

PACS numbers: 46.50.+a, 61.72.Hh, 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.mj, 62.20.mm, 81.40.Jj

## **Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных титановых сплавов в области неравномерной деформации**

О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков,  
А. В. Шиян

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

Рассмотрен вопрос связи показателей деформационного упрочнения с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$  при пластических деформациях, больших равномерной. Показано, что конструкционные титановые сплавы можно разделить на две группы в зависимости от характера изменения показателя деформационного упрочнения в этой области. Найдены корреляционные зависимости, позволяющие прогнозировать значение показателя деформационного упрочнения титановых сплавов различных групп в области значительных пластических деформаций, используя только базовые механические характеристики металла. Для ряда конструкционных титановых сплавов разных групп определены величины показателей деформационного упрочнения и проведена оценка точности предлагаемой методики.

Розглянуто питання зв'язку показників деформаційного зміцнення з базовими механічними характеристиками конструкційних титанових сплавів  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  і  $\psi_K$  при пластичних деформаціях, більших за рівномірну. Показано, що конструкційні титанові сплави можна розділити на дві групи, залежно від характеру зміни показника деформаційного зміцнення в цій області. Знайдено кореляційні залежності, що уможливають прогнозувати значення показника деформаційного зміцнення титанових сплавів різних груп за значних пластичних деформацій з використанням лише базових механічних характеристик металу. Для низки конструкційних титанових сплавів різних груп визначено величини показників деформаційного зміцнення та виконано оцінку точності запропонованої методики.

The problem of relation of strain hardening exponents with the basic mechanical properties of structural titanium alloys,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  and  $\psi_K$ , at plastic strains higher than uniform strain is considered. As shown, the structural titanium alloys can be classified into two groups, depending on the nature of changes in

the value of strain hardening exponent within this range. Correlation dependences are found for prediction of strain hardening exponents of different structural titanium alloys over the wide range of plastic strains, using only the basic mechanical properties of the metal at issue. For a number of titanium alloys of different groups, the values of strain hardening exponents are determined, and the accuracy of the proposed technique is estimated.

**Ключевые слова:** равномерная деформация, деформационное упрочнение, группы сплавов, интенсивность деформационного упрочнения.

(Получено 20 сентября 2012 г.)

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Первичную оценку механических свойств конструкционного металла обычно проводят по результатам испытаний на статическое растяжение. При этом определяют базовые механические характеристики металла, к числу которых относятся характеристики прочности:  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и пластичности:  $\psi_K$ ,  $\delta_K$  ( $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$ ) [1, 2]. Указанные базовые механические характеристики включаются в технические условия на поставку металлических конструкционных материалов, в паспорта приемочных испытаний, а также используются при расчетах элементов конструкций на прочность. Однако современные требования к служебным свойствам металлов в конструкции должны также включать информацию о характеристиках, отражающих их способность сопротивляться переходу в хрупкое состояние под воздействием различных внешних факторов упрочнения (температура, скорость деформирования, сложное напряженное состояние и т.п.) [3, 4]. Такими характеристиками, полноправно занимающими свое место в ряду базовых, являются характеристики хрупкой прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) и механической стабильности  $K_{ms}$  [3–6]. Как показано в работах [3–5] для конструкционных сталей связь между величиной хрупкой прочности  $R_{MC}$  стали и уровнем ее механической стабильности  $K_{ms}$  может быть описана следующим образом:

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

где  $\sigma_2$  — прочность металла при пластической деформации 2%, а в работе [6] приведена аналогичная зависимость для конструктивных титановых сплавов, для которых хрупкая прочность определяется величиной характеристики  $R_X$ :

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

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:

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

где

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

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

Подставляя (4) и (5) в (3), будем иметь:

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

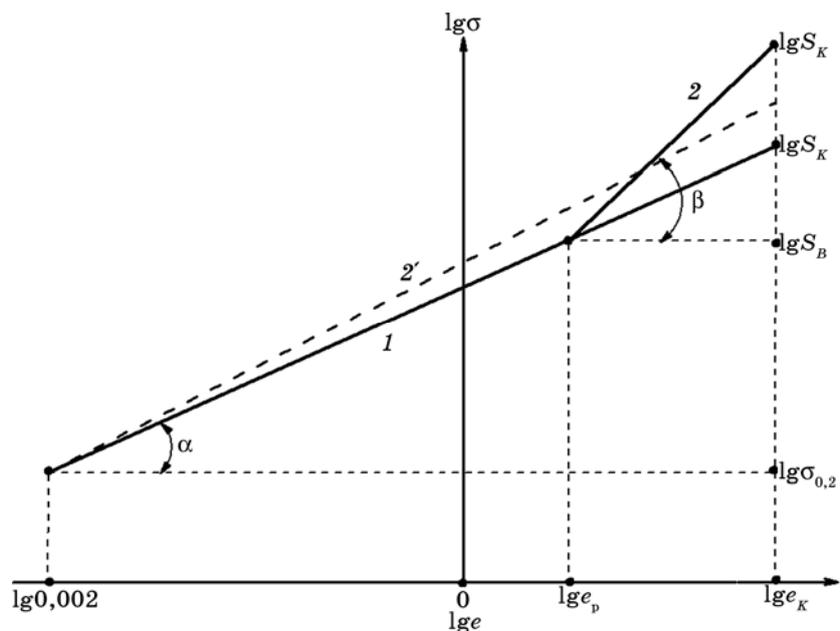
где  $\delta_p$  — относительное равномерное удлинение образца.

Согласно (2) и (6) точность определения характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных титановых сплавов зависит от точности определения таких базовых механических характеристик как хрупкая прочность  $R_x$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел прочности  $\sigma_B$ , а также вспомогательной характеристики — относительного равномерного удлинения образца  $\delta_p$ .

В связи с тем, что экспериментальное определение  $R_x$  требует проведения механических испытаний в области криогенных температур, в работах [6–9] предпринимались попытки расчета величины  $R_x$  ( $R_{MC}$ ) и, соответственно, характеристики механической стабильности  $K_{ms}$ , путем установления связей между параметрами  $R_x$  ( $R_{MC}$ ),  $K_{ms}$  и базовыми механическими характеристиками, такими, как  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ , а также другими вспомогательными характеристиками, легко определяемыми расчетным способом по результатам испытаний на одноосное растяжение в области, как климатических температур, так и при комнатной температуре. При этом в работе [7] была введена особая вспомогательная характеристика, названная «эквивалентной деформацией»  $e_{э.к.в.}$ , которая характеризует величину пластической деформации, необходимую для достижения

за счет деформационного упрочнения уровня растягивающих напряжений  $\sigma_{11}$ , численно равного значению хрупкой прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ).

В работах [6, 7] была установлена корреляционная связь между параметром  $e_{\text{экв.}}$  и относительным сужением после разрушения образца  $\psi_K$ , что позволило получить удобные и простые формулы для расчетного определения характеристик хрупкой прочности  $R_X$  ( $R_{MC}$ ) и механической стабильности  $K_{ms}$  для узкого круга металлических сплавов при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$ . При этом при выводе упомянутых формул 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] (рис. 1). Это свойство было подтверждено в работах [6–8] не только для указанного интервала характеристик прочности, но для более широкого — от  $\sigma_{0,2}$  до  $S_K$  для технически чистого железа и некоторых конструкционных сталей, а в работе [8] — также для титановых и алюминиевых сплавов. Здесь следует заметить, что, строго говоря, на величину параметра  $e_{\text{экв.}}$  оказывает влияние угол



**Рис. 1.** Зависимости сопротивления пластической деформации (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); усредненная линейная зависимость без учета излома (кривая 2').

наклона зависимости сопротивления пластической деформации  $\beta$  в области значительных пластических деформаций, превышающих равномерную, так как обычно  $e_{\text{экр.}} > e_p$  (см. рис. 1).

При этом, если в работах [6, 7] исследовали металлические сплавы, у которых  $\beta \approx \alpha$  (т.е. интенсивность деформационного упрочнения сохранялась во всем интервале прочности от  $\sigma_{0,2}$  до  $S_K$ :  $\text{tg}\alpha = n^I \approx \text{tg}\beta = n^{II}$  — сплавы I-ой группы, кривая 1 на рис. 1), то в работе [8], хотя и отмечалось изменение интенсивности деформационного упрочнения на участке от  $S_B$  до  $S_K$  у исследуемых металлов (сплавы II-ой группы, кривая 2 на рис. 1), для расчета хрупкой прочности за основу принималась некоторая усредненная линейная зависимость без учета этого излома (см. кривая 2' на рис. 1). Такое упрощение приводит к значительному увеличению погрешности в определении как показателей деформационного упрочнения на участке от  $S_B$  до  $S_K$ , так и характеристик  $R_X$  ( $R_{MC}$ ),  $K_{ms}$ . Таким образом, вопрос об учете особенностей сопротивления металла пластической деформации на участке ее локализации в интервале прочности от  $S_B$  до  $S_K$ , остается актуальным и требует более глубокого исследования.

Из вышесказанного вытекает цель настоящей работы, которая заключается в установлении закономерности изменения величины показателя деформационного упрочнения конструкционных титановых сплавов при деформациях, превышающих равномерную.

## 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 [11–16]. 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 цилин-

дрических образцов.

### 3. СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ С БАЗОВЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Известно, что механическая неустойчивость образца при растяжении, или переход от общей деформации к локальной в «шейке», возникает из-за того, что на определенном этапе деформации уменьшение среднего поперечного сечения образца перестает компенсироваться деформационным упрочнением металла.

В работе [17] было показано, что для достаточно точного расчета характеристик равномерной деформации  $\psi_p$  и  $\delta_p$  конструкционных титановых сплавов с показателем пластичности  $\psi_K \geq 5\%$  целесообразно учитывать существование явления локализации деформации в области «шейки» при растяжении образца в интервале изменения прочности от  $S_B$  до  $S_K$ , что определяет необходимость рассматривать «шейку» как концентратор напряжений. Поэтому, наряду с продольным растягивающим напряжением  $\sigma_{11}$ , в области локализации деформации существенную роль начинают играть поперечные напряжения  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  (для гладкого цилиндрического образца  $\sigma_{22} = \sigma_{33}$ ). В связи с этим, имеет место отличие между истинным напряжением разрушения  $S_K$  и значением интенсивности напряжений в момент разрушения  $\sigma_i^K$  на участке от  $S_B$  до  $S_K$  и эта разница возрастает с увеличением относительного сужения в «шейке». Исходя из этого, в [17] была получена зависимость для определения характеристики относительного равномерного сужения образца  $\psi_p$ :

$$\psi_p = \psi_K \frac{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B}{\sigma_i^K / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B}, \quad (7)$$

где параметр  $\sigma_i^K / \sigma_B$  определяется из функциональной зависимости  $\sigma_i^K / \sigma_B = f(\psi_K)$ :

$$\sigma_i^K / \sigma_B = C + D\psi_K,$$

где  $C = 1$ ,  $D = 0,684$  — эмпирические коэффициенты.

Соответственно, из условия постоянства объема металла при пластической деформации, выражение для величины относительного равномерного удлинения  $\delta_p$  имеет вид:

$$\delta_p = \frac{1}{1 - \psi_p} - 1. \quad (8)$$

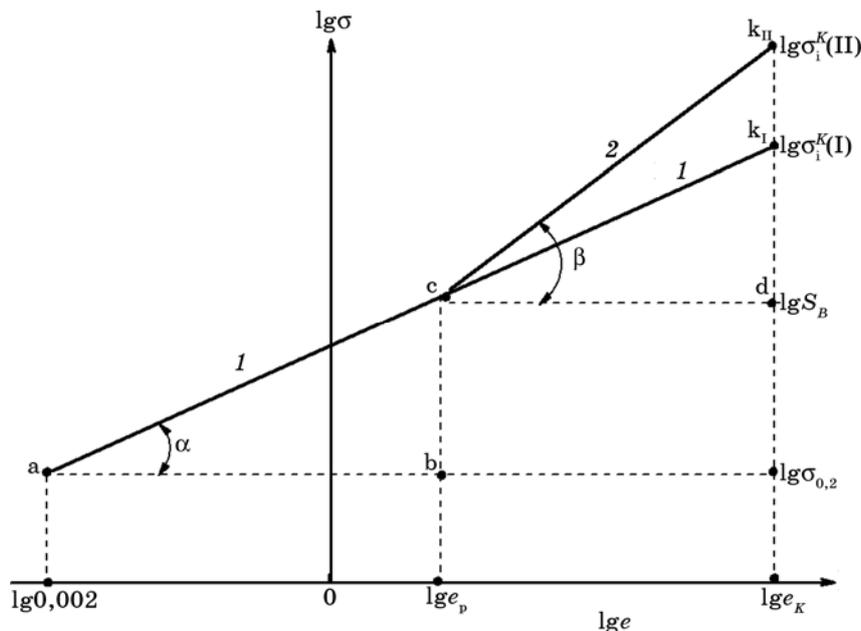
Анализ, проведенный в настоящей работе, показал, что весь массив экспериментальных данных конструкционных титановых

сплавов можно разделить на две группы в зависимости от соотношения между значениями величины показателя деформационного упрочнения при деформациях меньших и больших равномерной (рис. 2).

1. I-ая группа сплавов характеризуется сохранением свойства линейности сопротивления пластической деформации во всем интервале прочности от  $\sigma_{0,2}$  до  $\sigma_i^K$  (кривая 1 на рис. 2). Таким образом, исходя из подобия треугольников  $abc$  и  $cdk_I$  на рис. 2, имеем для показателей деформационного упрочнения  $\operatorname{tg}\alpha = n \approx n^I$ , откуда для сплавов I-ой группы очевидно равенство

$$\frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} = \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} \pm 5\% . \quad (9)$$

2. II-ая группа сплавов характеризуется наличием излома на участке от  $S_B$  до  $\sigma_i^K$  и увеличением угла наклона кривой сопротивления пластической деформации по отношению к оси абсцисс  $\lg e$  (кривая 2 на рис. 2). Таким образом, исходя из отсутствия подобия треугольников  $abc$  и  $cdk_{II}$  на рис. 2, имеем для показателей деформационного упрочнения  $\operatorname{tg}\beta = n^{II}$  ( $n^{II} > n$ ), и для сплавов II-ой группы



**Рис. 2.** Зависимость сопротивления пластической деформации конструктивных титановых сплавов в логарифмических координатах (схема):  $\operatorname{tg}\alpha = n = n^I$  — сплавы I-ой группы (кривая 1);  $\operatorname{tg}\beta = n^{II}$  — сплавы II-ой группы (кривая 2).

$$\frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} > \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} + 5\%, \quad (10)$$

откуда можно предположить, что будет иметь место зависимость

$$\frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} = f_{II} \left[ \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} \right]. \quad (11)$$

Таким образом, сплавы I-ой группы характеризуется постоянством величины показателя деформационного упрочнения во всем интервале изменения прочности от  $\sigma_{0,2}$  до  $\sigma_i^K$ , тогда как у сплавов II-й группы величина  $n$  увеличивается при переходе к неравномерной деформации.

Проведенный в настоящей работе анализ показал, что зависимость (9) для сплавов I-ой группы можно аппроксимировать линейной функцией, которая представлена в виде кривой 1 на рис. 3.

При этом показатель деформационного упрочнения  $n^I$  будет определяться аналогично  $n$  по формуле (6):

$$n^I = n = \frac{\lg \left[ \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}(1 - \psi_p)} \right]}{\lg[-500 \ln(1 - \psi_p)]} = \frac{\lg \left[ \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} (1 + \delta_p) \right]}{\lg[500 \ln(1 + \delta_p)]}. \quad (12)$$

Для сплавов II-ой группы в первом приближении зависимость (11), представленная на рис. 3, а (кривая 2), может быть аппроксимирована S-образной функцией вида:

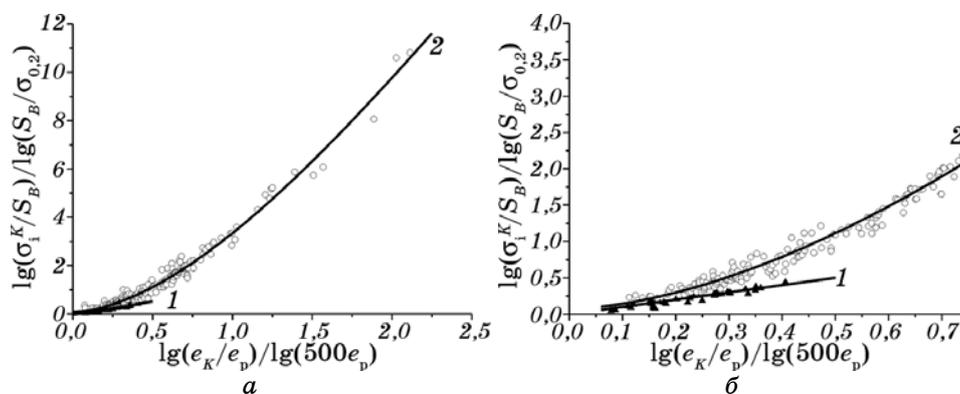


Рис. 3. Зависимости (9) и (14) в масштабе по координате X: а — от 0 до 2,5; б — от 0 до 0,7; экспериментальные данные для конструкционных титановых сплавов, полученные в интервале  $4 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ :  $\blacktriangle$  — сплавы I-ой группы (кривая 1),  $\circ$  — сплавы II-ой группы (кривая 2).

$$Y = a - \frac{b}{1 + cX^d}. \quad (13)$$

Таким образом, зависимость (11) примет вид:

$$\frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} = a - \frac{b}{1 + c \left[ \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} \right]^d}, \quad (14)$$

откуда показатель деформационного упрочнения

$$n^{II} = \frac{\lg(\sigma_i^K / S_B)}{\lg(e_K / e_p)} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_K / e_p)} \left\{ a - b \left( 1 + c \left[ \frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500e_p)} \right]^d \right)^{-1} \right\}, \quad (15)$$

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

Принимая во внимание зависимости (4), (5), (7), (8) и известное выражение для истинной деформации после разрушения образца [2]:  $e_K = -\ln(1 - \psi_K)$ , показатели деформационного упрочнения  $n^I$  и  $n^{II}$  на участке изменения характеристик прочности от  $S_B$  до  $\sigma_i^K$  для конструкционных титановых сплавов каждой из рассмотренных групп можно рассчитать по формулам (12) и (15) соответственно, используя при этом только значения базовых механических характеристик металла  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\psi_K$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 1 приведены оценки точности использования зависимостей (9) и (11) для аппроксимации экспериментальных данных.

Достаточно высокая точность полученных в настоящей работе зависимостей показывает, что предложенная методика может быть использована для дальнейших заключений и расчетов.

Анализ показал, что количество сплавов каждой из двух групп в общем объеме исследованных конструкционных титановых сплавов (см. раздел 2) различно. Соотношение между количеством сплавов, принадлежащих к разным группам, составляет: сплавы I-ой группы —  $\cong 17\%$ , сплавы II-ой группы —  $\cong 83\%$ .

Из общего объема исследованных конструкционных титановых сплавов можно выделить следующие, относящиеся к I-ой группе: некоторые сплавы типа ВТ16 при  $T_{исп.} = 77 \text{ К}$ ; сплавы типа ВТ6 после прокатки при  $T_{исп.} = 293 \text{ К}$ ; некоторые сплавы типа Ti-6, Ti-6-4-V2, Ti-6-4-V7 и др., полученные методом порошковой металлургии при  $T_{исп.} = 293 \text{ К}$ ; некоторые сплавы, легированные бором типа Ti-B

ТАБЛИЦА 1. Оценка точности используемых зависимостей.

№ зависимости	Зависимость	Стандарт S	Параметр для определения достоверности	Доверительный интервал	Достоверность P
(9)	$\frac{\lg\left(\frac{\sigma_i^K}{S_B}\right)}{\lg\left(\frac{S_B}{\sigma_{0,2}}\right)} = \frac{\lg\left(\frac{e_K}{e_p}\right)}{\lg(500e_p)}$	0,012	$\lg\left(\frac{\sigma_i^K}{S_B}\right)$ $\lg\left(\frac{S_B}{\sigma_{0,2}}\right)$	±0,02	0,904
(11)	$\frac{\lg\left(\frac{\sigma_i^K}{S_B}\right)}{\lg\left(\frac{S_B}{\sigma_{0,2}}\right)} = f^{\text{II}} \frac{\lg\left(\frac{e_K}{e_p}\right)}{\lg(500e_p)}$	0,177	$\lg\left(\frac{\sigma_i^K}{S_B}\right)$ $\lg\left(\frac{S_B}{\sigma_{0,2}}\right)$	±0,3	0,909

после определенной обработки при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$ ; сплавы типа Ti + V2, JLCB70CD, Timetal LCB-RR и др. после специальной термической обработки при  $T_{\text{исп.}} = 77 \text{ К}$ ; некоторые сплавы типа ВТ3, ВТ6, ВТ9, ВТ14, ВТ18, ВТ22, ВТ23 и др. после соответствующей термической обработки при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$ .

Ко II-й группе относятся<sup>1</sup>: сплавы типа АТ2, ВТ5-1кт. и др., используемые в криогенной технике в температурном интервале  $4 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ ; высокопрочные сплавы типа Beta-21S, JLCB70CD, Ti-15-3 и др., используемые для создания особо ответственных конструкций в авиакосмической технике при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$ ; высокопрочные сплавы с повышенной пластичностью типа LCB, ВТ16, Ti-15-3 и др., используемые для создания ответственных конструкций, работающих при пониженных температурах —  $77 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ ; другие сплавы, входящие в исследованную выборку.

Влияние температуры испытаний и режима термообработки на принадлежность конструкционного титанового сплава к определенной группе можно проследить на следующих примерах: сплав ВТ16 (нагрев  $800^\circ\text{С}$ , 1 ч, охл. с печью  $500^\circ\text{С}$ , 8 ч) при  $T_{\text{исп.}} = 77 \text{ К}$  относится к I-ой группе, а при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$  — ко II-й группе; сплав ВТ22 при  $T_{\text{исп.}} = 293 \text{ К}$  и следующем режиме термообработки: нагрев  $900^\circ\text{С}$ , 0,5 ч, охл. с печью до  $800^\circ\text{С}$ , 1 ч, охл., воздух +  $750^\circ\text{С}$ , 2 ч +  $625^\circ\text{С}$ , 4 ч, охл., воздух, относится ко II-ой группе, а при режиме термообработки: нагрев  $900^\circ\text{С}$ , 0,5 ч, охл. с печью до  $700^\circ\text{С}$ , 1 ч, охл., воздух +  $750^\circ\text{С}$ , 2 ч +  $475^\circ\text{С}$ , 4 ч, охл., воздух — к I-ой группе.

В таблице 2 приведены результаты расчетов показателей деформационного упрочнения  $n(n^1)$  и  $n^{\text{II}}$  для некоторых конструкционных

<sup>1</sup> Упоминание некоторых типов конструкционных титановых сплавов, принадлежащих к I-ой группе, связано с различием режимов термообработки или температуры испытаний.

**ТАБЛИЦА 2.** Результаты расчетов показателей  $n$  ( $n^I$ ) и  $n^{II}$  в диапазоне  $4 \text{ К} \leq T_{\text{исп.}} \leq 293 \text{ К}$ .

№ п/п	Сплавы	Группа	$T_{\text{исп.}}$ , К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$n$ ( $n^I$ ) (12)	$n^{II}$ (15)
1	BT161	I	77	1500	1680	16,0	0,053	–
2	BT162		77	1400	1560	16,0	0,051	–
3	BT223		293	1135	1240	7,5	0,043	–
4	BT64		293	1286	1475	14,1	0,059	–
5	2Ti-6-45		293	900	1005	25,4	0,054	–
6	Ti + B2		293	1129	1238	21,9	0,047	–
7	JLCB70CD6		293	1448	1679	10,1	0,061	–
8	BT9Л		293	970	1100	15,0	0,062	–
9	BT161	II	293	980	1070	40,0	0,048	0,096
10	BT162		293	900	960	57,0	0,039	0,099
11	BT226		293	1130	1220	19,0	0,041	0,071
12			293	570	660	62,2	0,070	0,139
13			200	700	775	60,0	0,054	0,119
14	AT2		77	940	1077	67,0	0,067	0,140
15			4	1180	1272	53,1	0,044	0,102
16			293	770	835	26,4	0,044	0,081
17			200	950	984	23,7	0,025	0,063
18	BT5-1кт.		77	1230	1325	21,6	0,041	0,073
19			4	1365	1460	16,1	0,038	0,065
20	Beta-21S 7		293	1548	1568	30,8	0,014	0,056
21	Ti-15-38		293	1435	1472	20,4	0,021	0,056
22	LCB		293	1319	1397	58,5	0,036	0,096

*Примечание:* 1 — нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 500°C, 8 ч; 2 — нагрев 800°C, 1 ч, охл. с печью 600°C, 8 ч; 3 — нагрев 900°C, 0,5 ч, охл. с печью до 700°C, 1 ч, охл., воздух + 750°C, 2 ч + 475°C, 4 ч, охл., воздух; 4 — прокатка 1050°C; 5 — нагрев 900°C, 0,5 ч, охл. с печью до 800°C, 1 ч, охл., воздух + 750°C, 2 ч + 625°C, 4 ч, охл., воздух; 6 — нагрев 1205°C, 4 ч; 7 — 10 К·с<sup>-1</sup> до 820°C + 300°C, 90 мин + 450°C, 6,5 ч; 8 — нагрев 880°C, 10 ч, охл. с печью; 8 — нагрев 900°C, 45 мин, охл. с печью + 15% CD + 500°C, 8 ч.

титановых сплавов, испытанных в температурном диапазоне от 4 К до 293 К и принадлежащих к различным группам.

Проведенный анализ показывает, что принадлежность конструкционного титанового сплава к той или иной группе определяется влиянием многих факторов, а именно: типом кристаллической структуры (сплавы с ГПУ- и ОЦК-решетками), химическим составом, видом термической обработки. Кроме того, значительное влияние оказывает температура испытаний, поскольку один и тот же сплав в зависимости от температуры испытания может принадлежать к разным группам.

Согласно полученным результатам, наиболее многочисленной является вторая группа, которая характеризуется увеличением значения показателя деформационного упрочнения в области локализованной деформации. Необходимо подчеркнуть, что к этой группе относятся конструкционные титановые сплавы с различным типом решетки, большим диапазоном изменения содержания титана и легирующих элементов, а также сплавы, подвергнутые различным технологическим видам обработки, в том числе термической, что обуславливает значительное различие структурных состояний этих сплавов.

## 5. ВЫВОДЫ

1. В зависимости от соотношения значений величины показателя деформационного упрочнения  $n$  при деформациях меньших и больших равномерной конструкционные титановые сплавы можно разделить на две группы. Первая характеризуется практически неизменным значением  $n$ , а вторая — увеличением  $n$  в области локализованной пластической деформации.

2. Проведенный статистический анализ достаточно большой выборки конструкционных титановых сплавов показал, что наиболее многочисленной является вторая группа. Характерной особенностью этой группы является то, что в нее входят сплавы с ГПУ- и ОЦК-решетками, большим диапазоном изменения содержания легирующих элементов и значительным различием структурных состояний.

3. Предложен критерий, позволяющий по значениям базовых механических характеристик конструкционного титанового сплава определять характер изменения величины показателя деформационного упрочнения в области неравномерной деформации.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Сопротивление материалов* (Ред. Г. С. Писаренко) (Киев: Высшая школа: 1979).
2. В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков, *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность* (Москва: Машиностроение: 1985).
3. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Киев: Наукова думка: 2008).
4. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Успехи физ. мет.*, **10**, № 2: 207 (2009).
5. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 3: 367 (2009).
6. 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*, Свідоцтво про реєстрацію авторського права № 41448 України (Опубл. 20 грудня 2011 р.) (Бюл. № 26).
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. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, G. A. Pakhareno, and A. V. Shevchenko, *Mater. Sci. Eng. A*, **196**: 65 (1995).
  12. O. M. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, А. В. Шевченко, *Металлофизика*, **14**, № 4: 70 (1992).
  13. *Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие* (Ред. В. В. Панасюк) (Киев: Наукова думка: 1988).
  14. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях* (Ред. Г. С. Писаренко) (Киев: Наукова думка: 1980).
  15. P. E. Markovsky and M. Ikeda, *Mater. Trans.*, **46**, No. 7: 1515 (2005).
  16. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk, S. L. Semiatin, C. H. Ward, and S. Fox, *J. Alloys Compd.*, **457**: 296 (2008).
  17. O. M. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 12: 1643 (2012).