

## СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© О. М. Шаповалова<sup>1</sup>, Л. Н. Иванова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпропетровський національний університет

<sup>2</sup>Придніпровська державна академія будівництва і архітектури

Встановлено, що при зниженні температур до негативних і криогенних міцність титанових сплавів закономірно підвищується, а видовження, відносно звуження, ударна в'язкість зменшуються в зазначеній послідовності. Динаміка зміцнення при охолодженні сплавів до негативних і криогенних температур залежить від ступеня легуваності сплавів. Що більше легований сплав, тим менше його зміцнення при охолодженні. Запропоновано поділ титанових сплавів на три групи відповідно до зміцнення при зниженні температури. Незважаючи на зниження характеристик пластичності й ударної в'язкості, їхня абсолютна величина не зменшувалася нижче рівня пропонованих вимог. Для використання в області негативних і криогенних температур варто віддати перевагу сплавам ВТ6С та ВТ5-1.

В аэрокосмической и ракетной технике материалы различных узлов летательных аппаратов работают в очень широком диапазоне температур — от положительных до отрицательных (153 °С) и криогенных. К числу тех немногих материалов, которые способны выдерживать столь большие колебания температур, не теряя высоких эксплуатационных свойств, относятся титановые сплавы.

Поскольку основным критерием надежности этих материалов является сочетание высокой прочности с пластичностью и ударной вязкостью, был исследован комплекс механических свойств основных

серийных титановых сплавов.

На рис. 1 представлены кривые изменения предела прочности  $\sigma_B$  при понижении температуры от комнатной до отрицательных и криогенных.

Как видно из рис. 1—4, предел прочности  $\sigma_B$ :

— монотонно возрастает от комнатной до отрицательных и криогенных температур (рис. 1);

— коррелирует с количеством легирующих элементов и примесей; на рис. 2 приведено упрочнение для каждого из перечисленных сплавов в связи с суммой легирующих элементов и примесей;

— динамика изменения предела прочности  $\sigma_B$  в области отрицательных и криогенных температур зависит от марки титанового сплава, хотя из анализа гистограмм следует, что наибольшее упрочнение присуще нелегированному титану и сплавам со структурой однородного  $\alpha$  — твердого раствора,

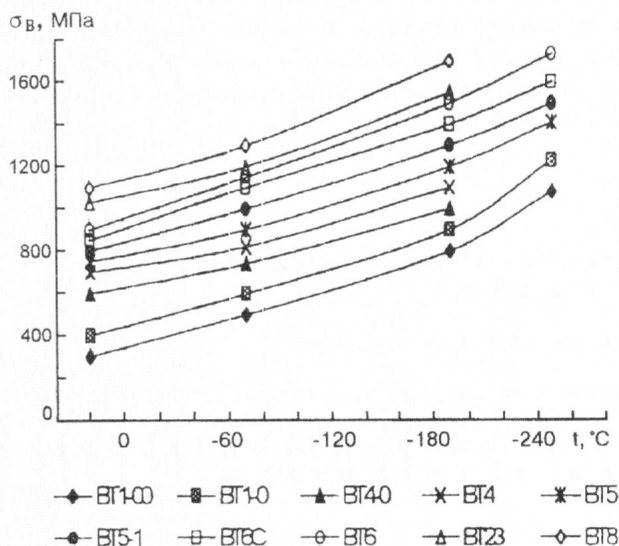


Рис. 1. Изменение предела прочности  $\sigma_B$  титановых сплавов при отрицательных температурах

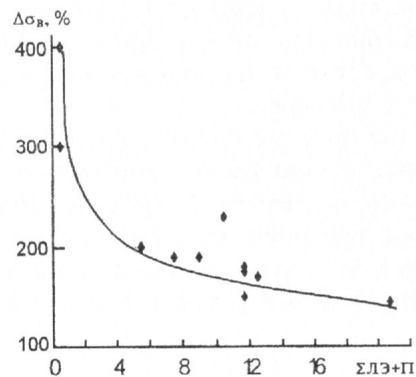


Рис. 2. Влияние суммы легирующих элементов и примесей на упрочнение  $LT\Delta\sigma_B$  титановых сплавов разных марок

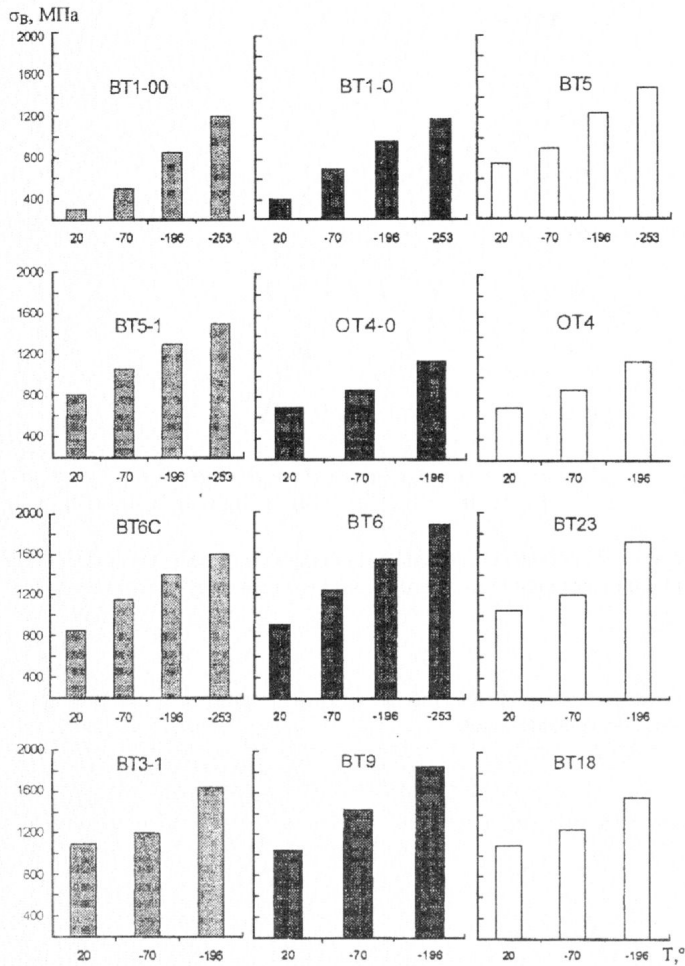


Рис. 3. Гистограммы динамики изменения предела прочности титановых сплавов  $\sigma_B$  в области отрицательных температур  $T$  (°C)

(BT1-00, BT-0, BT5, BT5-1);

— предел прочности  $\sigma_B$  при охлаждении образцов увеличивался в  $N$  раз по сравнению с  $\sigma_B$  при комнатных температурах тем существенней, чем меньше в титановом сплаве сумма легирующих элементов и примесей (рис. 4).

Обнаруженное неоднозначное влияние количества легирующих элементов на величину упрочнения объясняется следующим. Каждый из легирующих элементов, находясь в кристаллической решетке титана, в большей или меньшей степени вызывает ее искажение. Известно, что 1 % Al упрочняет титан на 60 МПа, молибден на 50 МПа и т. д. При одновременном воздействии нескольких легирующих элементов на титан, их влияние на прочность нивелируется [1]. Как оказалось, это одно из основных положений теории многокомпонентного легирования титановых сплавов [2], подтвержден-

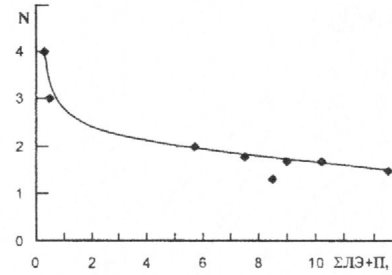


Рис. 4. Увеличение в  $N$  раз предела прочности титановых сплавов по сравнению с  $\sigma_B$  при комнатной температуре в зависимости от  $\Sigma\text{ЛЭ}+\text{П}$

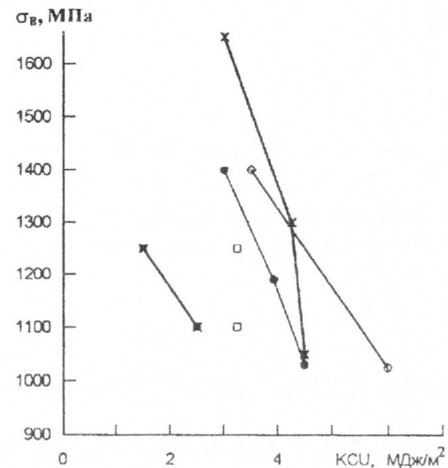


Рис. 5. Изменение ударной вязкости КСУ титановых сплавов в связи с пределом прочности  $\sigma_B$  в области отрицательных температур

ное, также и для исследованных сплавов. При охлаждении титанового сплава расстояние между атомами уменьшается, подобно тому, как при нагреве межатомные расстояния возрастают. Наличие чужеродных атомов-примесей и легирующих элементов обуславливает искажение кристаллической решетки и препятствует ее сжатию тем сильнее, чем их больше в решетке титанового сплава. Достоверность предложенного механизма подвержена приведенными ниже фактами. Так, увеличение количества примесей в нелегированном титане (сплав BT1-00) от 0.36 % мас. до 0.48 % мас. в техническом титане марки BT1-0 вызывает упрочнение в 3 раза от  $\sigma_B^{+20^\circ\text{C}} = 400$  МПа до  $\sigma_B^{-253^\circ\text{C}} = 1200$  МПа. В то же время аналогичное охлаждение в высоколегированном титановом сплаве BT23 (SIGMA ЛЭ-12.6 % мас.) повышает предел прочности от 1050 МПа до 1720 МПа, то есть лишь в 1.6 раза.

Установлено, что по степени упрочнения под действие отрицательных и криогенных температур

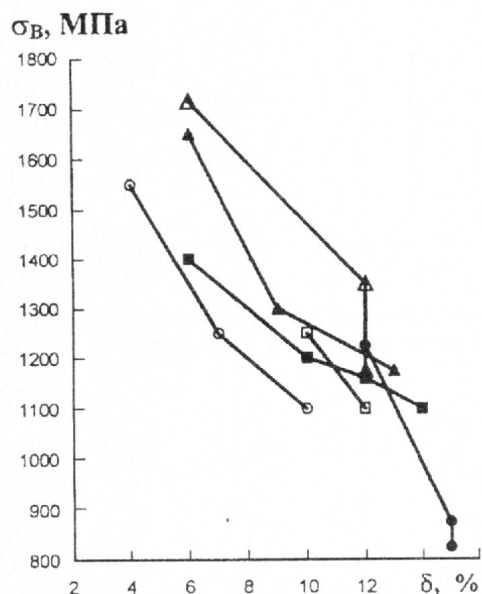


Рис. 6. Изменение относительного удлинения  $\delta$  титановых сплавов и прочности  $\sigma_B$  в области отрицательных температур

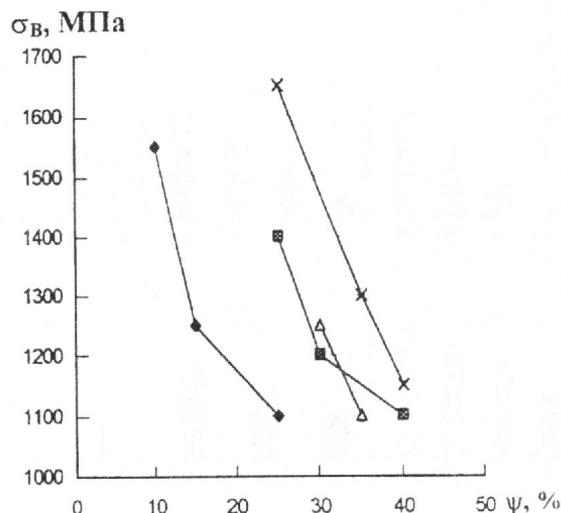


Рис. 7. Изменение относительного сужения  $\psi$  титановых сплавов в связи с пределом прочности  $\sigma_B$  в области отрицательных температур

все титановые сплавы можно разделить на три группы:

1. Нелегированные титановые сплавы (BT1-0, BT1-00) с наибольшим упрочнением  $\Delta\sigma = 104\%$  по отношению  $\sigma_B$  при комнатной температуре.

2. Среднелегированные титановые сплавы BT5, BT5-1, BT6, BT6C с суммой легирующих элементов  $\Sigma\text{ЛЭ} \leq 8\%$ , которым соответствовало упрочнение на  $\Delta\sigma \leq 65\%$ .

3. Высоколегированные титановые сплавы (BT23, BT8, BT9, BT18, BT20, BT3-1) с суммой легирующих элементов  $\Sigma\text{ЛЭ} \geq 8-10\%$  и упрочнением  $\Delta\sigma_B = 50-60\%$ .

Угол наклон графиков повышения прочности при одновременном уменьшении ударной вязкости по отношению к оси ординат зависит от марки сплава (рис. 5), но оказался меньшим, чем для аналогичных кривых  $\sigma_B(\delta)$  и  $\sigma_B(\psi)$  (рис. 6, 7). Это свидетельствует о большей чувствительности КСУ к понижению температуры.

Это обусловлено тем, что границы зерен менее совершенны по структуре, чем основной металл, поскольку они обогащены дислокациями, вакансиями, примесями. Поэтому межзатомная связь на границах заметно меньшая, чем в теле самих зерен. При существенном понижении температуры лимитирующим звеном системы с позиции теории прочности и пластичности оказываются границы зерен и блоков. Поэтому разрушение материала происходит прежде всего по границам зерен, и

Относительное удлинение некоторых титановых сплавов при низких температурах

$t, ^\circ\text{C}$	Относительное удлинение $\delta, \%$		
	BT1-0	BT5-1	BT6C
+20	25	25	13
-70	20	11	11
-196	14	11	10
-253	7	11	2

Для сплава BT1-0  $\delta = 7\%$  ( $-253^\circ\text{C}$ );  
для сплава BT5-1  $\delta = 11\%$  ( $-253^\circ\text{C}$ );  
для сплава BT6C  $\delta = 10\%$  ( $-196^\circ\text{C}$ ).

КСУ с понижением температуры соответственно снижается наиболее резко, что подтверждено экспериментальными данными. Анализ показывает:

— несмотря на резкое повышение прочности  $\sigma_B$  в области отрицательных и криогенных температур пластичность титановых сплавов ( $\delta, \psi$ ) остается достаточно высокой, что обеспечивает  $\delta > 4\%$ ,  $\psi > 25\%$ . Это отличает титановые сплавы от всех других конструкционных материалов и открывает им дорогу для широкого применения в космической технике и других отраслях промышленности;

— значительное повышение прочности титановых сплавов в области отрицательных и криогенных температур не вызывает падение КСУ ниже допустимых пределов. Для всех легированных титановых сплавов оно оказывается выше  $3 \text{ МДж/м}^2$ , что соответствует требованиям, предъявляемым к конструкционным сплавам.



Вместе с тем благородство титановых сплавов выразилось в том, что пластические свойства и ударная вязкость хотя и уменьшились, но оставались в пределах требуемых норм (табл. 1):

Наиболее предпочтительными для низких и криогенных температур являются сплавы ВТ6С (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ) и сплав ВТ5-1 (до  $-153^{\circ}\text{C}$ ), как имеющие структуру однородного твердого раствора.

Таким образом, титановые сплавы обладают уникальными свойствами при отрицательных и криогенных температурах, что позволяет широко применять их не только в космической и оборонной технике, но и во всех отраслях промышленности, поскольку в химической, строительной, пищевой, металлургической и др. отраслях требуется работа материала в широком диапазоне температур от отрицательных до комнатных и положительных.

#### ВЫВОДЫ

1. Установлена зависимость величины прочности от температуры испытаний в области отрицательных и криогенных температур.

2. Доказано, что степень упрочнения титановых сплавов с понижением температуры зависела от степени их легированности.

3. На основании пункта 2 сплавы разделены на три группы: нелегированные, среднелегированные и высоколегированные материалы, каждый из которых упрочняется по своим закономерностям.

4. Выданы научно обоснованные рекомендации по

использованию при низких и криогенных температурах наиболее подходящих сплавов ВТ6С и ВТ5-1.

5. Показано, что понижение температуры обуславливает уменьшение ударной вязкости, относительного удлинения и сужения, которые однако, по абсолютной величине находятся в пределах предъявляемых требованиями.

1. Шаповалова О. М., Иванова Л. Н. Влияние содержания легирующих элементов и примесей на прочность титановых сплавов // Строительство, материаловедение, машиностроение. — Днепропетровск: ИГАСиА, 2001. — С. 111—113.
2. Шаповалова О. М. Основы создания многокомпонентных титановых сплавов из отходов: Дис. ... докт. техн. наук. — К, 1972. — 419 с. — Машинопись.

#### TITANIUM ALLOYS PROPERTIES FOR AEROSPACE ENGINEERING AT THE NEGATIVE AND CRYOGENIC TEMPERATURES

O. M. Shapovalova, L. N. Ivanova

It is determined that at the temperatures fall to the negative and cryogenic the titanium alloys strength naturally rises but the elongation, relative reduction and impact strength decreases in the indicating succession. The dynamics of amplification at the alloys cooling to the negative and cryogenic temperatures depends on alloying level. The more alloying the less amplification during the cooling. A division of the titanium alloys in three groups according to the amplification at the temperature decreases is proposed. In spite of the decrease of plasticity characteristics and impact strength their absolute value not decreases below the level of the proposed demands. It should be presented to the alloys VT6S and VT5-1 to their use in the negative and cryogenic temperatures.

УДК 621.74.04 (075)

### КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ РАЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© О. М. Шаповалова, А. В. Калинин

Дніпропетровський національний університет

Розроблені та впроваджені у виробництво багатоконпонентні модифікатори-мікролегітури Fe-C сплавів, одержані безрозплавним способом. Створена класифікація існуючих модифікаторів за їхнім впливом на структуру та властивості сплавів.

Изменение размеров литого зерна в Fe-C-сплавах может достигаться модифицированием либо деформацией [1]. Обработка металлов деформацией позволяет получить слиток высокого качества, однако такой способ не всегда является приемлемым, по-

скольку требует больших энергозатрат, производственных площадей и неблагоприятно влияет на экологическую обстановку. Модифицирование расплава в жидком состоянии является наиболее предпочтительным способом. Однако существующие в на-