

PACS numbers: 46.50.+a, 61.72.Hh, 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.mj, 62.20.mm

## **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

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

Рассмотрен вопрос связи характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$  при пластических деформациях, больших равномерной. Установлены зависимости между значением эквивалентной деформации  $e_{\text{экр.}}$  и показателями деформационного упрочнения или их комбинацией в области неравномерной пластической деформации, позволяющие прогнозировать величину характеристик «хрупкой» прочности  $R_X$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов в интервале температур испытаний от 77 К до 293 К. Установлена связь полученных зависимостей с температурой испытаний. Приведены результаты расчёта характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  для некоторых конструкционных титановых сплавов, относящихся к различным группам, а также проведена оценка точности разработанной методики. Показана инвариантность полученных зависимостей к различным сочетаниям прочностных и пластических свойств конструкционных титановых сплавов и режимам их термической обработки.

Розглянуто питання зв'язку характеристик «крихкої» міцності та механічної стабільності з базовими механічними характеристиками конструкційних титанових сплавів  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  і  $\psi_K$  при пластичних деформаціях, більших за рівномірну. Встановлено залежності між значенням еквівалентної деформації  $e_{\text{екв.}}$  і показниками деформаційного зміцнення або їх комбінацією в області нерівномірної пластичної деформації, які дозволяють прогнозувати величину характеристик «крихкої» міцності  $R_X$  та механічної стабільності  $K_{ms}$  конструкційних титанових сплавів в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К. Встановлено зв'язок отриманих залежностей з температурою випробувань. Наведено результати розрахунку характеристик  $R_X$  та  $K_{ms}$  для деяких конструкційних титанових сплавів, що відносяться до різних груп, а також проведено оцінку точності ро-

зробленої методики. Показано інваріантність отриманих залежностей до різних сполучень властивостей міцності і пластичності конструкційних титанових сплавів і режимам їх термічної обробки.

Problem of relation of characteristics of 'brittle' strength and mechanical stability with main mechanical characteristics of structural titanium alloys— $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_B$  and  $\psi_K$ —at plastic strains greater than uniform strain is considered. Dependences between the value of equivalent strain  $e_{eq}$  and strain hardening exponents or their combination over the range of non-uniform strain are ascertained. They enable to predict the value of 'brittle' strength  $R_x$ , and mechanical stability  $K_{ms}$  of structural titanium alloys over the temperature range from 77 K to 293 K. Relation of obtained dependences with test temperature is ascertained. Results of calculation of  $R_x$  and  $K_{ms}$  for some structural titanium alloys of different groups are given. Accuracy of developed technique is estimated as well. Invariance of above dependences to different combination of strength and ductile properties of structural titanium alloys and their heat treatment schedules is exhibited.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, «хрупкая» прочность, механическая стабильность, эквивалентная деформация, интенсивность деформационного упрочнения.

(Получено 20 сентября 2012 г.)

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В существующей методологии оценки качества металлических сплавов определяются не ключевые механические характеристики, влияющие на «хрупкость» или возможность пластического поведения металла, а характеристики, лишь косвенно отражающие степень его удаленности от «хрупкого» состояния при соответствующем виде испытания:  $\psi_K$ ,  $\delta_K$  ( $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$ ) — относительное сужение и относительное удлинение после разрушения образца, определяемые при испытании стандартных гладких образцов на одноосное статическое растяжение, а также ударная вязкость ( $KCV$  — удельная работа разрушения с надрезом Шарпи,  $KCU$  — с надрезом Менаже), определяемая при динамических (ударных) испытаниях. Таким образом, несмотря на многолетнюю практику применения этих характеристик для оценки качества металла, ни одна из них не стала полноценной инженерной расчетной характеристикой надежности в условиях конструкции, так как отсутствует само понятие физически обоснованных «допускаемых» величин  $\psi_K$  или  $KCV$  ( $KCU$ ).

Одним из путей преодоления этого недостатка традиционных показателей пластичности и вязкости является использование новых механических характеристик (коэффициента  $K_{ms}$  и показателя  $P_{ms}$  механической стабильности), которые характеризуют запас силовой надежности металла, как при одноосном растяжении, так и в

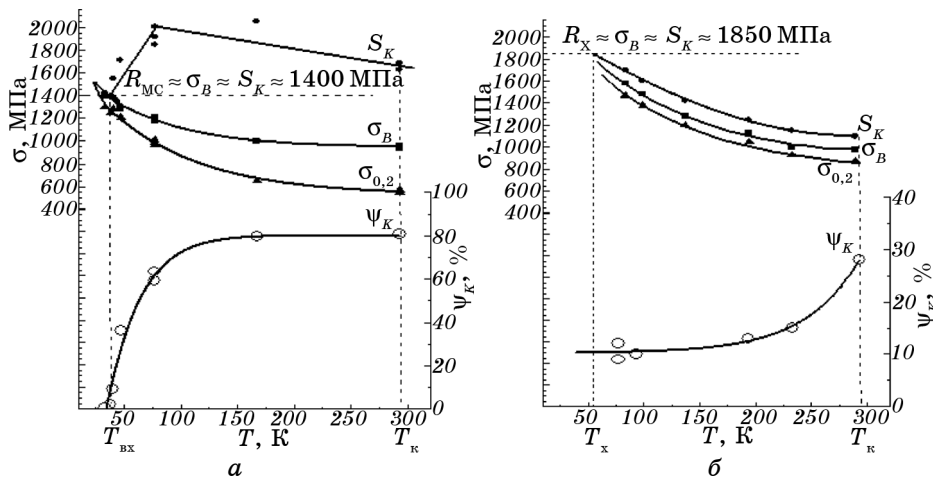
условиях охрупчивающего действия факторов конструкции [1–3]. Значение коэффициента механической стабильности  $K_{ms}$  для конструкционных сталей определяется как соотношение значений двух механических характеристик  $\sigma_2$  и  $R_{MC}$ . Первая характеристика  $\sigma_2$  — это прочность пластичного металла при критической степени деформации  $e_c = 2\%$  [1, 2]. Вторая характеристика  $R_{MC}$  — это прочность того же металла при критической степени деформации  $e_c = 2\%$ , но уже не в пластическом состоянии, а в состоянии перехода из пластического в хрупкое в условиях одноосного растяжения при нижней температуре вязко-хрупкого перехода  $T_{вх}$  (рис. 1, а). Согласно [1, 2]:

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

где  $n$  — показатель деформационного упрочнения.

Таким образом, для характеристик прочности конструкционных сталей условие перехода в хрупкое состояние при одноосном растяжении выглядит следующим образом:  $\sigma_B \approx S_K \approx R_X \approx R_{MC}$ . При этом характеристика пластичности  $\psi_K \approx 2\%$  [4].

В работе [5] показано, что для большинства конструктивных титановых сплавов характер температурной зависимости истинного напряжения разрушения  $S_K$  отличается от аналогичной зависимости для конструкционных сталей. Если для металлов с ОЦК-решеткой (типичные конструкционные стали) обычным является



**Рис. 1.** Температурные зависимости механических характеристик металлических сплавов для определения «хрупкой» прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ): конструкционная сталь 15X2НМФА (состояние поставки) [4] (а), конструктивный титановый сплав ВТ16 (нагрев 1050°С, 1 час, закалка в воду 700°С, 5 час.) [5] (б).

превышение величины  $S_K$  над уровнем хрупкой прочности  $R_{MC}$  в интервале от комнатной температуры испытаний  $T_K$  до критической температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{вх}$  (рис. 1, а), то для металлов с ГПУ-решеткой (большинство конструктивных титановых сплавов) величина  $S_K$  в интервале от  $T_K$  до критической температуры перехода в «хрупкое» состояние  $T_x$  оказывается ниже уровня «хрупкой» прочности (рис. 1, б). Здесь под «хрупкостью» (переходом в «хрупкое» состояние) понимают состояние металла, которое возникает в результате повышения предельной прочности  $\sigma_B$  до уровня «хрупкой» прочности при снижении температуры и под действием факторов напряженного состояния. В этом случае металл обладает единственным значением прочности и в условиях одноосного растяжения для конструктивных титановых сплавов эту прочность можно назвать «хрупкой»  $\sigma_B \approx S_K \approx R_x$ . При этом происходит исчерпание (потеря) механической стабильности металла, т.е.  $K_{ms} \rightarrow 1$ , а величина характеристики пластичности  $\psi_K$  снижается до уровня нескольких процентов, т.е., по аналогии с конструктивными сталями, можно принять  $\psi_K \approx 2\%$  [5]. В такой постановке характеристику  $R_x$  можно сравнить с характеристикой сопротивления отрыву, которая в [6] интерпретируется как напряжение, при котором образец, получивший уже определенную деформацию, разорвется в случае, если дальнейшая деформация почему-либо будет невозможна (например, путем понижения температуры или присоединения к главному растягивающему напряжению  $\sigma_{11}$  двух других —  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  в случае сложного напряженно-деформированного состояния).

Таким образом, для конструктивных титановых сплавов зависимость (1) примет вид:

$$K_{ms} = \frac{R_x}{\sigma_{0,2} 10^n}. \quad (2)$$

Здесь следует заметить, что показатели «хрупкой» прочности  $R_x$  ( $R_{MC}$ ) и механической стабильности  $K_{ms}$  следует считать базовыми характеристиками металлических сплавов.

Из (2) видно, что на величину  $K_{ms}$  значительное влияние оказывает показатель деформационного упрочнения  $n$ . При использовании общепринятой степенной аппроксимации кривой деформационного упрочнения величина показателя деформационного упрочнения определяется следующим образом:

$$n = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_p / 0,002)}, \quad (3)$$

где  $S_B$  — истинное напряжение на пределе прочности

$$S_B = \sigma_B(1 + \delta_p) = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p}, \quad (4)$$

$e_p$  — истинная равномерная деформация

$$e_p = \ln(1 + \delta_p) = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi_p}\right) = -\ln(1 - \psi_p). \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), получим:

$$n = \frac{\lg\left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}(1 - \psi_p)}\right]}{\lg[-500 \ln(1 - \psi_p)]} = \frac{\lg\left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}}(1 + \delta_p)\right]}{\lg[500 \ln(1 + \delta_p)]}. \quad (6)$$

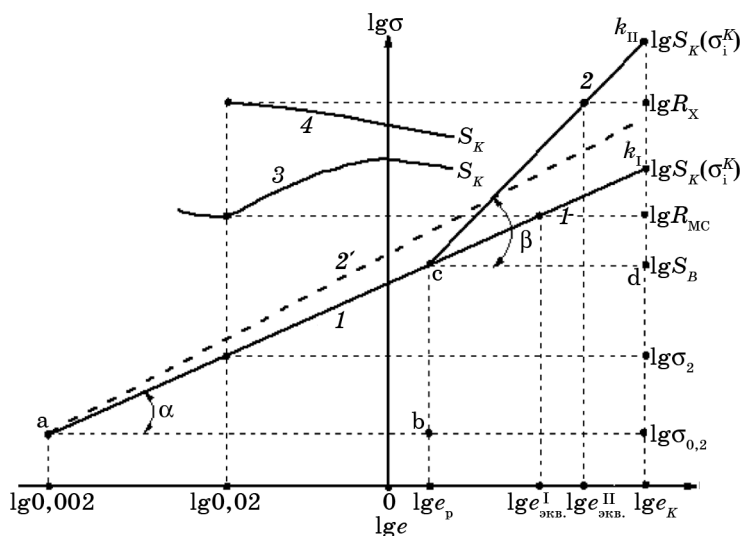
Известно, что экспериментальное определение характеристики «хрупкой» прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) конструкционных металлических сплавов связано со значительными методическими и техническими трудностями [1, 3]. Это обусловлено уровнем критической температуры перехода в «хрупкое» состояние, при котором определяется «хрупкая» прочность и который в подавляющем большинстве случаев лежит ниже температуры кипения жидкого азота ( $T = 77$  К). В связи с этим, в работах [7–9] предпринимались попытки расчетного определения характеристики «хрупкой» прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) и, соответственно, характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  путем поиска связей между параметрами  $R_X$  ( $R_{MC}$ ),  $K_{ms}$  и основными механическими характеристиками, такими, как  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$  и другими вспомогательными характеристиками, легко определяемыми расчетным способом по результатам испытаний на одноосное растяжение в области легкодоступных, в том числе, комнатных (293 К) температур. При этом в работе [7] была введена особая вспомогательная характеристика, названная «эквивалентной деформацией»  $e_{\text{экр.}}$ , которая характеризует величину пластической деформации, необходимую для достижения за счет деформационного упрочнения уровня растягивающих напряжений  $\sigma_{11}$ , численно равно значению «хрупкой» прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) (рис. 2), и получена зависимость для расчета этой характеристики

$$R_X(R_{MC}) = \sigma_{0,2} 10^{n \lg(\bar{e}_{\text{экр.}})}, \quad (7)$$

а с учетом (2)

$$K_{ms} = 10^{n(\lg \bar{e}_{\text{экр.}} - 1)}, \quad (8)$$

где  $\bar{e}_{\text{экр.}} = e_{\text{экр.}} / 0,002$  — приведенное значение эквивалентной деформации.



**Рис. 2.** Зависимости сопротивления пластической деформации металлических сплавов в логарифмических координатах (схема): без излома на всем протяжении пластической деформации  $\operatorname{tg} \alpha = n = n^I$  (кривая 1), с наличием излома в интервале локальных пластических деформаций  $\operatorname{tg} \beta = n^II$  (кривая 2), линейная зависимость, усредняющая влияние эффекта излома (кривая 2'), зависимости напряжения разрушения конструкционных сталей (кривая 3) и конструктивных титановых сплавов (кривая 4).

Для получения зависимости (7), в [7] использовали свойство близости зависимости сопротивления пластической деформации к линейной в логарифмических координатах  $\lg \sigma - \lg e$  ряда металлических сплавов, предложенную в свое время Холломоном для интервала характеристик прочности от  $\sigma_{0,2}$  до  $S_B$  [10] (см. рис. 2). Это свойство было подтверждено в работах [7, 8] не только для указанного интервала характеристик прочности, но для более широкого — от  $\sigma_{0,2}$  до  $S_K$  для технически чистого железа и некоторых конструктивных сталей, а в работе [8] — также для некоторых титановых и алюминиевых сплавов.

Установленная в [5] корреляционная зависимость между параметром  $\bar{e}_{\text{экв.}}$  и величиной относительного сужения после разрушения образца  $\psi_K$ <sup>1</sup>:

$$\lg \bar{e}_{\text{экв.}} = \frac{a + b \lg \psi_K}{1 - c \lg \psi_K}, \quad (9)$$

где  $a = 1,783$ ,  $b = 0,708$ ,  $c = 0,376$  — эмпирические коэффициенты, позволила, с учетом (7) и (8), получить удобные и простые формулы для

<sup>1</sup> Значение  $\psi_K$  в %.

расчетного определения характеристик «хрупкой» прочности  $R_X (R_{MC})$  и механической стабильности  $K_{ms}$  для некоторых видов конструкционных титановых сплавов в температурном интервале  $4 K \leq T_{исп.} \leq 293 K$ .

Однако, как показала практика, определение параметров  $R_X (R_{MC})$ ,  $K_{ms}$  с использованием формул (6)–(9), может привести к значительным погрешностям, а в некоторых случаях они вообще неприемлемы для расчетов «хрупкой» прочности и механической стабильности широкого круга конструкционных титановых сплавов. Причина этого заключается в том, что, строго говоря, на величину параметра  $e_{экр.}$  оказывает влияние отклонение зависимости сопротивления пластической деформации в области локальных пластических деформаций от линейной, которое наблюдается для большинства конструкционных титановых сплавов при различных температурах испытаний. Факт «излома» зависимости сопротивления пластической деформации в интервале изменения прочности от  $S_B$  до  $S_K$  был отмечен в работах [8, 11] (см. кривая 2 на рис. 2), однако в них для расчета «хрупкой» прочности  $R_X (R_{MC})$  за основу принималась некоторая линейная зависимость, усредняющая влияние эффекта излома (см. кривая 2' на рис. 2). Такая условная линеаризация, безусловно, не могла не привести к искажению конечных результатов при определении как показателей деформационного упрочнения на участке от  $S_B$  до  $S_K$ , так и характеристик  $R_X (R_{MC})$ ,  $K_{ms}$ .

В работе [12] показано, что точность расчетного определения показателя деформационного упрочнения  $n$  конструкционных титановых сплавов в интервале равномерной деформации, а, следовательно, и характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  зависит от точности определения таких базовых механических характеристик, как  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ , а также величины одного из параметров равномерной деформации — относительного равномерного сужения  $\psi_p$  или удлинения образца  $\delta_p$ . При этом точность определения характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$  обусловлена только точностью технических средств измерения — датчиков измерения нагрузки и температуры при растяжении, а характеристики  $\psi_K$  — точностью инструментальных или оптических средств измерения геометрических размеров поперечного сечения образца до и после разрушения. Что же касается характеристик равномерной деформации ( $\psi_p$ ,  $\delta_p$ ), то методика достаточно точного их определения через базовые механические характеристики  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$  была разработана в той же работе [12].

Однако, наряду с открывшимися возможностями расчетного определения параметров равномерной деформации, достаточно точный для практического использования расчет характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов возможен только с учетом особенностей процесса сопротивления пластической деформации в локальной области после начала формирования «шейки» при одноосном растяжении образца.

Исследования особенностей процесса сопротивления пластической деформации в локальной области были проведены в работе [13] с целью разделения широкого круга конструкционных титановых сплавов на группы по признаку интенсивности деформационного упрочнения в области неравномерной деформации и поиска связей показателей деформационного упрочнения с базовыми механическими характеристиками металла для каждой из этих групп. В результате были получены зависимости, позволяющие прогнозировать величину показателей деформационного упрочнения:

– для сплавов I-ой группы, у которых наблюдается приближительное постоянство интенсивности деформационного упрочнения на всем протяжении неравномерной деформации  $n^I \approx n$ , показатель которой определяется согласно формуле (6),

– для сплавов II-ой группы, у которых наблюдается возрастание интенсивности деформационного упрочнения в интервале неравномерной пластической деформации согласно выражению

$$n^{II} = \frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(e_K / e_p)} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_K / e_p)} \left\{ a - b \left( 1 + c \left[ \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} \right]^d \right)^{-1} \right\}, \quad (10)$$

где  $a = 82,23$ ,  $b = 82,156$ ,  $c = 0,041$ ,  $d = 1,692$  — эмпирические коэффициенты.

При этом параметры  $S_B$  и  $e_p$  определяются согласно формул (3) и (4) соответственно, параметры  $\psi_p$  и  $\delta_p$  определяются по формулам [12, 13]:  $\psi_p = \psi_K(1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B) / (\sigma_i^K / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B)$ , где  $\sigma_i^K / \sigma_B = C + D\psi_K$ ,  $C = 1$ ,  $D = 0,684$  — эмпирические коэффициенты,  $\delta_p = 1 / (1 - \psi_p) - 1$ , а истинная деформация после разрушения образца  $e_K$  согласно [13] определяется по формуле  $e_K = -\ln(1 - \psi_K)$ .

Таким образом, как показано в [13], для расчета показателей  $n$  ( $n^I$ ) и  $n^{II}$  с использованием формул (6) и (10), достаточно знать значения только базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$ .

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что существуют предпосылки для поиска таких связей между характеристиками «хрупкой» прочности  $R_X$  и механической стабильности  $K_{ms}$  с базовыми механическими характеристиками металла, которые позволят прогнозировать значения этих характеристик по результатам испытаний стандартных гладких образцов на одноосное статическое растяжение в интервале температур от 77 К до 293 К для широкого круга конструкционных титановых сплавов. При этом необходимость оценки сопротивляемости различных конструкционных титановых сплавов переходу в «хрупкое» состояние делает проблему поиска более точных и информативных функциональных зависимостей для определения характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  насущной и актуальной. Отсюда вытекает цель настоящей работы, которая за-



ключается в поиске функциональных зависимостей, позволяющих прогнозировать значения «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов через их базовые механические характеристики.

## 2. ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы для настоящих исследований подбирались по принципу максимально широкого охвата различных комбинаций прочностных и пластических характеристик конструкционных титановых сплавов, при этом характеристики прочности изменялись в пределах от  $\sigma_{0,2} = 570$  МПа до  $\sigma_{0,2} = 1925$  МПа, а характеристики пластичности — от  $\psi_K = 81,0\%$  до  $\psi_K = 1,0\%$ . Для этого в качестве объектов анализа выбирали конструкционные титановые сплавы, относящиеся к различным классам по структуре, качеству, составу и назначению, в том числе специального назначения, используемые в криогенной технике и для создания особо ответственных конструкций, которые отличались режимами термической обработки и испытывались в диапазоне температур от 4 К до 293 К. Кроме того, использовались также справочные и литературные данные для базовых механических характеристик конструкционных титановых сплавов [11, 14–21]. Это позволило получить достаточный объем данных для корректной статистической обработки. Всего в настоящей работе представлены результаты более чем 300 измерений комплекса механических характеристик более 200 видов конструкционных титановых сплавов, полученные в результате испытаний на одноосное статическое растяжение гладких цилиндрических образцов.

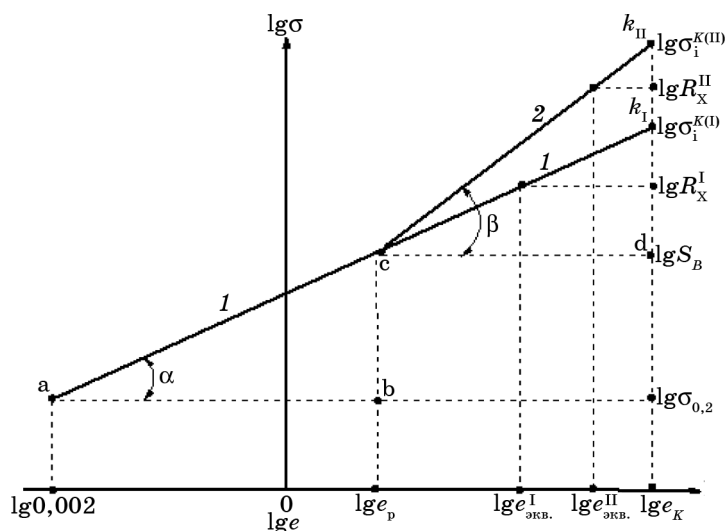
## 3. СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК «ХРУПКОЙ» ПРОЧНОСТИ $R_x$ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ $K_{ms}$ С БАЗОВЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Полученные в работе [13] зависимости, позволяющие разделять конструкционные титановые сплавы на группы по признаку интенсивности деформационного упрочнения в области неравномерной пластической деформации и определять показатели деформационного упрочнения через базовые механические характеристики металла, позволили по-новому подойти к решению задачи прогнозирования «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{ms}$ . Прогрессивность настоящего подхода заключается в том, что вместо используемой в работе [5] гиперболической зависимости  $\lg \bar{\epsilon}_{\text{экв.}} - \lg \psi_K$ , лежащей в основе прогнозирования  $R_x$  и  $K_{ms}$  для некоторых видов сплавов, авторами получены зависимости параметра  $\lg \bar{\epsilon}_{\text{экв.}}$  от показателей деформационного упрочнения (или их ком-

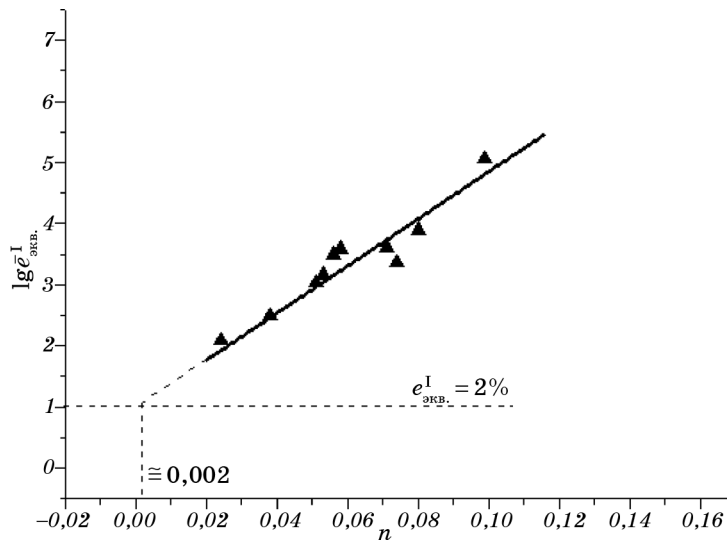
бинации) для каждой из двух групп конструкционных титановых сплавов, что позволяет избежать прямой зависимости  $\lg \bar{e}_{\text{экр.}} = f(\lg \psi_K)$ , приводящей к значительным погрешностям расчета для сплавов с высокой пластичностью  $\psi_K \geq 60\%$ .

На рисунке 3 схематически представлены зависимости сопротивления пластической деформации конструкционных титановых сплавов I-ой группы, которые характеризуются постоянной интенсивностью деформационного упрочнения на всем протяжении пластической деформации (кривая 1) и сплавов II-ой группы, которые характеризуются возрастанием интенсивности деформационного упрочнения в интервале неравномерной пластической деформации (кривая 2). Таким образом:

1) Для сплавов I-ой группы, которые характеризуются сохранением свойства линейности сопротивления пластической деформации во всем интервале прочности от  $\sigma_{0,2}$  до  $\sigma_i^K$ , исходя из подобия треугольников  $abc$  и  $cdk_I$  на рис. 3, для показателя деформационного упрочнения имеем  $\text{tg} \alpha = n \approx n^I$ , т.е. для расчета  $n$  ( $n^I$ ) следует использовать формулу (6), а для расчета характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  — формулы (7) и (8), соответственно. Анализ, проведенный в настоящей работе, показал, что для сплавов I-ой группы имеет место линейная зависимость



**Рис. 3.** Зависимости сопротивления пластической деформации конструкционных титановых сплавов в логарифмических координатах (схема): с постоянной интенсивностью деформационного упрочнения на всем протяжении пластической деформации  $\text{tg} \alpha = n = n^I$  — сплавы I-ой группы (кривая 1), с возрастающей интенсивностью деформационного упрочнения в области неравномерной пластической деформации  $\text{tg} \beta = n^{\text{II}}$  — сплавы II-ой группы (кривая 2).



**Рис. 4.** Зависимость  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I = f(n)$  сплавов I-ой группы ( $\blacktriangle$  — экспериментальные данные в диапазоне температур от 77 К до 293 К).

параметра  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I$  от  $n$  ( $n^I$ ), которая представлена на рис. 4.

Зависимость параметра  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I$  от  $n$  ( $n^I$ ) для сплавов I-ой группы можно аппроксимировать следующей функцией:

$$\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I = 1 + an . \tag{11}$$

Оценка точности аппроксимации зависимости (11), при которой выборочный стандарт  $S$  составляет 3,1% с достоверностью  $P(\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I \pm 10,0\%) = 0,942^2$ , показала, что она достаточна для использования этой зависимости для дальнейших заключений и прикладных расчетов в температурном интервале от 77 К до 293 К.

Таким образом, зависимости (7) и (8), пригодные для расчета характеристик «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{\text{мс}}$  конструкционных титановых сплавов I-ой группы, окончательно примут вид:

$$R_x^I = \sigma_{0,2} 10^{n \lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I} = \sigma_{0,2} 10^{n(1+an)} , \tag{12}$$

$$K_{\text{мс}}^I = 10^{n(\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^I - 1)} = 10^{an^2} , \tag{13}$$

где  $\bar{e}_{\text{экв.}}^I = e_{\text{экв.}}^I / 0,002$  — приведенное значение эквивалентной деформации для сплавов I-ой группы,  $a = 38,497$  — эмпирический коэффициент, показатель  $n$  ( $n^I$ ) для сплавов I-ой группы определяется

<sup>2</sup> Расчет проведен с использованием статистики малых выборок и распределения Стьюдента.

согласно зависимости (6).

2) Для сплавов II-ой группы, которые характеризуются наличием излома на участке от  $S_B$  до  $\sigma_i^K$  и увеличением угла наклона кривой сопротивления пластической деформации по отношению к оси абсцисс  $\lg e$ , исходя из отсутствия подобия треугольников  $abc$  и  $cdk_{II}$  на рис. 3, имеем для показателя деформационного упрочнения  $\operatorname{tg}\beta = n^{II}$  ( $n^{II} > n$ ), т.е. для расчета  $n^{II}$  следует использовать формулу (10), а для расчета характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  будем иметь

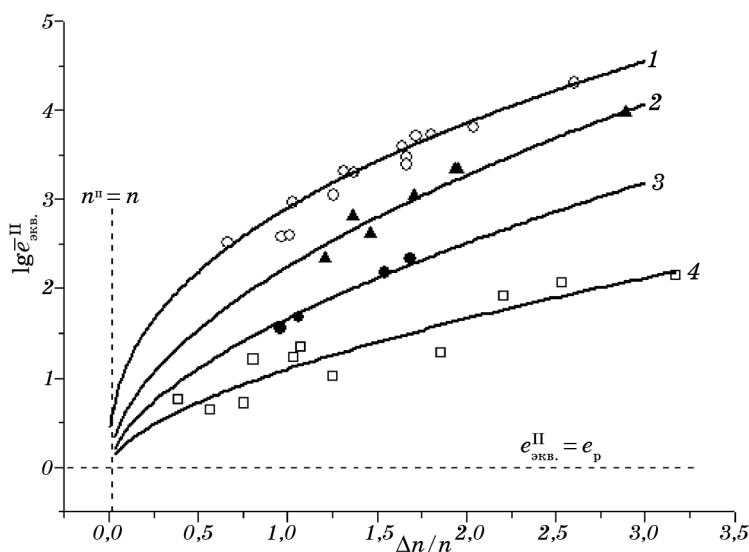
$$R_X^{II} = S_B 10^{n^{II} \lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{II}}, \quad (14)$$

а с учетом (2)

$$K_{ms}^{II} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} 10^m, \quad (15)$$

где  $\bar{e}_{\text{экв.}}^{II} = e_{\text{экв.}}^{II} / e_p$  — приведенное значение эквивалентной деформации для сплавов II-ой группы,  $m = n^{II} \lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{II} - n$ .

Анализ, проведенный в настоящей работе, показал, что для конструкционных титановых сплавов II-ой группы имеют место зависимости параметра  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{II}$  от относительного прироста интенсивности деформационного упрочнения  $(n^{II} - n)/n = \Delta n/n$ , которые представлены на рис. 5 для некоторых температур испытаний.



**Рис. 5.** Зависимости  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{II} = f(\Delta n/n)$  при различных температурах испытаний сплавов II-ой группы; экспериментальные данные:  $\circ$  — при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$  (кривая 1),  $\blacktriangle$  — при  $T_{\text{исп.}} = 200 \text{ К}$  (кривая 2),  $\bullet$  — при  $T_{\text{исп.}} = 125 \text{ К}$  (кривая 3),  $\square$  — при  $T_{\text{исп.}} = 77 \text{ К}$  (кривая 4).

Зависимости  $\lg \bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}^{\text{II}} = f(\Delta n/n)$  для сплавов II-ой группы можно аппроксимировать следующей степенной функцией:

$$\lg \bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}^{\text{II}} = a(\Delta n/n)^b. \quad (16)$$

В таблице 1 представлены значения коэффициентов  $a$  и  $b$  в зависимости (16) для некоторых фиксированных температур испытаний сплавов II-ой группы, а также оценка точности аппроксимации зависимостей  $\lg \bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}^{\text{II}} = f(\Delta n/n)$ .

Из таблицы 1 видно, что точность аппроксимации зависимостей (16) для сплавов II-ой группы при фиксированных значениях  $T_{\text{исп.}}$  в интервале  $77 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ , при которой выборочный стандарт не превышает 5,1% с достоверностью не ниже 0,9 в максимальном доверительном интервале  $\pm 10,0\%$ , достаточна для использования этих зависимостей для дальнейших заключений и прикладных расчетов, при этом авторы допускают корректировку значений коэффициентов  $a$  и  $b$  в зависимости (16) в случае получения дополнительных экспериментальных данных.

На основании данных таблицы 1 можно найти температурные зависимости коэффициентов  $a$  и  $b$  в уравнении (16). Анализ показал, что зависимость коэффициента  $a$  от  $T_{\text{исп.}}$  можно аппроксимировать функцией гиперболического вида (рис. 6)

$$a = (AT_{\text{исп.}} - B)/(T_{\text{исп.}} + C), \quad (17)$$

а зависимость коэффициента  $b$  от  $T_{\text{исп.}}$  — функцией параболического вида (рис. 6)

$$b = D + FT_{\text{исп.}} - NT_{\text{исп.}}^2. \quad (18)$$

Таким образом, зависимости (14) и (15) для расчета характери-

**ТАБЛИЦА 1.** Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  и оценка точности аппроксимации зависимостей (16) для ряда фиксированных значений  $T_{\text{исп.}}$  в интервале  $77 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ .

№ II/II	$T_{\text{исп.}}$ , К	$a$	$b$	Выборочный стандарт $S$ , %	Доверительный интервал, %	Достовер- ность $P$
1	293	2,906	0,407	5,1	10,0	0,950
2*	200	2,448	0,540	2,1	5,0	0,950
3*	125	1,740	0,590	1,3	4,0	0,942
4*	77	1,099	0,598	4,2	10,0	0,900

\* — расчет проведен с использованием статистики малых выборок и распределения Стьюдента

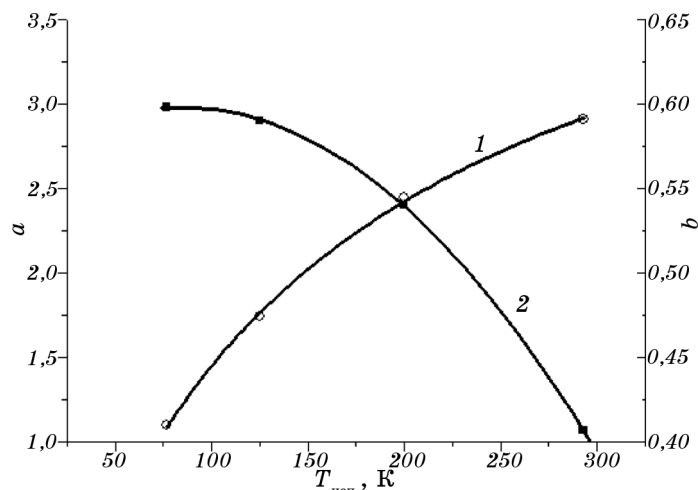


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициентов  $a$  (кривая 1) и  $b$  (кривая 2) в уравнении (16).

стик «хрупкой» прочности  $R_X$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов II-ой группы с учетом (16), (17) и (18), окончательно примут вид:

$$R_X^{\text{II}} = S_B 10^{n^{\text{II}} \lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{\text{II}}}, \quad (19)$$

$$K_{ms}^{\text{II}} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} 10^m, \quad (20)$$

где  $\lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{\text{II}} = a(n^{\text{II}} / n - 1)^b$ ,  $a = (AT_{\text{исп.}} - B) / (T_{\text{исп.}} + C)$ ,  $b = D + FT_{\text{исп.}} - NT_{\text{исп.}}^2$ ,  $A = 4,68$ ,  $B = 132,19$ ,  $C = 132,17$ ,  $D = 0,566$ ,  $F = 0,749 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $N = 4,41 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$  — эмпирические коэффициенты,  $m = n^{\text{II}} \lg \bar{e}_{\text{экв.}}^{\text{II}} - n$ , показатели  $n$  и  $n^{\text{II}}$  для сплавов II-ой группы определяются согласно зависимостям (6) и (10) соответственно.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 2 представлены экспериментальные значения базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ , а также результаты расчета характеристик «хрупкой» прочности  $R_X$  и механической стабильности  $K_{ms}$  для некоторых конструкционных титановых сплавов, относящихся к различным группам сплавов, в интервале температур испытаний  $77 \text{ K} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ K}$ . В таблице 2 приведена также оценка точности расчета характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  в соответствии с зависимостями (12), (13) и (19), (20) соответственно для сплавов I-ой и II-ой групп по сравнению с их экспериментальными значениями.

**ТАБЛИЦА 2.** Значения базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ , а также результаты расчета и оценка точности определения характеристик  $R_X$  и  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов в интервале температур испытаний  $77\text{ К} \leq T_{исп.} \leq 293\text{ К}$  ( $\Delta$  — относительная погрешность расчета величин характеристик  $R_X^{расч.}$  и  $K_{ms}^{расч.}$  по отношению к их экспериментальным значениям; значения  $R_X^{эксп.}$  получены методом экстраполяции [14–16]).

№ п/п	Титановые сплавы	Обработка	Группа	$T_{исп.}$ , К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$R_X^{эксп.}$ , МПа	$R_X^{расч.}$ , МПа	$K_{ms}^{эксп.}$	$K_{ms}^{расч.}$	$\Delta$ , %
1		Нагрев 700°C, 5 ч	I	293	680	860	68,0	2129	2129	2,518	2,494	-0,98
2	BT16	Нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 500°C, 8 ч		77	1260	1470	49,0	2136	2136	1,448	1,438	-0,65
3		Нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 600°C, 8 ч		77	1500	1680	16,0	2200	2165	1,299	1,278	-1,60
4		Нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 600°C, 8 ч		77	1400	1560	16,0	2000	1984	1,270	1,260	-0,80
5		Нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 500°C, 8 ч	II	293	980	1070	40,0	2200	2254	2,011	2,060	+2,45
6		Нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 600°C, 8 ч		293	900	960	57,0	2000	2082	2,028	2,112	+4,10
7		Нагрев 920°C, 0,5 ч, 80°C·с <sup>-1</sup> + 750°C, 0,5 ч, 40°C·ч <sup>-1</sup>		293	800	840	54,0	2060	1971	2,390	2,286	-4,32
8	BT16	Нагрев 920°C, 0,5 ч, охл. с печью		293	760	800	62,0	1930	1911	2,351	2,351	-0,98
9		Нагрев 1050°C, 0,5 ч, 80°C·с <sup>-1</sup> + 830°C, 3 ч, 40°C·ч <sup>-1</sup>		293	780	820	50,0	1800	1782	2,140	2,118	-1,00
10		Нагрев 800°C, 0,5 ч, охл. с печью + 830°C, 4 ч, 40°C·ч <sup>-1</sup>		293	770	800	36,0	1480	1524	1,805	1,859	+2,97
11		Нагрев 1050°C, 0,5 ч, охл. с печью + 830°C, 4 ч, 40°C·ч <sup>-1</sup>		293	570	660	62,2		1941	2,687	2,895	+7,83
12	AT2	Состояние поставки		200	700	775	60,0	1800	1769	2,270	2,230	-1,72
13				77	940	1077	67,0		1698	1,641	1,548	-5,67
14		Состояние поставки	293	770	835	26,4		1497	1,819	1,757	-3,42	
15	BT5-1кт.		200	950	984	23,7	1550	1536	1,539	1,525	-0,90	
16			77	1230	1325	21,6		1635	1,146	1,210	+5,48	

$S = 3,61$

$P(R_X^{расч.}, K_{ms}^{расч.} \pm 6,0\%) = 0,903$

Как видно из таблицы 2, точность расчета характеристик «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{ms}$ , при которой выборочный стандарт составляет  $S = 3,61\%$  с достоверностью  $P(R_x^{расч.}, K_{ms}^{расч.} \pm 6,0\%) = 0,903$ , достаточна для решения прикладных инженерных задач.

В заключение следует отметить основные закономерности характеристик деформационного упрочнения в широком интервале температур и абсолютных значений пластической деформации:

1. Зависимость  $\lg \bar{e}_{эқв.}^I = f(n)$  для сплавов I-ой группы, представленная на рис. 4, ограничена по оси ординат экспериментальным значением  $n \approx 0,002$  и стремится к критической величине деформации  $e_{эқв.}^I = e_c = 0,2\%$  при  $n \rightarrow 0$ . Важно также заметить, что наблюдаемая инвариантность указанной зависимости относительно температуры испытаний в интервале  $77 \text{ К} \leq T_{исп.} \leq 293 \text{ К}$  для сплавов I-ой группы, согласуется с результатами исследований [5].

2. Зависимости  $\lg \bar{e}_{эқв.}^{II} = f(\Delta n/n)$  для сплавов II-ой группы, представленные на рис. 5, характеризуются снижением темпа относительного прироста интенсивности деформационного упрочнения в процессе деформации  $d(\Delta n/n) / d(\lg \bar{e}_{эқв.}^{II})$  при  $e_{эқв.}^{II} \rightarrow e_p$  для каждой фиксированной температуры испытаний в интервале  $77 \text{ К} \leq T_{исп.} \leq 293 \text{ К}$ , т.е.  $n^{II} \rightarrow n$ , и при  $e_{эқв.} = e_p$  имеем  $n^{II} = n(n^I)$ , что означает стабилизацию интенсивности деформационного упрочнения в общей точке схождения с координатами (0, 0) для всех фиксированных температур испытаний. Интересно отметить, что темп относительного прироста интенсивности деформационного упрочнения в процессе деформации  $d(\Delta n/n) / d(\lg \bar{e}_{эқв.}^{II})$  увеличивается при снижении температуры испытаний, тогда как, согласно [22], сама интенсивность деформационного упрочнения  $n^{II}$  для металлических сплавов с ГПУ- и ОЦК-решетками при этом снижается за счет замедления скорости движения винтовых компонент дислокаций.

Таким образом, используя формулы (12), (13) для сплавов I-ой группы и (19), (20) для сплавов II-ой группы можно определить характеристики «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов во всем исследованном интервале изменения их пластичности  $1,0\% \leq \psi_K \leq 81\%$ . При этом достаточно знать только базовые механические характеристики металла  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$ , определенные по результатам испытаний стандартных гладких образцов на статическое растяжение при любой температуре в интервале  $77 \text{ К} \leq T_{исп.} \leq 293 \text{ К}$ .

## 5. ВЫВОДЫ

1. Полученные зависимости между величиной эквивалентной деформации  $e_{эқв.}$  и показателями деформационного упрочнения или их комбинацией в области локализованной пластической деформа-



ции позволяют с достаточной точностью прогнозировать величину характеристик «хрупкой» прочности  $R_x$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов в интервале температур испытаний от 77 К до 293 К.

2. В зависимости от характера изменения величины показателя деформационного упрочнения можно выделить две группы конструкционных титановых сплавов. Для сплавов I-ой группы зависимость между величиной эквивалентной деформации  $e_{эқв.}$  и показателем деформационного упрочнения  $n$  инвариантна относительно температуры испытаний. Для сплавов II-ой группы на зависимость величины эквивалентной деформации  $e_{эқв.}$  от значения относительного прироста интенсивности деформационного упрочнения  $\Delta n/n$  в области локализованной пластической деформации оказывает влияние температура испытаний.

3. Имеет место инвариантность полученных зависимостей относительно различных сочетаний прочностных и пластических свойств конструкционных титановых сплавов и режимов их термической обработки.

4. Оценка точности разработанной методики показала ее прикладную применимость для оценки сопротивляемости переходу в «хрупкое» состояние конструкционных титановых сплавов.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Пределная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Киев: Наукова думка: 2008).
2. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *УФМ*, **10**, № 2: 207 (2009).
3. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 3: 361 (2009).
4. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Строительство, материаловедение, машиностроение* (Днепропетровск: ПГАСА: 2012), вып. 64, с. 149.
5. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, Н. Н. Стеценко, Е. Ф. Сорока, *Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов*, Свидетство про реєстрацію авторського права № 41448 України (Опубл. 20 грудня 2011) (Бюл. № 26).
6. Н. Н. Давиденков, *Динамическая прочность и хрупкость металлов* (Киев: Наукова думка: 1981).
7. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **32**, № 8: 1123 (2010).
8. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, М. В. Озерский, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 3: 407 (2011).
9. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, Н. Н. Стеценко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 4: 545 (2011).
10. J. H. Hollomon, *Am. Inst. Min. Metallurg. Eng.*, **162**: 268 (1945).
11. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях* (Ред. Г. С. Писаренко) (Киев: Наукова думка: 1980).
12. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В.

- Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 12: 1643 (2012).
13. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, Е. Ф. Сорока, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 1: 129 (2013).
  14. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, G. A. Pakharenko, and A. V. Shevchenko, *Mater. Sci. Eng. A*, **196**: 65 (1995).
  15. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, А. В. Шевченко, *Металлофизика*, **14**, № 4: 70 (1992).
  16. *Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие* (Ред. В. В. Панасюк) (Киев: Наукова думка: 1988).
  17. P. E. Markovsky and M. Ikeda, *Mater. Trans.*, **46**, No. 7: 1515 (2005).
  18. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk, S. L. Semiatin, C. H. Ward, and S. Fox, *J. Alloys Compd.*, **457**: 296 (2008).
  19. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
  20. C. F. Hickey, *Proceedings ASTM*, **62**: 765 (1962).
  21. J. H. Belton et al., *ASTM Spec. Techn. Publ.*, No. 287: 108 (1960).
  22. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов* (Ред. В. И. Трефилов) (Киев: Наукова думка: 1987).