

## Влияние бора на структуру и механические свойства литых $\gamma$ -TiAl сплавов

В. С. Голтвяница, О. И. Баньковский, Э. И. Цивирко,  
С. К. Голтвяница

*Установлено, что модифицирование бором в оптимальной концентрации 0,15—0,25% (мас.) литых  $\gamma$ -TiAl сплавов позволяет улучшить их механические свойства при температурах до 700 °С.*

**Ключевые слова:** модифицирование, гамма титан-алюминиевые сплавы, твердость, плавка.

Одним из действенных способов воздействия на литую структуру металлов и сплавов является их модифицирование. При введении небольших добавок — модификаторов (B, Sc, Y, La, Ce, Nb, Mo, C) — изменяются основные параметры процесса кристаллизации, что приводит к изменению структуры металла и, как правило, к улучшению его свойств [1].

Известно, что малые добавки бора к обычным титановым сплавам заметно изменяют их микроструктуру и свойства [2]. Бор полностью растворяется в жидком титане, однако практически нерастворим в твердом ( $\leq 0,05\%$  (мас.) при 750 °С). При легировании титана бором ( $> 18\%$  (мас.)) выделяется тугоплавкая TiB-фаза, упрочняющая металлическую матрицу. Поэтому упрочнение бором может быть перспективным для повышения жаропрочности титановых сплавов [3, 4]. Успешно применяют боридное упрочнение порошкового материала XDTiAl [5], а также карбидно-боридное — литого сплава Ti—6Al—4V [6]. Бор использовали в качестве самостоятельной легирующей добавки в количестве 0,1—1,5% (ат.) для повышения упругих свойств многокомпонентных титановых сплавов системы Ti—Al—Sn—V—Cr—Mo [7]. В качестве рафинирующей добавки (0,02—0,2% (ат.)) бор широко применяется при выплавке многих титановых сплавов [8]. В работах [9—12] описывается применение добавок 0,3—0,8% (ат.) бора в TiAl сплавы, легированные ниобием, с содержанием алюминия 45—48% (ат.) с целью улучшения их механических свойств. Высокопрочные гранулированные титановые сплавы с интерметаллидным типом упрочнения получены из сплава VT22, легированного ~0,2% (мас.) бора [13]. Исследовано введение 0,01% (мас.) бора в двойной сплав Ti—48% (ат.) Al с целью измельчения структуры и изучения температурной зависимости их прочностных свойств ( $\sigma_B$ — $\sigma_{0,2}$ ) [14].

Таким образом, бор достаточно широко и успешно применяется для улучшения свойств титановых и двойных гетерофазных ( $\alpha_2 + \gamma$ )-сплавов. Однако аналогичное использование бора в количестве 0,03—0,8% (мас.) для литых сплавов на основе моноалюминида  $\gamma$ -TiAl малоизвестно.

\*Здесь и далее составы сплавов и концентрации добавок приведены в % (мас.).

Цель настоящего исследования — определить влияние добавок бора (0,03—0,8%) на структуру, жаропрочность и механические свойства литых сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl.

### Материалы и методика исследования

Сплавы Ti—36Al с различной концентрацией бора (0,03—0,8%) получены методом сплавления спрессованных шихтовых брикетов (губчатый титан марки ТГ 110М, ГОСТ 17746-79; алюминий марки А8, ГОСТ 11070-74; лигатура TiB с содержанием бора 1%) в лабораторной вакуумно-дуговой печи при силе тока около 420—450 А и напряжении 40—45 В. В начальный период плавки вакуумированием в камере печи достигали остаточного давления 0,12 Па, после чего камера заполнялась аргоном марки А чистотой 99,8% (ГОСТ 10157-73) до давления 50 кПа. Слитки  $\varnothing 65 \times 12$  мм и массой 200 г получали в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Механические характеристики определяли в испытаниях на сжатие (образец размером 4x4x6 мм) при комнатной температуре. В процессе испытаний образцы нагружали до разрушения.

Испытания на жаропрочность (НУ1-3600, таблица) проводили одним из ускоренных методов — определяли длительную твердость (значение твердости после выдержки 1 ч и нагрузке 1 кг) при гомологических температурах:  $0,4T_{пл}$  Ti (~500 °С),  $0,5T_{пл}$  Ti (~700 °С) и  $0,6T_{пл}$  Ti (~900 °С) [2]. Перед испытаниями образцы отжигали при  $0,6T_{пл}$  Ti в течение 1 ч для снятия литейных напряжений.

Твердость по Виккерсу измеряли по стандартной методике согласно ГОСТ 2999-75. Микроструктуру травленных шлифов сплава исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Superprobe-733 “JEOL”.

### Результаты исследований и их обсуждение

В таблице и на рис. 1 представлены результаты испытаний на длительную твердость (жаропрочность) исследуемых литых сплавов Ti—36Al, дополнительно легированных 0,03—0,80% бора. Бор достаточно эффективно повышает жаропрочность  $\gamma$ -TiAl сплавов лишь до температуры 700 °С. При более высоких температурах влияние бора незначительно.

Минимальная жаропрочность сплавов при содержании бора 0,05% может быть обусловлена проявлением Scavenger Effect [15, 16]. Но наблюдаемый эффект снижения твердости при малых концентрациях бора требует дальнейшего изучения.

Структурные исследования (рис. 2) показали, что первые частицы боридной фазы начинают выделяться уже при концентрации бора 0,05%. При дальнейшем повышении концентрации бора количество частиц боридной фазы возрастает (рис. 2, в—ж), а сами частицы укрупняются.

Известно, что эвтектический характер фазовых равновесий термодинамически очень устойчив и поэтому можно предположить, что, несмотря на сильное легирование алюминием, он сохранится и в тройной системе Ti—Al—B. Эвтектическая смесь будет состоять из  $\gamma$ -TiAl твердого раствора и боридов неизвестного состава — либо TiB, либо смешанного состава с алюминием.

**Влияние микролегирования бором на длительную твердость ( $HV1-3600$ ) и твердость литого сплава  $Ti-36Al$**

Присадка бора (расчетная), % (мас.)	Длительная твердость ( $HV1-3600$ , МПа) при температуре ( $^{\circ}C$ )			Твердость $HV30$ , МПа
	500	700	900	
0	2190	1480	470	2230
0,03	2230	1660	730	2230
0,05	1750	1280	560	2170
0,10	2190	1530	650	2220—2420
0,20	2505	1870	630	2430—2520
0,30	2040	1660	660	2230
0,40	1980	1410	650	—
0,50	—	—	—	2400
0,80	2190	1640	690	—

Форма частиц (в основном линейно-игольчатая) (рис. 2) характерна для эвтектических сплавов, где первичное формирование тугоплавких частиц  $TiB$  происходит в жидкой среде  $\gamma-TiAl$  сплава. Матрица сплавов имеет типичную lamellarную структуру, то есть полностью двойникованные пластины  $\gamma-TiAl$  (рис. 2, а) [17].

Рост жаропрочности сплавов при дальнейшем увеличении содержания бора до 0,2% вызван не появлением частиц новой фазы (слишком малое её количество при такой концентрации бора), а, скорее, дополнительной растворимостью бора в  $\gamma-TiAl$  твердом растворе, то есть образованием узкой (до ~0,2% В) области ( $\gamma-TiAl-B$ ) твердого раствора. Увеличение концентрации бора в нем логично приводит к повышению прочности. Также хорошо известно, что максимум жаропрочности появляется на границе предельного насыщения твердого раствора, в данном случае при содержании бора 0,2%.

Чтобы получить общее представление о прочностных свойствах сплавов  $\gamma-TiAl + B$ , измеряли твердость по Виккерсу  $HV-30$  (рис. 3). Видно, что характер зависимости твердости от микролегирования сплава  $\gamma-TiAl$  бором такой же, как и для рассмотренной зависимости жаропрочности. Это свидетельствует о том, что исследуемые сплавы имеют стабильную структуру в широком диапазоне температур 20—900  $^{\circ}C$ .

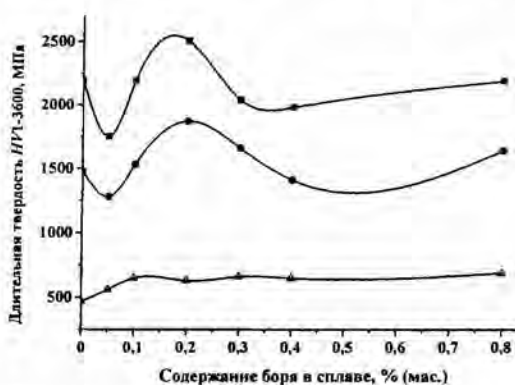


Рис. 1. Влияние бора на длительную твердость сплава  $Ti-36Al$  при температурах 500 (■), 700 (●) и 900  $^{\circ}C$  (▲).

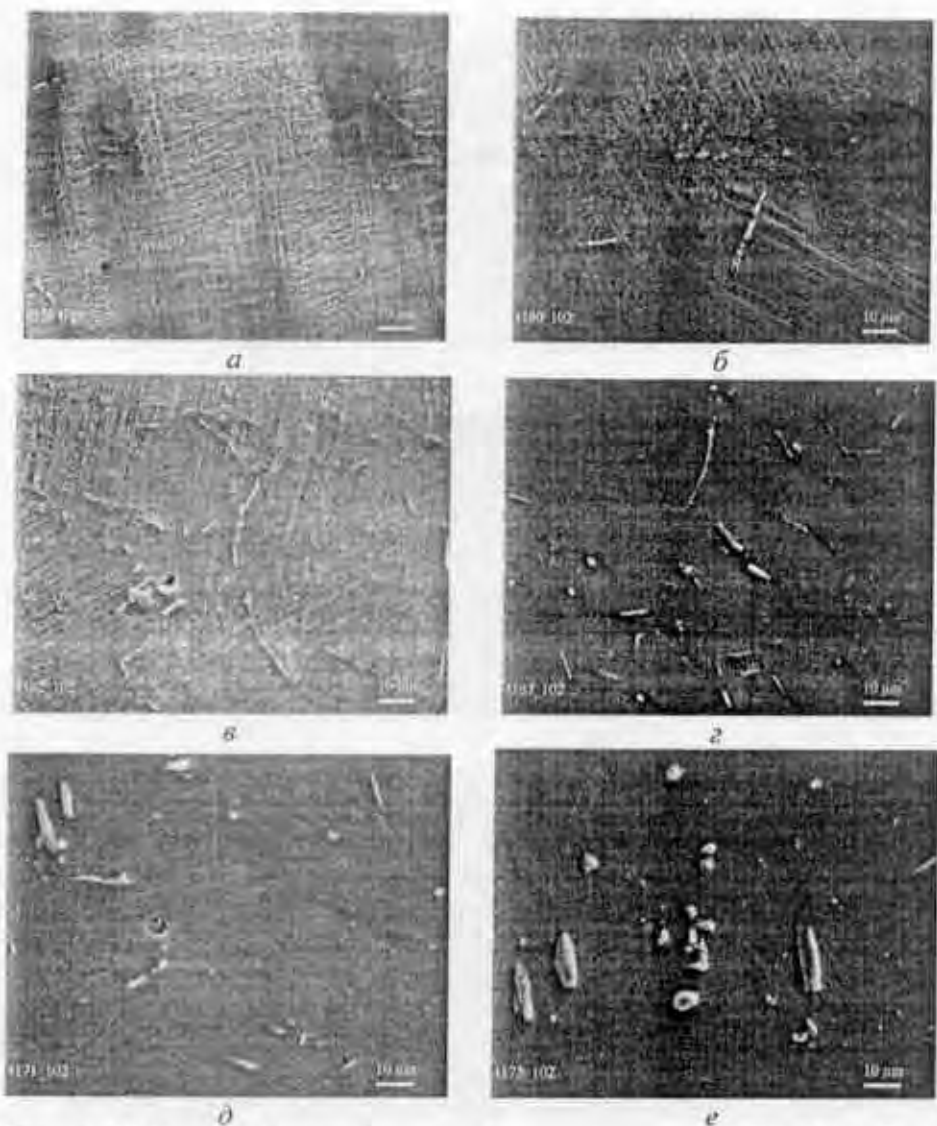


Рис. 2. РЭМ микрофотографии структур литых сплавов Ti—36Al—V с различной концентрацией бора (% (мас.)): а—0,05; б—0,1; в—0,2; г—0,3; д—0,4; е—0,8.

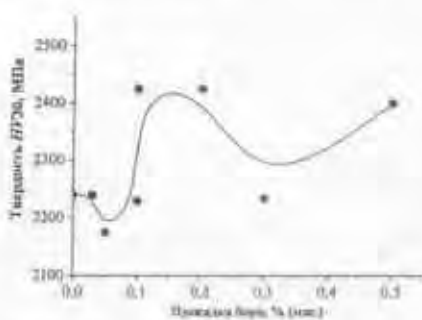


Рис. 3. Зависимость твердости по Виккерсу от состава литых сплавов Ti—36Al—V.



Рис. 4. Механические свойства литых сплавов Ti—36Al с добавками бора.

Известно, что для пластичных сплавов между твердостью по Виккерсу HV и временным пределом прочности при растяжении  $\sigma_B$  существует эмпирическое соотношение [18]

$$\sigma_B \approx 0,3HV.$$

Следовательно, микролегирование литых сплавов  $\gamma$ -TiAl бором позволяет увеличить их прочность с  $\sim 660$  до  $\sim 750$  МПа (сплав  $\gamma$ -TiAl + 0,2 В), то есть на 15%. Эти значения несколько выше величины  $\sigma_B$  (300—550 МПа), чаще всего встречающейся в литературе, но как ориентировочные они могут быть использованы.

Для измерения конкретных прочности и пластичности рабочих сплавов проведены испытания на сжатие (рис. 4). Испытания заканчивались разрушением образцов. Видно, что с увеличением концентрации бора прочность и пластичность сплавов растут аналогично повышению твердости. Прочность сплавов увеличивается примерно в два раза, а пластичность — в три.

### Выводы

Установлено, что при легировании  $\gamma$ -TiAl сплавов бором процесс выделения тугоплавких частиц TiB имеет эвтектический характер.

Микролегирование  $\gamma$ -TiAl сплавов с оптимальной концентрацией бора 0,15—0,25% позволяет улучшить их прочность, пластичность и жаропрочность при температуре до 700 °С.

1. *Магницкий О. Н.* Литейные свойства титановых сплавов. — М.: Машиностроение, 1968. — 120 с.
2. *Miracle D. B., Miracle D. B., Srinivasan R., Gunasekera J. S.* Titanium alloyed with boron // *Adv. Mater. & Proc.* — 2006. — December. — P. 41—43.
3. *Захаров М. В., Захаров А. М.* Жаропрочные сплавы. — М.: Metallurgia, 1972. — 384 с.
4. *Titanium '92, Science and Technology.* The Minerals, Metals, Materials Society, 1993. — 2500 p.
5. *Yolton C. F., Moll I. H.* Evaluation of a discontinuously reinforced Ti—6Al—4V composite // *Titanium '95, Science and Technology.* — 1995. — 2. — P. 2755—2761.
6. *Xizhe W., Zhinai Z., Songxiao H. et al.* Development of high elastic modulus and high strength titanium alloys // *Ibid.* — P. 659—665.
7. *Saito T., Furuda T.* Development of low cost Ti-matrix composite // *Ibid.* — P. 845—900.
8. *Furrer D., Hoffman R., Fucks G.* TiAl-based ingot conversion via forging // *Ibid.* — P. 1245—1258.
9. *Cheng T. T.* The mechanism of grain refinement in TiAl alloys by boron addition — an alternative hypothesis. *Intermetallics* // *Intermetallics.* — 2000. — 8, Issue 1. — P. 29—37.
10. *Li Z. X., Huang Xia, Qi L. C. et al.* Beneficial effects of boron addition into  $\gamma$ -TiAl alloys // *THERMEC 2006, Materials Science Forum (Vol. 539—543).* — 2007. — March. — P. 1451—1456.
11. *Wang W. D., Ma Y. C., Chen B. et al.* Effects of boron addition on grain refinement in TiAl-based alloys // *J. of Mater. Sci. & Techn.* — 2010. — 26, Issue 7. — P. 639—647.
12. *Wang W., Ma Y., Chen B. et al.* Solidification features of Ti45Al alloys with different boron addition // *Ibid.* — 2009. — 25, Issue 6. — P. 814—818.

13. Сысоева Н. В., Моисеев В. Н. Высокопрочные гранулированные титановые сплавы с интерметаллидным типом упрочнения // *Металловедение и термическая обработка металлов.* — 2002. — № 7. — С. 38—42.
14. Банных О. А., Поварова К. Б., Браславская Г. С. и др. Механические свойства литых сплавов  $\gamma$ -TiAl // Там же. — 1996. — № 4. — С. 11—14.
15. Ravi K. V., Gibala R. The strength of niobium-oxygen solid solutions // *Acta Metallurgica.* — 1970. — 18, Issue 6. — P. 623—634.
16. Ulitchny M. G., Gibala R. Mechanical properties of interstitial alloys of niobium // *J. of the Less Common Metals.* — 1973. — 30, Issue 1. — P. 177—180.
17. Илларионов Э. И. Разработка жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Технология легких сплавов.* — 1999. — № 6. — С. 39—55.
18. Трефилов В. И., Моисеев В. Ф. Дисперсные частицы в тугоплавких металлах. — К.: Наук. думка, 1978. — 237 с.

### **Вплив бору на структуру та механічні властивості литих $\gamma$ -TiAl сплавів**

В. С. Голтвяниця, О. І. Баньковський, Е. І. Цивірко, С. К. Голтвяниця

*Встановлено, що модифікування бором в оптимальній концентрації 0,15—25% (мас.) литих  $\gamma$ -TiAl сплавів дозволяє покращити їхні механічні властивості за температур до 700 °С.*

**Ключові слова:** модифікування, гамма титан-алюмінієві сплави, твердість, плавка.

### **Influence of boron on structure and mechanical properties of as-cast $\gamma$ -TiAl alloys**

V. S. Goltvyanitsa, O. I. Ban'kovsky, E. I. Tsyvirko, S. K. Goltvyanitsa

*Modification with boron of as-cast  $\gamma$ -TiAl alloys in the optimal concentration of 0,15—0,25% (wt.) can improve their mechanical properties at temperatures up to 700 °C was established.*

**Keywords:** modification, gamma titanium-aluminium alloys, hardness, melting.