

## МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ КИСЛОРОДОМ

*Исследовано влияние способа введения кислорода в процессе производства титана на структуру слитков, механизмы разрушения и механические характеристики сплавов типа ВТ1-0.*

**Ключевые слова:** титан, слиток, кислород, порошок  $TiO_2$ , излом.

### Введение и цель работы

Титан и его сплавы заняли одно из ведущих мест среди конструкционных металлических материалов для ответственных деталей, особенно летательных аппаратов, благодаря высокой удельной прочности, пластичности и вязкости разрушения. Применение высоколегированных титановых сплавов не всегда оправдано, поскольку выплавка и термомеханическая обработка таких материалов требуют специального оборудования и являются дорогостоящими. К тому же, введение таких легирующих элементов, как молибден, вольфрам, ванадий утяжеляет сплав. Снижение веса при сохранении высокой конструкционной прочности важно для деталей авиационного назначения. Поэтому для титановых сплавов необходим поиск новых решений. Анализ отечественных и зарубежных публикаций показал, что в последние годы получило развитие новое направление в легировании титана – это применение элементов внедрения, в частности кислорода, в регламентированных пределах с целью повышения прочностных характеристик сплава. Эффективность легирования титана кислородом показана в работах [1, 2]. Упрочняющее действие кислорода объясняли искажением гексагональной решетки титана при образовании твердого раствора. С ростом содержания элемента внедрения соотношения параметров кристаллической решетки  $c/a$  увеличивается, приближаясь к значению  $(c/a)$  для гексагональной плотноупакованной решетки [3].

При этом данные относительно влияния содержания кислорода, способов его введения на механизмы разрушения и механические свойства титановых сплавов противоречивы и неоднозначны. Так, в более ранних работах указывали на отрицательное влияние элементов внедрения, обусловленном образованием хрупкого  $\alpha$ - твердого раствора и рекомендовали их содержание в сплавах ограничивать до 0,15 % [4, 5]. Авторы работы [1] охрупчивание сплавов системы «титан-кислород» объясняли, главным образом, формированием грубой литой структуры, а при возрастании содержания до 0,22 %  $O_2$  – переходом от пластинчатого к игольчатому строению  $\alpha$ - фазы и не рассматривали

влияние соединений  $TiO_2$  на механизмы разрушения и механические свойства титановых сплавов. Кроме того, об изменении морфологии микроструктуры литого титана, легированного кислородом, с равноосной на тонкопластинчатую (при концентрации кислорода более 0,18 %) также отмечалось в работе [3]. При этом авторами установлено, что такое изменение микроструктуры приводило к снижению работы разрушения и трещиностойкости в 2 раза, что объясняли охрупчиванием  $\alpha$ -пластин и снижением локальной пластичности в вершине трещины. В то же время, известны работы [6, 7], в которых показано, что определяющим фактором в хрупком разрушении явились именно соединения титана с кислородом, нерастворенные на стадии выплавки с применением дисперсного порошка  $TiO_2$ , а не микроструктурные параметры  $\alpha$ - титана.

При легировании титана кислородом важным фактором является его распределение в слитке, а также в каком виде он вводится в шихту, что в конечном итоге определяет качество титановых слитков. Таким образом, на данном этапе необходимо уточнить влияние кислорода и способа его введения на микроструктуру, механизмы разрушения и механические свойства титана, что позволит рассматривать возможность расширения пределов его содержания в титановых сплавах.

Цель работы – исследование влияния способа введения кислорода на механизмы разрушения и механические свойства литого титана типа ВТ1-0.

### Методики, оборудование для проведения исследований

В качестве оборудования использованы промышленные установки восстановления титана и вакуумной сепарации блоков реакционной массы в аппаратах диаметром 1,0 м, производительностью 0,87 тонн/цикл. Эти аппараты действуют в промышленном корпусе № 1 ГП «ЗТМК». Химический состав определяли рентгеноспектральным методом (СТП 140 2005, ГОСТ 9853.5-96, ГОСТ 19863.1-91, ГОСТ 1986.12-91). Распределение кислорода и регламентированных примесей (ГОСТ 17746-96) по блоку титана губчатого исследовали на локальных пробах фракции -30+12 мм. Исследование макро- и

микроструктуры проводили на травленых шлифах. Шлифы травили в растворе плавиковой (5 %) и азотной (5 %) кислот с использованием оптического микроскопа «NEOPHOT-32» и растрового электронного микроскопа JSM-T300 фирмы «JEOL» при ускоряющем напряжении (20–30) кВ во вторичных электронах. Определяли основные механические характеристики: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение (ГОСТ 1497-84, ДСТУ 2824-94), ударную вязкость (ГОСТ 9454-78).

**Результаты исследования, их обсуждение**

Для определения влияния способа введения кислорода на свойства титановых слитков исследовали свойства слитка, полученного из блоков титана губчатого с заданным содержанием кислорода, и слитка, полученного путем дошихтовки TiO<sub>2</sub>. Результаты исследований по распределению кислорода в объеме слитков и механические свойства представлены в таблице 1.

В слитках, полученных из титана губчатого с заданным содержанием O<sub>2</sub>, кислород распределен равномерно. Слитки, полученные с дошихтовкой TiO<sub>2</sub>, имели больший разброс кислорода по объему. Разброс свойств не превышал 6 % по относительному удлинению и около 19 % по относительному сужению, что в 2 раза меньше, чем для сплавов с TiO<sub>2</sub>. Наличие образцов с низким уровнем прочности, по-видимому, является следствием неполного растворения частиц TiO<sub>2</sub>.

Анализ характера разрушения показал, что в образцах из слитков, выплавленных с применением TiO<sub>2</sub>, имело место преждевременное хрупкое разрушение (рис. 1, а). По-видимому, эти частицы послужили причиной хрупкого разрушения, что в конечном итоге существенно снизило уровень механических свойств. Для образцов из сплава, полученного путем легирования губчатого титана, характерным было вязкое разрушение с образованием утоненной шейки в центральной зоне рабочей части разрывных образцов (рис. 1, б).

**Таблица 1** – Распределение кислорода и механических свойств в слитке

Сплав/способ получения		Содержание O <sub>2</sub> , %	Механические свойства			
			σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %	ψ, %
типа ВТ1-0		до 0,30	≥240	≥170	≥24	≥30
дошихтовка TiO <sub>2</sub>	низ	0,22	410	370	18	29
	центр	0,27	457	415	13	36
	верх	0,31	420	370	15	38
из титана губчатого с заданным содержанием кислорода	низ	0,23	430	295	20	50
	центр	0,28	480	320	18	40
	верх	0,26	470	410	19	45



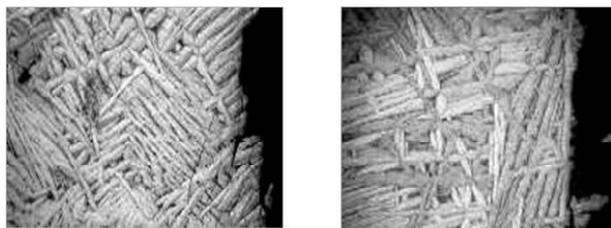
а



б

**Рис. 1.** Влияние способа введения кислорода на характер разрушения образцов титана типа ВТ1-0:

а – кислород введен в виде TiO<sub>2</sub>; б – кислород введен в титан губчатый

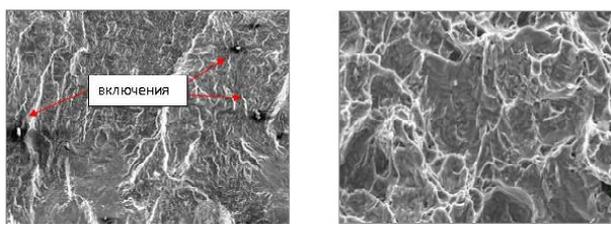


*a*

*б*

**Рис. 2.** Микроструктура образцов из слитков титана, полученных с различной технологией введения кислорода,  $\times 200$ : *a* – в виде  $TiO_2$ ; *б* – в газовой смеси с аргоном

Литой титан, полученный с применением  $TiO_2$ , имел характерные включения в объеме металла, обусловившие, по-видимому, образование хрупких фасеток на поверхности разрушения (рис. 3, *a*). В образцах из титана, легированного кислородом в газовой смеси, разрушение имело преимущественно вязкий характер. На поверхностях разрушения таких образцов преобладал ямочный рельеф, на фоне которого просматривались отдельные плоские площадки – результат разрушения по границам  $\alpha$ - пластин либо их пачек (рис. 3, *б*).



*a*

*б*

**Рис. 3.** Фрактограммы разрушения слитков титана типа BT1-0, полученных с различной технологией введения кислорода,  $\times 2000$ : *a* – в виде  $TiO_2$ ; *б* – в газовой смеси с аргоном

Таким образом, имеющиеся в структуре слитков включения оказывают существенное влияние на механизм разрушения титана.

## Выводы

1. В структуре слитков, легированных кислородом посредством введения порошка  $TiO_2$ , присутствовали характерные включения, которые, очевидно, являлись источниками зарождения трещин и, как следствие, способствовали снижению механических характеристик.

2. Структура слитков, полученных из титана губчатого с содержанием кислорода до 0,28 %, имела параметры, аналогичные промышленным сплавам типа BT1-0, механические характеристики находились на уровне требований нормативных документов.

## Список литературы

1. Легирование металла азотом из газовой фазы в процессе ЭШП / [А. Д. Рябцев, А. А. Торьянский, Е. Л. Корзун и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2002. – № 4. – С. 3–8.
2. Получение титана повышенной прочности путем легирования кислородом в процессе камерного электрошлакового переплава / [А. Д. Рябцев, С. И. Давыдов, А. А. Торьянский и др.] // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 3. – С. 3–6.
3. Дроздовский Б. А. Трещиностойкость титановых сплавов / Б. А. Дроздовский, Л. В. Проходцева, Н. И. Новосильцева. – М. : Metallurgia, 1983 – 192 с.
4. Пульцин Н. М. Взаимодействие титана с газами / Н. М. Пульцин. – М. : – Metallurgia, 1969. – 216 с.
5. Александровский С. В. О загрязнении титана губчатого кислородом / С. В. Александровский, А. А. Захаревич // Цветная металлургия.– 1980.– № 6. – С. 87–88.
6. Влияние легирования кислородом титана губчатого на структуру и механические свойства литого титана / [А. В. Овчинников, С.И. Давыдов, В.Г. Шевченко и др.] // Ti – 2007 в СНГ : сб. научн. тр. / Межгосударственная ассоциация Титан, Нац. Академия наук Укр., Запорожский титано-магниевого комбинат.– Киев, 2007. – С. 170–173.
7. Давыдов С. И. Исследование влияния способа введения кислорода на структуру и свойства литого титана / С. И. Давыдов, В. Г. Шевченко, А. В. Овчинников // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр., вып. 48, ч. 3. – Днепропетровск, ПГАСА, 2009. – С. 125–132.

Одержано 04.06.2014

### Шевченко В.Г. Механізми руйнування конструкційних титанових сплавів, легованих киснем

*Досліджено вплив способу введення кисню в процесі виробництва титану на структуру виливків, механізми руйнування та механічні характеристики сплавів типу BT1-0.*

**Ключові слова:** титан, виливок, кисень, порошок  $TiO_2$ , злам.

### Shevchenko V. Mechanisms of fracture of titanium alloys, alloyed with oxygen

*Influence of oxygen introduction technology in process of titanium production over ingot structure, destruction mechanisms and mechanical properties of BT1-0 type alloys are investigated.*

**Key words:** titanium, ingot, oxygen, powder  $TiO_2$ , fracture.