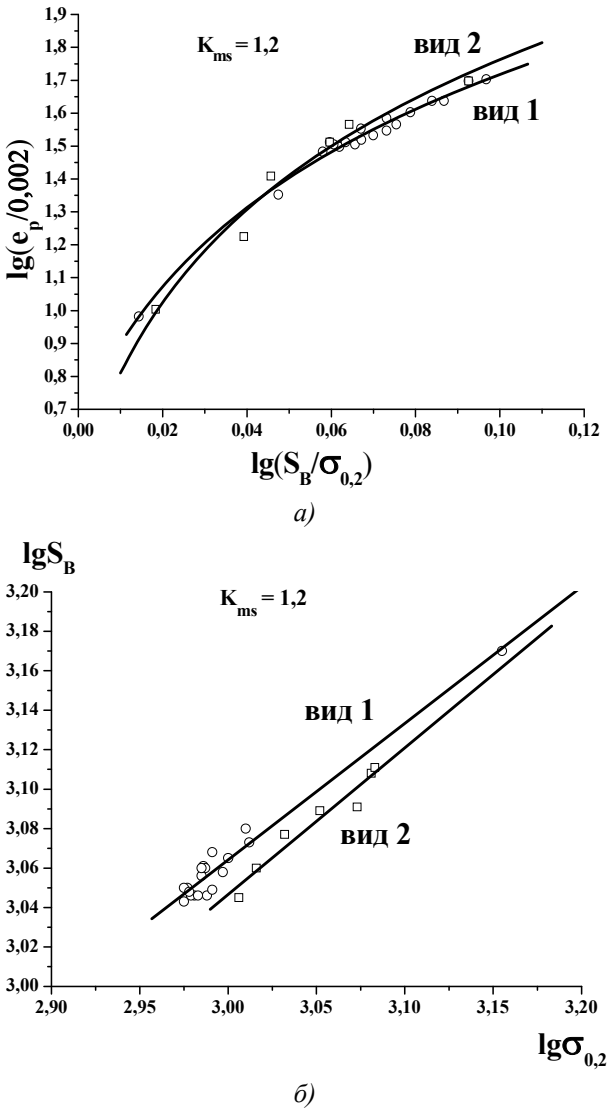


Рис. 4. Зависимости:
а) истинной равномерной деформации e_p от отношения $S_B/\sigma_{0,2}$; б) истинного напряжения на пределе прочности S_B от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии K_{ms} = 1,2 для двух видов КТС; ○, □ – экспериментальные данные сплавов I-ой группы, принадлежащие к 1-му и 2-му видам соответственно /

Fig. 4. Dependences of:
a) a true uniform strain e_p on $S_B/\sigma_{0,2}$ relationship; b) the true stress at a tensile strength S_B on the strength $\sigma_{0,2}$ upon condition that K_{ms} = 1,2 for the two types of the CTA; ○, □ - experimental data for I-st group alloy, belonging to the 1st and 2nd types, respectively.

Из рис. 3 и условия (7) очевидно, что значение параметра $\lg(S_B/\sigma_{0,2})$ может варьироваться вследствие изменения только двух величин – параметра деформации $\lg(e_p/0{,}002)$ и уровня прочности $\lg\sigma_{0,2}$, причем рамки выполнения условия K_{ms} = const предполагают согласованное

изменение значений параметров e_p и $S_B/\sigma_{0,2}$, а также характеристик S_B и $\sigma_{0,2}$.

Экспериментальное подтверждение этих предположений для КТС I-ой группы при условии K_{ms} = 1,2 представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что зависимость $\lg(e_p/0{,}002) = f[\lg(S_B/\sigma_{0,2})]$ имеет логарифмический характер (см. рис. 4 а) и хорошо аппроксимируется функцией:

$$y = a - b \cdot \ln(x + c), \qquad (8)$$

что легко объяснимо с учетом зависимостей (5) и (6).

Зависимость $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$ в первом приближении имеет линейный характер (см. рис. 4 б), при этом очевидно, что выборка КТС при фиксированном значении K_{ms} = 1,2 разделяется еще на два вида сплавов, которые отличаются интенсивностью возрастания истинной равномерной деформации e_p с повышением величины параметра $S_B/\sigma_{0,2}$, а также интенсивностью изменения истинного напряжения на пределе прочности S_B с изменением прочности $\sigma_{0,2}$. Значение этого факта более детально будет рассмотрено ниже в разделе 3.2.

Для двух различных КТС, принадлежащих ко II-ой группе, модель деформационного упрочнения по Холломону, расширенная на область локализованной деформации [2], при условии K_{ms} = const будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Установленная в [2] зависимость для определения характеристик механической стабильности для КТС II-ой группы, которые характеризуются увеличением показателя деформационного упрочнения *n* в области локализованной пластической деформации (см. рис. 5), имеет вид:

$$\mathrm{K}_{\mathrm{ms}}^{\mathrm{II}} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} \cdot 10^{\mathrm{m}}, \qquad (9)$$

где: $\mathrm{m} = a \cdot n^{II} \cdot \left(\frac{n^{II}}{n} - 1\right)^b - \mathrm{n}$ – комплексный показатель деформационного упрочнения в области равномерной *n* и неравномерной n^{II} деформации; a, b – коэффициенты, зависящие от температуры испытаний.

Зависимость $m = f(K_{ms})$ для некоторых фиксированных значений параметра $S_B/\sigma_{0,2}$ представлена на рис. 2 б. Из рис. 5 видно, что отличительной особенностью КТС II-ой группы является возможность изменения показателя деформационного упрочнения *n* в области локализованной пластической деформации, т.е. условие $tg\alpha = tg\alpha^{/}$ может не всегда выполняться, однако величина $tg\alpha^{/} = n^{/}$ в любом случае будет регулироваться уровнем параметра $S_B/\sigma_{0,2}$.

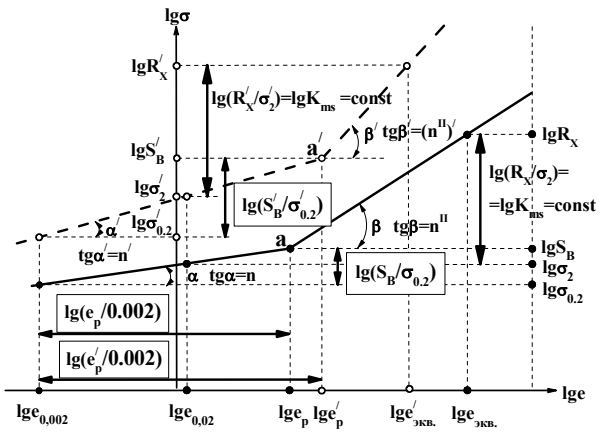
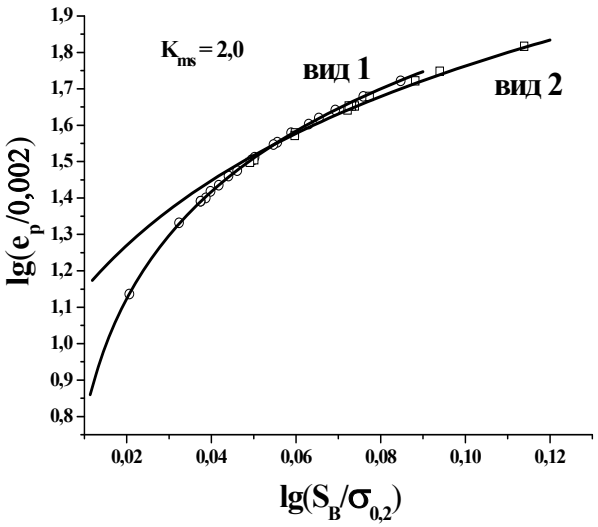
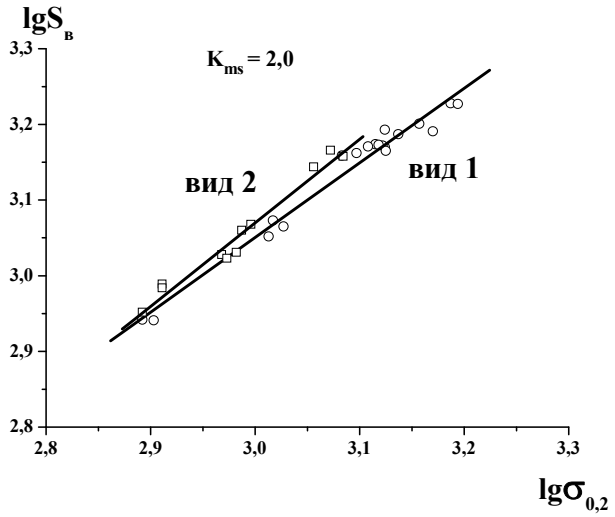


Рис. 5. Зависимости сопротивления пластической деформации для двух разных КТС (сплошная и пунктирная линии) II-ой группы при условии K_{ms} = const в логарифмических координатах (схема) / Figure. 5. The dependence of plastic deformation resistance for two different II-nd group CTA (solid and dashed lines) upon condition that K_{ms} = const in logarithmic coordinates (scheme)

Таким образом, из рис. 2 б и 5, а также зависимости (9) видно, что, как и в случае КТС I-ой группы, критерий постоянства механической стабильности K_{ms} = const будет обуславливать определенные рамки для изменения параметров $\lg e_p$ и $\lg(S_B/\sigma_{0,2})$, границы которых должны зависеть только от фиксированного уровня K_{ms}. Следовательно, по аналогии, можно предположить наличие функциональных зависимостей $\lg(e_p/0{,}002) = f[\lg(S_B/\sigma_{0,2})]$ и $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$ для КТС II-ой группы. Экспериментальное подтверждение этих предположений при условии K_{ms} = 2,0 представлено на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Зависимости:

а) истинной равномерной деформации e_p от отношения $S_B/\sigma_{0,2}$; б) истинного напряжения на пределе прочности S_B от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии K_{ms} = 2,0 для двух видов КТС; ○, □ – экспериментальные данные сплавов II-ой группы, принадлежащие к 1-му и 2-му видам соответственно /

Fig. 6. Dependences of:

a) a true uniform strain e_p on $S_B/\sigma_{0,2}$ relationships; b) the true stress at a tensile strength S_B of the strength $\sigma_{0,2}$ under condition that K_{ms} = 2.0 for the two types of the CTA; ○, □ - experimental data for II-nd group alloys, belonging to the 1st and 2nd types respectively

Из рис. 6 видно, что, как и в случае КТС I-ой группы, зависимость $\lg(e_p/0{,}002) = f[\lg(S_B/\sigma_{0,2})]$ для II-ой группы имеет логарифмический характер (8) – см. рис. 6 а, а зависимость $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$ в первом приближении – линейный (см. рис. 6 б), при этом, по аналогии, имеет место факт разделения сплавов на два вида.

3.2. Анализ аналитических зависимостей

На основе теоретических представлений стало очевидно, что параметрами, ответственными за изменение соотношений значений показателей деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной для КТС обеих групп, являются истинная равномерная деформация e_p и отношение истинного напряжения на пределе прочности к условному пределу текучести $S_B/\sigma_{0,2}$.

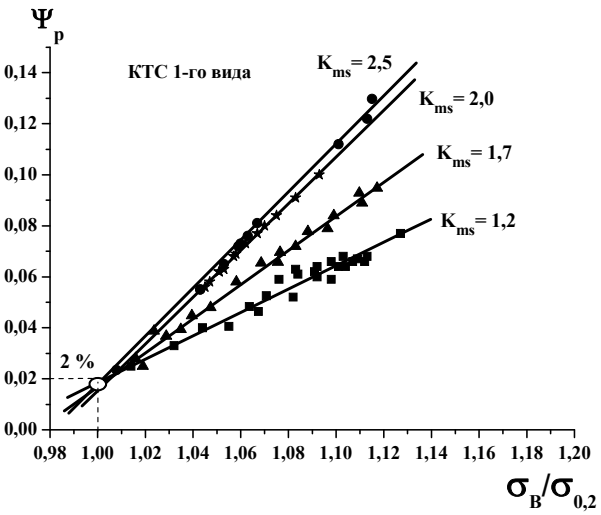
С целью нахождения общей закономерности изменения деформационного упрочнения КТС при деформациях меньших и больших равномерной, упростим в первом приближении зависимость $\lg(e_p/0{,}002) = f[\lg(S_B/\sigma_{0,2})]$. Для этого запишем указанную зависимость, опустив постоянный множитель 1/0,002, в виде:

$$\lg[-\ln(1-\psi_p)] = \mathrm{f}\left[\lg\frac{\sigma_\mathrm{B}}{\sigma_{0,2}\cdot(1-\psi_p)}\right], \qquad (10)$$

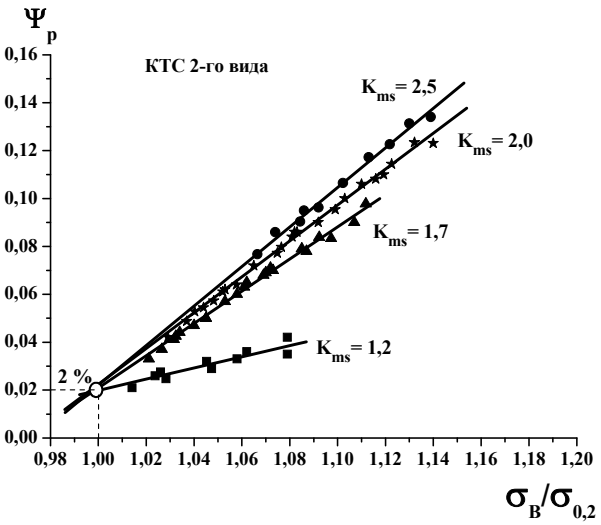
примем следующие допущения $-\ln(1-\psi_p) \approx \psi_p$; $\sigma_B/\sigma_{0,2}\cdot(1-\psi_p) \approx \sigma_B/\sigma_{0,2}$ и запишем зависимость (10) с принятыми упрощениями в прямом виде:

$$\psi_p = \mathrm{f}(\sigma_\mathrm{B}/\sigma_{0,2}). \qquad (11)$$

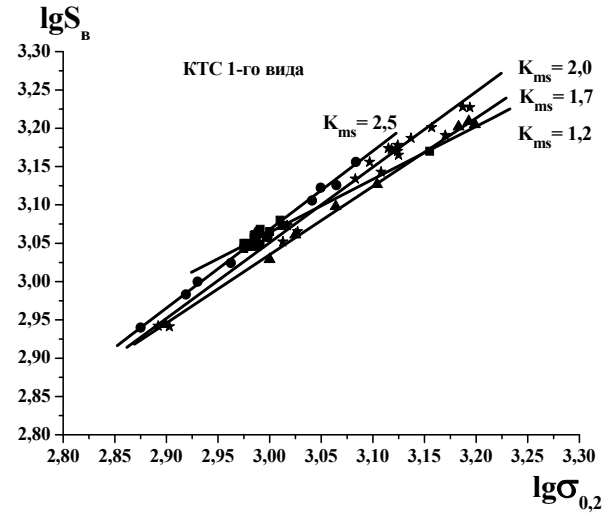
На рис. 7 а, б приведены зависимости (11), а на рис. 7 в, г – зависимости $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$, полученные на основе экспериментальных данных для обеих групп КТС 1-го и 2-го видов соответственно при некоторых фиксированных уровнях механической стабильности K_{ms} . Из рис. 7 видно, что отмеченные на рис. 4 и рис. 6 различия в интенсивности возрастания деформационной характеристики ψ_p с повышением величины параметра $\sigma_B/\sigma_{0,2}$, равно как и в интенсивности изменения истинного напряжения на пределе прочности S_B с изменением прочности $\sigma_{0,2}$, сохраняются для 1-го и 2-го видов КТС на всех уровнях K_{ms} = const. При этом упрощенные зависимости $\psi_p = \mathrm{f}(\sigma_\mathrm{B}/\sigma_{0,2})$ имеют линейный характер, а зависимости $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$ в первом приближении сохраняют линейность при условии K_{ms} = const во всем диапазоне изменения характеристики механической стабильности (1,2 ≤ K_{ms} ≤ 2,5), пригодном для практического применения КТС. Из рис. 7 видно, что виды КТС отличаются величинами вышеуказанных интенсивностей $\dfrac{d\psi_p}{d(\sigma_\mathrm{B}/\sigma_{0,2})}$ и $\dfrac{d(\lg S_B)}{d(\lg\sigma_{0,2})}$ на разных фиксированных уровнях K_{ms} , которым соответствуют значения тангенсов углов наклона соответствующих прямых к оси абсцисс. Здесь следует отметить, что представленные на рис. 7 зависимости охватывают обе группы КТС, а факт схождения зависимостей $\psi_p = \mathrm{f}(\sigma_\mathrm{B}/\sigma_{0,2})$ в точке с координатами (1,0; 0,02) дополнительно подтверждает правильность выбранного в [2] для КТС значения критической деформации e_C = 2% при переходе металла из пластического (вязкого) в хрупкое состояние в условиях одноосного растяжения (см. рис 7 а, б).



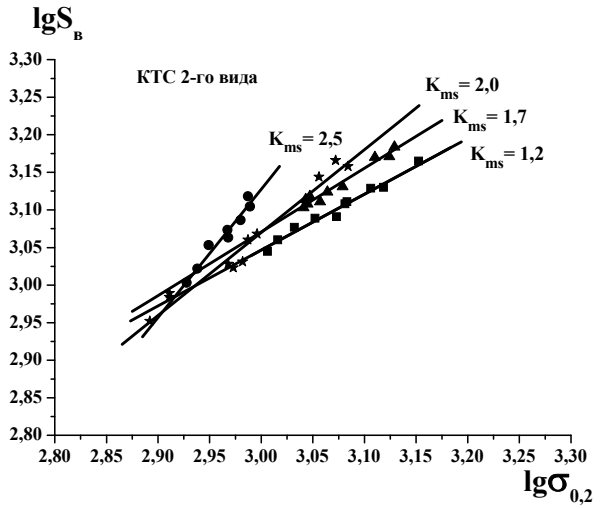
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Зависимости:

а, б) истинной равномерной деформации e_p от отношения предела прочности σ_B к прочности $\sigma_{0,2}$; в, г) истинного напряжения на пределе прочности S_B от прочности $\sigma_{0,2}$ при заданных значениях K_{ms} для двух видов КТС; ●, ξ, ▲, ■ – экспериментальные данные при K_{ms} = 2,5; 2,0; 1,7; 1,2 соответственно для КТС обеих групп /

Fig. 7. Dependences of:

a, b) the true uniform strain e_p on the ratio of ultimate strength σ_B to strength $\sigma_{0,2}$; c) d) the true stress at the limit of strength S_B from strength $\sigma_{0,2}$ given by K_{ms} values for two types of CTA; ●, ξ, ▲, ■ - experimental data at K_{ms} = 2.5; 2,0; 1.7; 1.2, respectively, for both groups of CTA.

Таким образом, зависимости $\psi_p = f(\sigma_B/\sigma_{0,2})$ и $\lg S_B = f(\lg\sigma_{0,2})$ можно объединить в систему уравнений:

$$\lg S_B = a + b\cdot\lg\sigma_{0,2}\,; \qquad (12)$$

$$\psi_p = c + d\cdot\sigma_B/\sigma_{0,2}\,, \qquad (13)$$

решение которой приводит к следующей общей для обеих групп КТС зависимости, описывающей характер изменения деформационного упрочнения при деформациях меньших и больших равномерной:

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} = \frac{10^{-m}+d}{1-c}\,, \qquad (14)$$

где: $m = a + (b-1)\cdot\lg\sigma_{0,2}$; a, b, c, d – коэффициенты, зависящие от уровня K_{ms}.

В работе [19] отмечено, что параметр $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ является важной характеристикой материала, которая отражает его пластические характеристики. Для удобства обозначим $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$, тогда (14) приобретет вид:

$$S = \frac{10^{-m}+d}{1-c}\,. \qquad (15)$$

Для установления причины параболического характера зависимостей $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const, экспериментально полученных в работе [4], рассмотрим систему уравнений, состоящую из зависимости (13) и зависимости $\psi_p = f(\psi_K, S)$, полученной для КТС в работе [20]:

$$\psi_p = c + d / S; \qquad (16)$$

$$\psi_P = \psi_K \cdot \frac{1 - S}{1 + 0{,}684 \cdot \psi_K - S}.$$

Решение системы уравнений (16) приводит к квадратному уравнению вида:

$$\psi_K = \frac{c \cdot S^2 + (d - c) \cdot S - d}{S^2 + (0{,}684 \cdot c - 1) \cdot S + 0{,}684 \cdot d}, \qquad (17)$$

где: $S = \sigma_{0,2} / \sigma_B$; c, d – коэффициенты, зависящие от уровня K_{ms}.

Уравнение (17) описывается параболической функцией, следовательно, зависимость $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const имеет параболический характер.

4. Обсуждение результатов

На рис. 8 приведен пример определения вида параболы для фиксированного уровня K_{ms} = 2,0 с использованием полученной зависимости (15). Коэффициенты a, b, c, d, входящие в (15) определяли, используя зависимости (12) и (13). При K_{ms} = 2,0 значения коэффициентов составляли: (А) для зависимостей на рис. 7 а, в: a = 0,1517; b = 0,9654; c = - 0,7975; d = 0,8295; (Б) для зависимостей на рис. 7 б, г: a = - 0,2423; b = 1,1035; c = - 0,7382; d = 0,7680. Из рис. 8 видно, что зависимостям $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ выпуклого вида (кривая 1) соответствует расчетная зависимость (кривая 1*), полученная с использованием (15) и группы (А) коэффициентов a, b, c, d. Соответственно, зависимостям $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ вогнутого вида (кривая 2) отвечает расчетная зависимость (кривая 2*), полученная с использованием (15) и группы коэффициентов (Б). При этом две различные группы экспериментальных данных КТС, используемые для построения кривых 1 и 2, соответствуют тем же двум группам, которые использовали для построения зависимостей, представленных на рис. 7 а, в и рис. 7 б, г. Из сказанного следует заключение о роли параметра $S = \sigma_{0,2} / \sigma_B$, величина которого играет определяющую роль при разделении КТС на два вида, первый из которых описывается выпуклыми параболическими зависимостями $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$, а второй – вогнутыми параболическими зависимостями $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при одном и том же условии K_{ms} = const.

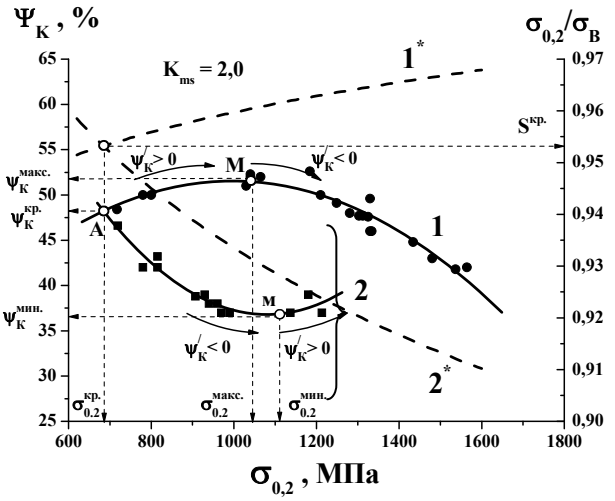


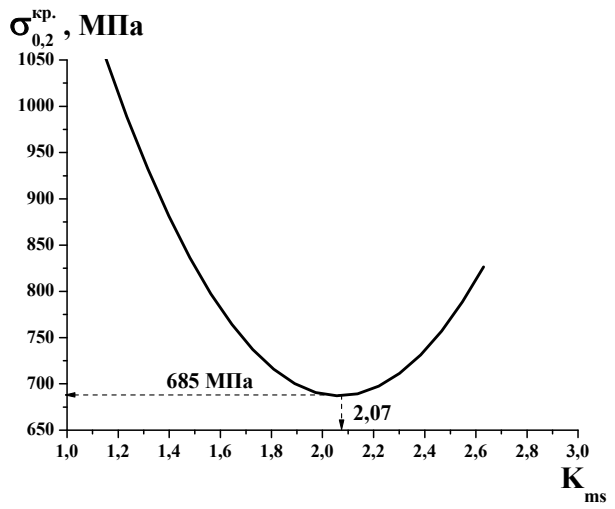
Рис. 8. Экспериментальные зависимости пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при K_{ms} = 2,0 для КТС: 1-го вида (выпуклые – кривая 1); 2-го вида (вогнутые – кривая 2); расчетные зависимости согласно (15): для КТС 1-го вида (кривая 1); для КТС 2-го вида (кривая 2*); ●, ■ – экспериментальные данные /*

*Fig. 8. Experimental dependence of the plasticity ψ_K on strength $\sigma_{0,2}$ at K_{ms} = 2.0 for CTA: of the 1st form (convex - curve 1); 2nd form (concave - curve 2); calculated according to (15): for the 1st form CTA (curve 1 *); for the 2nd type CTA (line 2 *); ●, ■ - the experimental data*

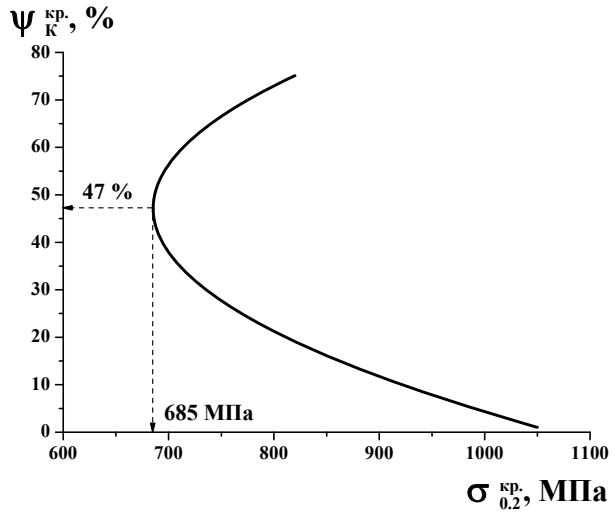
Особую роль играет критическая точка А пересечения двух парабол, в которой их вид не определен (см. рис. 8). Таким образом, значение S в точке А принимает критическое значение $S^{кр.}$, смысл которого заключается в том, что при $S \neq S^{кр.}$ сплавы разделяются на два вида: у одного вида $S > S^{кр.}$, а у другого $S < S^{кр.}$. Как видно из рис. 8, критическому значению $S^{кр.}$ соответствуют критическое значение пластичности $\psi_K^{кр.}$ и прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$, при этом любое изменение величины одного из критических параметров неминуемо приводит к изменению двух других. Очевидно, что это изменение носит качественный характер: при заданной прочности $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{кр.}$ КТС разделяются на два различных по качеству вида – с повышенной или сниженной пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, которые описываются, соответственно, выпуклой или вогнутой зависимостью $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const, а при $\sigma_{0,2} < \sigma_{0,2}^{кр.}$ имеет место обратная ситуация.

Используя значения критических характеристик пластичности $\psi_K^{кр.}$ и прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$, можно предложить методику для определения вида искомого КТС. В результате анализа, были

установлены зависимости $\sigma_{0,2}^{кр.} = f(K_{ms})$ и $\psi_K^{кр.} = f(\sigma_{0,2}^{кр.})$, которые представлены на рис. 9.



а)



б)

Рис. 9. Зависимости:

а) критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$ от уровня механической стабильности K_{ms}; б) критического значения пластичности $\psi_K^{кр.}$ от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$ /

Fig. 9. Dependences:

a) of critical value of strength $\sigma_{0,2}^{кр.}$ on the mechanical stability level K_{ms}; b) the critical value of plasticity $\psi_K^{кр.}$ on the critical strength $\sigma_{0,2}^{кр.}$

Из рис. 9 видно, что функция $\sigma_{0,2}^{кр.} = f(K_{ms})$ имеет параболический характер и описывается зависимостью:

$$\sigma_{0,2}^{кр.} = \mathrm{a} - \mathrm{b} \cdot \mathrm{K_{ms}} + c \cdot K_{ms}^2, \qquad (18)$$

где: a = 2550; b = 1804; c = 437 – эмпирические коэффициенты, а функция $\psi_K^{кр.} = f(\sigma_{0,2}^{кр.})$ имеет вид параболы, ось которой параллельна оси абсцисс, и описывается зависимостью:

$$\psi_K^{кр.} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot c \cdot (a - \sigma_{0,2}^{кр.})}}{2 \cdot c}, \qquad (19)$$

где: a = 1066; b = 16; c = 0,17 – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, можно сформулировать экспресс-метод для определения принадлежности конструкционных сплавов к определенному виду:

– зная величину характеристики механической стабильности K_{ms} выбранного КТС, определяют критическое значение прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$, используя зависимость (18);

– определяют критическое значение пластичности $\psi_K^{кр.}$, используя зависимость (19). При этом необходимо выполнять условие: если у выбранного сплава $\psi_K \geq 47\%$ (см. рис. 9 б), то перед квадратным корнем в уравнении (19) следует использовать знак «+», если же $\psi_K < 47\%$, то знак «-»;

– определяют принадлежность КТС к определенному виду, придерживаясь следующих условий: если 1) у выбранного сплава $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{кр.}$, а $\psi_K > \psi_K^{кр.}$, то сплав принадлежит к 1-му виду (с повышенной пластичностью при заданной прочности $\sigma_{0,2}$), если $\psi_K \leq \psi_K^{кр.}$, то сплав принадлежит ко 2-му виду (с пониженной пластичностью при заданной прочности $\sigma_{0,2}$); 2) у выбранного сплава $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{кр.}$, а $\psi_K \leq \psi_K^{кр.}$, то сплав принадлежит к 1-му виду, если же у сплава $\psi_K > \psi_K^{кр.}$, то – ко 2-му виду (исследованная выборка КТС не содержала таких сплавов).

Из общего объема исследованных КТС можно выделить следующие, относящиеся к 1-му виду:

– некоторые высокопрочные сплавы, в которых стандартными (печными) методами термической обработки было сформированы структурные состояния, характеризуемые средней прочностью и повышенной пластичностью, например, сплав ВТ16 (ψ_K = 57%, $\sigma_{0,2}$ = 900 МПа при уровне K_{ms} = 2,1); сплав ВТ3 (ψ_K = 48%, $\sigma_{0,2}$ = 1040 МПа при уровне K_{ms} = 1,9); а также пластичное состояние сплава Ti-10V-2Fe-3Al, полученного по порошковой технологии (ψ_K = 17,5%, $\sigma_{0,2}$ = 1010 МПа при уровне K_{ms} = 1,5);

– высокопрочные сплавы метастабильного β-класса, термически упрочненные на высокие значения прочности и характеризуемые умеренным уровнем пластичности, например, сплав TIMETAL-LCB (ψ_K = 42%, $\sigma_{0,2}$ = 1340 МПа при уровне K_{ms} = 2,0); сплав Beta-21S (ψ_K = 32%, $\sigma_{0,2}$ = 1655 МПа при уровне K_{ms} = 1,9); сплав Ti-10V-2Fe-3A,

полученный по порошковой технологии (ψ_K = 13,6%, $\sigma_{0,2}$ = 1170 МПа при уровне K_{ms} = 1,1).

Ко 2-му виду относятся:

– некоторые сплавы термоупрочненные таким образом, что в них была сформирована микроструктура, обеспечивающая средние уровни как прочности, так и пластичности: например, сплав ВТ22 (ψ_K = 16%, $\sigma_{0,2}$ = 1190 МПа при уровне K_{ms} = 1,5); сплав ВТ23 (ψ_K = 23,5%, $\sigma_{0,2}$ = 1200 МПа при уровне K_{ms} = 1,65); высоколегированный порошковый сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (ψ_K = 12,7%, $\sigma_{0,2}$ = 905 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 (ψ_K = 37%, $\sigma_{0,2}$ = 1270 МПа при уровне K_{ms} = 1,95); сплав Beta-21S (ψ_K = 23%, $\sigma_{0,2}$ = 1540 МПа при уровне K_{ms} = 1,75); а также термоупрочненное состояние порошкового сплава Ti-10V-2Fe-3A с дисперсным зерном (ψ_K = 15%, $\sigma_{0,2}$ = 1240 МПа при уровне K_{ms} = 1,5).

Используя эмпирические коэффициенты $a_{1,2}$, $b_{1,2}$ и $c_{1,2}$ для параболических зависимостей $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при K_{ms} = const обоих видов:

$$\psi_K = a \pm b \cdot \sigma_{0,2} \mp c \cdot \sigma_{0,2}^2, \qquad (20)$$

определяли критические значения пластичности $\psi_K^{кр.}$ и прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$ на этих уровнях, решая уравнение:

$$a_1 + b_1 \cdot \sigma_{0,2}^{кр.} - c_1 \cdot \left(\sigma_{0,2}^{кр.}\right)^2 = \mathrm{a}_2 - b_2 \cdot \sigma_{0,2}^{кр.} + c_2 \cdot \left(\sigma_{0,2}^{кр.}\right)^2 \qquad (21)$$

сначала относительно характеристики прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$, а затем, подставляя полученные значения в соответствующую заданному уровню K_{ms} зависимость $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$, рассчитывали значения $\psi_K^{кр.}$. Затем определяли критические значения параметра $S^{кр.}$, используя зависимость (15). Величины коэффициентов $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$, $d_{1,2}$, входящих в (15), определяли для некоторых уровней K_{ms}, используя зависимости, аналогичные представленным на рис. 7 для каждого из видов КТС. Значения коэффициентов $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$, $d_{1,2}$ для некоторых фиксированных уровней K_{ms} КТС обоих видов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$, $d_{1,2}$ в зависимости (15) для некоторых фиксированных уровней K_{ms} /

The values of the $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$, $d_{1,2}$ coefficients according to (15) to some fixed levels of K_{ms}

Уровень K_{ms}	КТС 1-го вида				КТС 2-го вида			
	a_1	b_1	c_1	d_1	a_2	b_2	c_2	d_2
2,5	0,0427	1,0028	-0,8979	0,9250	-1,9953	1,7091	-0,7779	0,8249
2,2	0,0934	0,9827	-0,8522	0,8753	-0,5482	1,2095	-0,7662	0,8018
2,0	0,1517	0,9654	-0,7975	0,8295	-0,2423	1,1035	-0,7382	0,7680
1,8	0,2422	0,9345	-0,7361	0,7688	-0,0975	1,0519	-0,6955	0,7195
1,7	0,3081	0,9133	-0,7012	0,7315	-0,0622	1,0397	-0,6571	0,6725
1,5	0,4898	0,8573	-0,6112	0,6406	-0,0246	1,0275	-0,5481	0,5497
1,4	0,6209	0,8131	-0,5549	0,5718	-0,0187	1,0263	-0,4687	0,4707
1,3	0,7856	0,7625	-0,4942	0,5217	-0,0102	1,0260	-0,3482	0,3678
1,2	0,9886	0,6971	-0,4293	0,4438	-0,0069	1,0258	-0,2137	0,2336

Значения характеристик $\psi_K^{макс.}$, $\psi_K^{мин.}$ и $\sigma_{0,2}^{макс.}$, $\sigma_{0,2}^{мин.}$ в точках экстремумов функции $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при K_{ms} = const находили, определяя значения производной $\psi_K^{/} = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ и используя известные формулы:

$$\sigma_{0,2}^{макс.}, \sigma_{0,2}^{мин.} = -\frac{\mathrm{b}_{1,2}}{2 \cdot c_{1,2}}; \psi_K^{макс.}, \psi_K^{мин.} = a_{1,2} - \frac{\mathrm{b}_{1,2}^2}{4 \cdot c_{1,2}}. \qquad (22)$$

В таблице 2 приведены значения критических характеристик $S^{кр.}$, $\psi_K^{кр.}$, $\sigma_{0,2}^{кр.}$ и характеристик $\psi_K^{макс.}$, $\psi_K^{мин.}$, $\sigma_{0,2}^{макс.}$, $\sigma_{0,2}^{мин.}$ в точках экстремумов функций $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при некоторых фиксированных уровня механической стабильности K_{ms}.

Таблица 2

Значения характеристик $S^{кр.}$, $\psi_K^{кр.}$, $\sigma_{0,2}^{кр.}$ и $\psi_K^{макс.}$, $\psi_K^{мин.}$, $\sigma_{0,2}^{макс.}$, $\sigma_{0,2}^{мин.}$ при некоторых фиксированных уровнях K_{ms} /

Values of $S^{кр.}$, $\psi_K^{кр.}$, $\sigma_{0,2}^{кр.}$ $\psi_K^{макс.}$, $\psi_K^{мин.}$, $\sigma_{0,2}^{макс.}$, $\sigma_{0,2}^{мин.}$ characteristics at some fixed levels

K_{ms}	$S^{кр.}$ (15)	$\psi_K^{кр.}$ % (21)	$\sigma_{0,2}^{кр.}$ МПа (21)	$\psi_K^{макс.}$ % (22)	$\psi_K^{мин.}$, % (22)	$\sigma_{0,2}^{макс.}$, МПа (22)	$\sigma_{0,2}^{мин.}$, МПа (22)
2,5	0,956	68,5	765	68,7	50,7	630	1150
2,2	0,960	59,8	710	60,6	43,5	895	1150
2,0	0,953	48,2	685	52,5	33,4	1065	1160
1,8	0,950	36,3	705	44,7	26,5	1165	1170
1,7	0,942	31,2	735	44,0	22,6	1275	1175
1,5	0,923	17,0	840	31,5	13,6	1295	1195
1,4	0,915	12,3	885	28,1	10,1	1320	1210
1,3	0,908	7,6	955	22,4	6,7	1350	1235
1,2	0,893	4,6	1000	21,6	--	1355	--

Анализ рис. 8 и таблицы 2 показывает, что отмеченная в работе [19] обычная тенденция к снижению параметра S с увеличением пластичности не всегда имеет место и требует уточнения. Как

видно из рис. 8 указанная тенденция наблюдается у конструкционных сплавов только в случае, если $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{макс.}$ для КТС, принадлежащих к 1-му виду (сравнить кривые 1 и 1*) и при $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{мин.}$ для сплавов, принадлежащих ко 2-му виду (сравнить кривые 2 и 2*). Однако при $\sigma_{0,2} \le \sigma_{0,2}^{макс.}$ и $\sigma_{0,2} \le \sigma_{0,2}^{мин.}$ наблюдается обратная тенденция – увеличение пластичности ψ_K сопровождается повышением величины параметра S для КТС, принадлежащих к 1-му виду (сравнить кривые 1 и 1*), а для сплавов, принадлежащих ко 2-му виду снижение ψ_K сопровождается снижением S (сравнить кривые 2 и 2*). Такие особенности поведения величины параметра S необходимо учитывать в инженерной и технологической практике.

Учитывая простоту определения, практическую важность параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$ и его определяющую роль в разделении КТС на два качественно различных вида, имеет смысл более детально изучить особенности его поведения и возможные связи с базовыми механическими характеристиками металла. В связи с этим был осуществлен поиск функциональных связей коэффициентов a, b, c, d, входящих в зависимость (15), с характеристикой механической стабильности K_{ms} для каждого из видов КТС. Функции для аппроксимации зависимостей $a,b,c,d = f(K_{ms})$ и значения входящих в них эмпирических коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Функции для аппроксимации зависимостей $a,b,c,d = f(K_{ms})$ и значения входящих в них эмпирических коэффициентов для двух видов КТС /
Functions for the $a,b,c,d = f(K_{ms})$ dependences approximation and values of empirical coefficients contained in them for the two types of CTA

Вид	Коэф. в (15)	Функция	a	b	c
1	a_1	$a_1 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms})$	16,4705	- 2,3426	-
	b_1	$b_1 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	- 4,7671	- 2,2490	1,0180
	c_1	$c_1 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	2,6028	- 1,2330	-1,0200
	d_1	$d_1 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	2,9704	- 1,3581	1,0253
2	a_2	$a_2 = a \cdot (b)^{K_{ms}}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	73,8278	-
	b_2	$b_2 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	$1 \cdot 10^{-5}$	4,3029	1,0204
	c_2	$c_2 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	17,9300	- 2,8498	-0,7969
	d_2	$d_2 = a \cdot \exp(b \cdot K_{ms}) + c$	- 11,7747	- 2,4491	0,8549

Таким образом, использование зависимости (15) и данных таблицы 2, может быть полезно для инженерных прогнозов или составления технологических карт с целью повышения свойств металла с точки зрения его сопротивляемости охрупчиванию.

Решая совместно уравнения (15) и (20), можно найти связь между характеристикой пластичности ψ_K и параметром S для каждого из видов КТС:

– для 1-го вида:

$$\psi_K = a_1 + b_1 \cdot \sigma_{0,2} - c_1 \cdot \sigma_{0,2}^2 ; \qquad (23)$$

– для 2-го вида:

$$\psi_K = a_2 - b_2 \cdot \sigma_{0,2} + c_2 \cdot \sigma_{0,2}^2 , \qquad (24)$$

где: $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$ – эмпирические коэффициенты для параболических зависимостей $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при K_{ms} = const обоих видов для заданных уровней K_{ms},

$$\sigma_{0,2} = 10^p , \qquad (25)$$

$$p = \frac{a_{1,2} - \lg[S \cdot (1 - c_{1,2}) - d_{1,2}]}{b_{1,2} - 1} , \qquad (26)$$

где: $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$, $d_{1,2}$ – коэффициенты в зависимости (15) для 1-го и 2-го видов КТС, представленные для некоторых фиксированных уровней K_{ms} в таблице 1, а в виде функциональных зависимостей от K_{ms} – в таблице 3.

В качестве примера на рис. 10 представлены зависимости $\psi_K = \mathrm{f}(S)$ для двух видов КТС при K_{ms} = 2,0.

Для более полного понимания поведения зависимостей $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const представляет интерес оценить наблюдаемую на рис. 1 тенденцию изменения «раствора» парабол, описывающих эту зависимость, относительно изменения уровня характеристики механической стабильности. Как известно, размер «раствора» параболы можно измерить величиной радиуса кривизны в вершине параболы R, которая в нашем случае является геометрической интерпретацией интенсивности изменения пластичности ψ_K при изменении прочности $\sigma_{0,2}$, т.е. величины $d\psi_K / d\sigma_{0,2}$ при фиксированном уровне механической стабильности K_{ms}. Радиус кривизны в вершине парабол, полученных в соответствии с зависимостями (20) для различных фиксированных уровней K_{ms} определяли по следующим формулам:

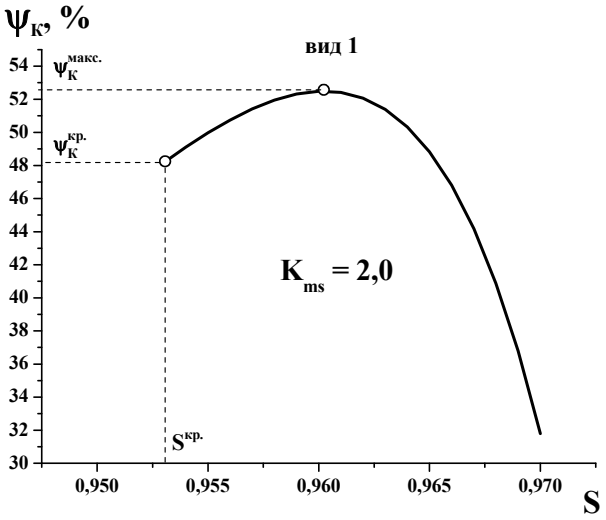
– для КТС 1-го вида:

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{0,2}^{макс.} \cdot |c_1|} , \text{[МПа]} \qquad (27)$$

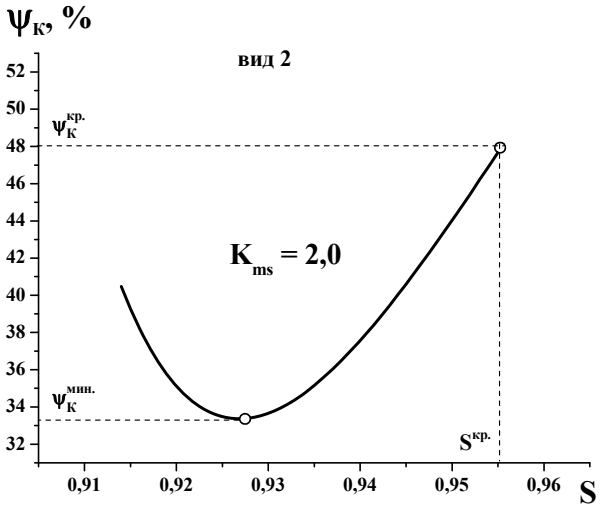
– для КТС 2-го вида:

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{0,2}^{мин.} \cdot |c_2|} , \text{[МПа]} \qquad (28)$$

где: $c_{1,2}$ – параметры парабол зависимости (20).



а)



б)

Рис. 10. Зависимости характеристики пластичности ψ_K от параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$ при K_{ms} = 2,0:

а) для 1-го вида КТС; б) для 2-го вида КТС/

Fig. 10. Dependences of the plasticity ψ_K characteristics on the $\sigma_{0,2}/\sigma_B = S$ parameter at K_{ms} = 2,0:

a) for the 1st type CTA; b) for the 2nd type CTA

Используя полученные таким образом значения радиусов кривизны парабол для обоих видов КТС, удалось найти зависимости $R_{1,2} = f(K_{ms})$, которые представлены на рис. 11.

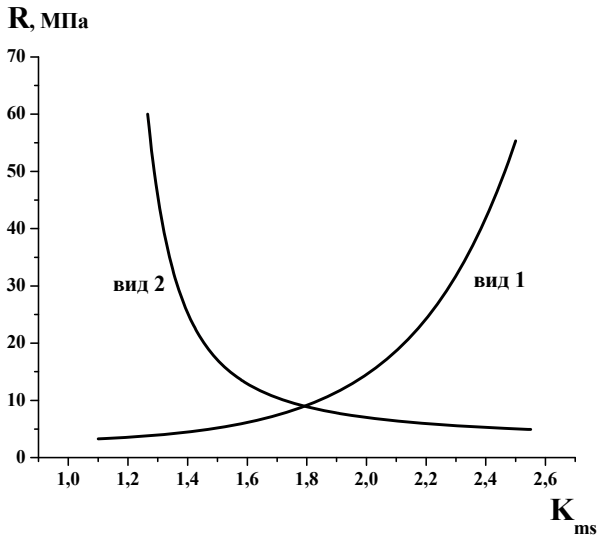


Рис. 11. Зависимости радиусов кривизны в вершине параболы $R_{1,2}$ от уровня механической стабильности K_{ms} для разных видов КТС /

Fig. 11. The dependence of the curvature radius at the vertex of the parabola $R_{1,2}$ on the level of mechanical stability K_{ms} for different types of CTA.

Проведенный анализ показал, что зависимости $R_{1,2} = f(K_{ms})$ хорошо описываются следующими экспоненциальными функциями:

– для КТС 1-го вида:

$$R_1 = a \cdot \exp\left(\frac{b}{K_{ms} - c}\right), \qquad (29)$$

где: a = 2,419 [МПа]; b = 1,166; c = 0,903 – эмпирические коэффициенты;

– для КТС 2-го вида:

$$R_2 = a + b \cdot \exp(c \cdot K_{ms}), \qquad (30)$$

где: a = 2,417 [МПа]; b = 0,033 [МПа]; c = 2,950 – эмпирические коэффициенты.

Анализ интенсивности изменения пластичности ψ_K при изменении прочности $\sigma_{0,2}$ на заданном уровне механической стабильности K_{ms} при помощи показателя R может быть весьма полезен как при оценке качества металла, так и для планирования технологических операций по повышению этого показателя для КТС.

5. Выводы

1. Конструкционные титановые сплавы независимо от соотношения значений показателей деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной делятся на два различных по качеству вида – с повышенной или сниженной пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, которые описываются, соответственно, выпуклой или вогнутой параболической зависимостью $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при

условии заданной механической стабильности K_{ms}.

2. Отношение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ к пределу прочности σ_B влияет на вид параболической зависимости $\psi_K = \mathrm{f}(\sigma_{0,2})$ при условии K_{ms} = const, определяя ее выпуклость или вогнутость. Для высокопрочных конструкционных титановых сплавов 1-го вида в интервале изменения $\sigma_{0,2}$ от 1000 МПа до 1400 МПа и уровня механической стабильности в пределах 2,09 ≤ K_{ms} ≤ 2,16 отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ остается практически неизменным (0,95 – 0,96), а для сплавов средней прочности 2-го вида в интервале изменения $\sigma_{0,2}$ от 850 МПа до 1000 МПа и уровня механической стабильности в пределах 2,42 ≤ K_{ms} ≤ 2,66 $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ варьируется в интервале от 0,94 до 0,76.

3. Характеристика пластичности ψ_K связана с величиной отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. Эта связь определяется видом конструкционного титанового сплава и зависит от уровня механической стабильности K_{ms}.

4. Геометрическая интерпретация интенсивности изменения пластичности ψ_K при изменении прочности $\sigma_{0,2}$ на заданном уровне механической стабильности K_{ms} для конструкционных титановых сплавов может быть дана при помощи показателя величины радиуса кривизны в вершине параболы R – чем меньше R, тем интенсивнее изменяется пластичность ψ_K при возрастании прочности $\sigma_{0,2}$. Для каждого из видов сплавов зависимость $R = f(K_{ms})$ имеет противоположный характер – для 1-го вида показатель R растет с повышением уровня механической стабильности, а для 2-го вида, наоборот, величина R с повышением уровня K_{ms} падает.

Список использованных источников

1.Котречко С.А., Мешков Ю.Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – Киев: Наук. думка, 2008. – 295 с.
Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya. Ultimate strength. Kristalls, metalls, constructions. – Kiev: Nauk. dumka, 2008. – 295 p.
http://vindo.com.ua/razdel188/file1438330.html

2.Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Связь характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – 35, № 4. – С. 479–496.
Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Connection of "fragile" strength characteristics and mechanical stability to the basic mechanical properties of structural titanium alloys // Metallofizika i noveyshie tehnologii. – 2013. – 35, № 4. – pp. 479–496.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v35/i04.html

3.Шиян А.В. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – 33, № 12. – С. 1703–1716.
Shiyan A.V. Physical justification for the classification criteria for structural steels strength // Metallofizika i noveyshie tehnologii. – 2011. – 33, # 12. – S. 1703–1716.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v33/i12.html

4.Патент 103814, МПК 13, G01N, № 3/00, 3/18. Україна. Спосіб визначення оптимального поєднання пластичності, міцності і механічної стабільності конструкційних металевих сплавів / Ивасишин О.М., Марковський П.Є., Матвійчук Ю.В., Котречко С.О., Мєшков Ю.Я., Шиян А.В., Стеценко Н.М. // Промислова власність. – 2013. – Бюл. № 22.
Patent 103814, MPK 13, G01N, # 3/00, 3/18. Ukraina. The method of determining the optimal combination of ductility, strength and mechanical stability of structural metal alloys / Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., MatvIychuk Yu.V., Kotrechko S.O., MEshkov Yu.Ya., Shiyan A.V., Stetsenko N.M. // Promislova vlasnist. – 2013. – Byul. # 22.
http://uapatents.com/9-103814-sposib-viznachennya-optimalnogo-poehdnannya-plastichnosti-micnosti-i-mekhanichno-stabilnosti-konstrukcijjnikh-metalevikh-splaviv.html

5.Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных титановых сплавов в области неравномерной деформации // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – 35, № 1. – С. 129–141.
Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Laws of the change in the strain hardening of structural titanium alloys in the field of non-uniform deformation // Metallofizika i noveyshie tehnologii. – 2013. – 35, # 1. – S. 129–141.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v35/i01.html

6.Markovsky P.E., Ikeda M. Balancing of Mechanical Properties of Ti-4.5Fe-7.2Cr-3.0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment // Mater. Trans. – 2005. – 46, № 7. – P. 1515–1524.
http://tinyurl.com/pg9xzk6

7.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 β-titanium alloys // J. of Alloys and Compounds. – 2008. – 457. – P. 296–309.
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838807006998

8.Ivasishin O.M., Markovsky P.E., Pakharenko G.A., Shevchenko A.V. Mechanical properties of (α+β) titanium alloys at cryogenic temperatures // Material Science & Engineering. – 1995. – A196. – P. 65–70.
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0921509394097070

9.Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Мешков Ю.Я., Пахаренко Г.А., Шевченко А.В. Влияние структуры на сопротивление хрупкому разрушению и запас вязкости отожженного титанового сплава ВТ16 // Металлофизика. 1992. – 14, № 4. – С. 70–74.
Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., Meshkov Yu.Ya., Paharenko G.A., Shevchenko A.V. Influence of structure on resistance to brittle fracture and viscosity allowance of annealed titanium alloy BT16// Metallofizika. 1992. – 14, № 4. – p. 70–74.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/browse.html

10. Ivasishin O.M., Savvakin D.G. The Impact of Diffusion on

Synthesis of High-Strength Titanium Alloys from Elemental Powder Blends // Key Engineering Materials. – 2010. – 436. – P. 113–121.
http://www.scientific.net/KEM.436.113
11. Ивасишин О.М., Д.Г. Саввакин Д.Г., Матвийчук М.В., Бондарчук В.И. Микроструктура и свойства сплава Ti-10V-2Fe-3Al, синтезированного методом порошковой металлургии // Технология легких сплавов. – 2009. – №2. – С. 70–76.
Ivasishin O.M., D.G. Savvakin D.G., Matviychuk M.V., Bondarchuk V.I. The microstructure and properties of the Ti-10V-2Fe-3Al alloy, synthesized by powder metallurgy // Tehnologiya legkih splavov. – 2009. –№2. – p. 70–76.
http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/handle/123456789/31606
12. Ивасишин О.М., Д.Г. Саввакин Д.Г., Матвийчук М.В., Моляр О.Г. Вплив способу легування на мікроструктуру і властивості сплаву Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, синтезованого методом сумішей порошкових компонентів // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2009. – № 4. – С.79–84.
Ivasishin O.M., D.G. Savvakin D.G., Matviychuk M.V., Molyar O.G. Influence of doping on the microstructure and properties of the Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr alloy, synthesized by the method of powder mixtures of components // Naukovi visti NTUU KPI. – 2009. – № 4. – p.79–84.
http://tinyurl.com/ocleldl
13. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – 1, 2.
The strength of materials and structural elements under extreme conditions / edited by G.S. Pisarenko. – Kiev: Nauk. dumka, 1980. – 1, 2
http://www.twirpx.com/file/783871
14. 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. - Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.
Fracture mechanics and strength of materials: Reference guide in 4 Vols. / edited by V.V. Panasyuka. – V. 3: Features of short fracture toughness of materials and methods of their determination. - Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 436 s.
http://vova1001.narod.ru/00002490.htm
15. Кошелев П.Ф., Беляев С.Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах // М.: Машиностроение, 1967. – 315 с.
Koshelev P.F., Belyaev S.E. Strength and ductility of structural materials at low temperatures // M.: Mashinostroenie, 1967. – 315 p.
http://www.setbook.com.ua/books/1561676.html
16. Hickey C.F. Mechanical properties of titanium and aluminum alloys at cryogenic temperatures // Proceedings ASTM. – 1962. – 62. – P. 765–777.
17. Belton J.H. et al., Materials for use at liquid hydrogen temperature // ASTM Spec. Techn. Publ. – 1960. – No. 287: – P. 108.
http://tinyurl.com/pu3kqou
18. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Физические основы экспресс-метода для определения хрупкой прочности конструкционных сталей // Металлофизика и новейшие технологии. – 2010. – 32, № 8. С. 1123–1140.
Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Physical basis of a rapid method for determining the brittle strength of structural steels // Metallofizika i noveyshie tehnologii. – 2010. – 32, № 8. p. 1123–1140.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/browse.html
19. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М: Металлургия, 1983. – 352 с.
Zolotorevskiy V.S. Mechanical properties of metals. – M: Metallurgiya, 1983. – 352 p.
http://www.twirpx.com/file/487266/
20. Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Связь величины равномерной деформации с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов при одноосном растяжении // Металлофизика и новейшие технологии. – 2012. – 34, № 12. – С. 1643–1654.
Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Correlation of the uniform strain and the basic mechanical properties of structural titanium alloy under uniaxial tension // Metallofizika i noveyshie tehnologii. – 2012. – 34, № 12. – p. 1643–1654.
http://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v34/i12.html

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Большаковым В. И (Украина); д-ром техн. наук, проф. Вахрушевой В. С. (Украина)

Статья поступила в редколлегию 12.06.2015 г.