

Структура та механічні властивості евтектичного сплаву системи Ti—Si—B, легованого Sn

І. Д. Горна, К. О. Валуйська, М. Д. Бега, С. С. Пономарьов,
В. В. Ковиляєв, А. В. Котко, Я. І. Євич, С. О. Фіретов

Досліджено вплив олова на структуру, фазовий склад та фізико-механічні властивості евтектичного сплаву системи Ti—Si—B. Встановлено підвищення пластичності литого сплаву Ti—6,4Si—0,5B в два рази при легуванні його 5% (мас.) Sn. Показано, що збільшення концентрації олова до 12% (мас.) приводить до зростання міцності та жароміцності литого сплаву Ti—Si—B при незначному підвищенні низькотемпературної пластичності.

Ключові слова: система Ti—Si—B, евтектика, легування оловом, структура, механічні властивості.

Вступ

Евтектичні сплави потрійної системи Ti—Si—B, за даними останніх досліджень, демонструють унікальні для титанових сплавів характеристики, в першу чергу підвищені високотемпературні властивості, що поєднуються з високими модулями пружності [1—5]. Структура таких сплавів містить дисперсну евтектику (β^* -Ti, перетворений в α -Ti, + Ti_6Si_2B) з об'ємною долею потрійної сполуки Ti_6Si_2B близько 50%. Авторами робіт [1, 3, 4] показано, що сплави, які зміцнені тільки однією евтектичною силіко-боридною фазою Ti_6Si_2B або в комбінації з евтектичними боридною TiB та силіцидною Ti_5Si_3 , можуть стати базовими для розробки жароміцних і жаростійких титанових сплавів з підвищеною жорсткістю. Важливою особливістю фази Ti_6Si_2B є ізотропність її коефіцієнта термічного розширення [6]. Проблемою залишається обмежена низькотемпературна пластичність таких *in situ* композитів. Одним із перспективних легуючих елементів, що може покращити пластичність литих сплавів Ti—Si—B, вважається Sn [7—9].

Метою даної роботи є вивчення впливу Sn на структуру і фізико-механічні властивості евтектичних сплавів системи Ti—Si—B в області, багатій на титан.

Матеріали і методи дослідження

Зливки масою до 100 г одержували методом аргонно-дугової плавки з невитратним електродом на мідному водоохолоджуваному піддоні в інертному середовищі з чистих матеріалів. Структуру і фазовий склад сплавів досліджували методами світової (СМ), сканівної (СЕМ) і трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ), рентгеноструктурного аналізу, локальними методами рентгеноспектрального аналізу (ЛРСА) та електронної Оже-спектроскопії. Мікрофотографії структури сплавів наведено на рис. 1, 2.

Механічні властивості (границі міцності σ_p і пружності $\sigma_{0,2}$, пластичність ϵ , модуль пружності E) визначали на зразках розмірами $3,5 \times 5 \times 50$ мм

© І. Д. Горна, К. О. Валуйська, С. С. Пономарьов, В. В. Ковиляєв,
А. В. Котко, М. Д. Бега, Я. І. Євич, С. О. Фіретов, 2010

за чотириточковим згином при кімнатній температурі. Вимірювання твердості за Віккерсом виконано з навантаженням 300 Н, а мікротвердості — з навантаженням 50 г. Фазовий склад і фізико-механічні властивості сплавів наведено в табл. 1. Жароміцність оцінювали експресним методом вимірювання довготривалої твердості протягом 1 год при навантаженні 10 Н в інтервалі температур 300—700 °С (рис. 3).

Результати та їх обговорення

На рис. 1 представлено структуру базового сплаву 1, яка являє собою дуже дисперсну подвійну евтектику, що складається, згідно з даними структурного і рентгенофазового аналізу, з твердого розчину перетвореного β^* -Ti (α -Ti) і потрійної інтерметалідної фази Ti_6Si_2B (табл. 1). Частинки останньої діаметром 200—400 нм мають стрижнеподібну форму (рис. 1, б, в).

Сплави 2 і 3, леговані Sn, мають доевтектичну структуру (рис. 2, д—м), яку створюють три фази — дендрити твердого розчину перетвореного β^* -Ti (α -Ti), силіко-боридна (Ti_6Si_2B) і силіцидна (Ti_5Si_3) фази. Відмічається, що розмір частинок зміцнюючих фаз в цих сплавах збільшений у порівнянні із базовим сплавом 1. Оже-дослідження і аналіз електронних карт розподілу кремнію між структурними елементами в сплавах 2 і 3 дозволили виявити два види частинок силіцидної фази з різною інтенсивністю (концентрацією) Si (рис. 2, б, е, κ). Аналіз розподілу бору в сплавах 2 і 3 (рис. 2, в, ж, л) свідчить про те, що практично весь бор знаходиться в одному з силіцидів (Ti_6Si_2B), а в іншому (Ti_5Si_3) — розчиняється більша кількість кремнію. Таким чином, можна стверджувати, що колонії подвійної евтектики (β^* -Ti (α -Ti) + Ti_6Si_2B) в сплавах, легованих бором, оточують гілки іншої більш грубої евтектики (β^* -Ti (α -Ti) + Ti_5Si_3).

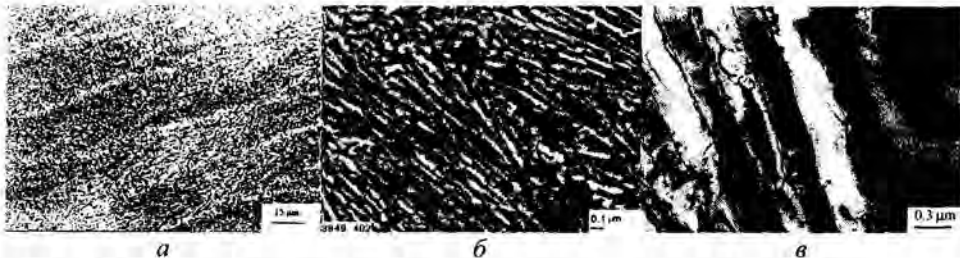


Рис. 1. Мікрофотографії евтектичної структури литого сплаву Ti—6,4Si—0,5B: а — СМ; б — СЕМ; в — ТЕМ.

Таблиця 1. Фазовий склад і фізико-механічні властивості сплавів Ti—Si—B—Sn

Номер сплаву	Сплав, % (мас.)	Фазовий склад	HV_{30} , ГПа	H_{Ve} , ГПа	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_p , МПа	ϵ , %
1	Ti—6,4Si—0,5B	α -Ti + Ti_6Si_2B	3,8	4,1	148	—	975	0,19
2	Ti—6,4Si—0,5B—5Sn	α -Ti + Ti_5Si_3 + Ti_6Si_2B	3,3	2,9	136	938	1043	0,36
3	Ti—6Si—0,4B—12Sn	α -Ti + Ti_5Si_3 + Ti_6Si_2B	4,0	3,1	130	1300	1318	0,22

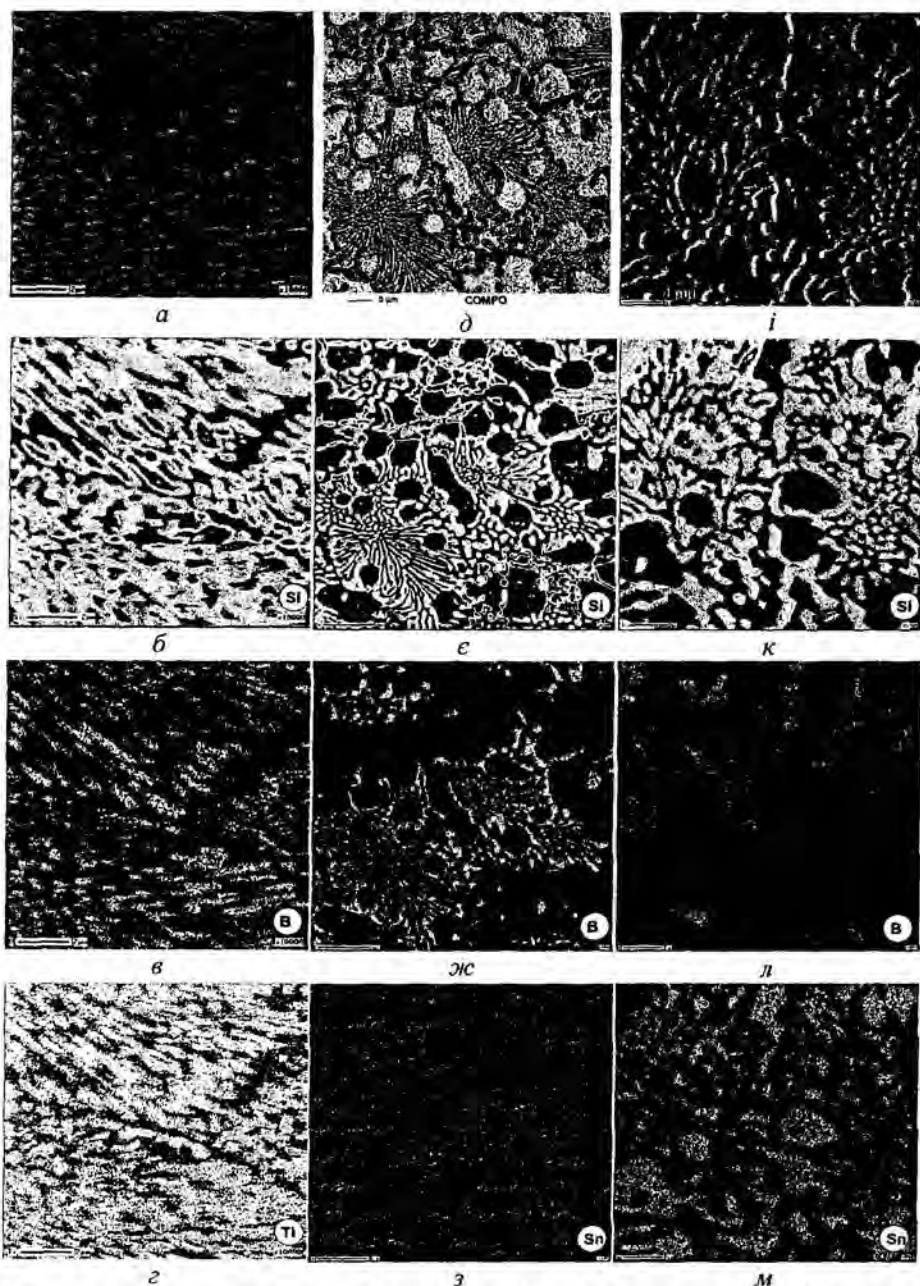


Рис. 2. Оже-електронні карти розподілу Si, B, Sn в структурі литих сплавів Ti—Si—B—Sn: *a—z* — Ti—6,4Si—0,5B; *д—з* — Ti—6,4Si—0,5B—5Sn; *і—м* — Ti—6Si—0,4B—12Sn.

Методом локальної Оже-спектроскопії визначено вміст легуючих елементів в α -Ti матриці сплавів, який наведено в табл. 2. Додавання Sn приводить до легування ним титанової матриці та одночасного зниження в ній вмісту B. Крім того, спостерігається значне зниження концентрації Si в сплаві 2 (в чотири рази у порівнянні зі сплавом 1), але в сплаві 3 вміст Si в α -Ti становить $\sim 0,5\%$ (мас.). Таким чином, конкуруючий механізм заміщення легуючих елементів (Sn, Si, B) з різними розмірами атомних радіусів (0,158; 0,133 і 0,097 нм відповідно) в α -Ti матриці (0,149 нм) визначає їх

Т а б л и ц я 2. Вміст легуючих елементів і параметри кристалічної ґратки α -Ті матриці сплавів Ті—Сі—В—Sn

Номер сплаву	Вміст елементів, % (мас.)				Параметри ґратки, нм		
	Ti	Si	B	Sn	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>c/a</i>
1	99,08	0,7	0,2	—	2,951	4,683	1,5875
2	95,68	0,18	0,14	4	2,949	4,700	1,5938
3	91,44	0,5	—	3,4	2,949	4,719	1,6

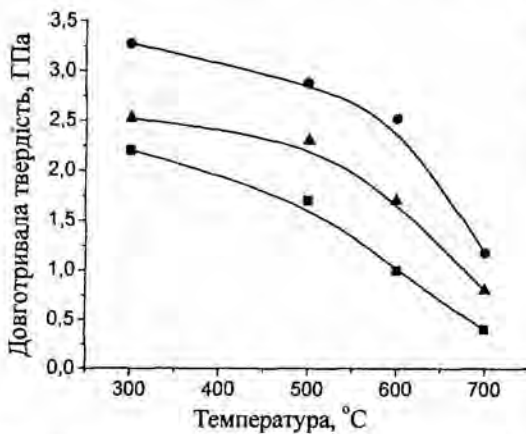


Рис. 3. Вплив Sn на температурну залежність довготривалої гарячої твердості литих сплавів Ті—Сі—В: ■ — Ті—6,4Сі—0,5В; ▲ — Ті—6,4Сі—0,5В—5Sn; ● — Ті—6Сі—0,4В—12Sn.

збільшенням в неї вмісту Sn — елемента з найбільшим атомним радіусом (табл. 2).

Дані фізико-механічних властивостей сплавів Ті—Сі—В—Sn наведено в табл. 1. Легування евтектичного сплаву 1 концентрацією Sn 5% (мас.) приводить до зростання його пластичності майже в два рази. Таке підвищення пластичності сплаву 2 можна пояснити утворенням доевтектичної структури з первинними дендритами перетвореного β^* -Ті, в яких, як відмічалось, суттєво зменшився вміст Si. При цьому спостерігається зниження модуля пружності, твердості за Віккерсом і мікротвердості евтектичної складової структури литого сплаву 2 (табл. 1). Підвищення вмісту Sn в сплаві до 12% (мас.) визначає подальше зростання міцності ($\sigma_{0,2} = 1300$ МПа) і зниження модуля Юнга до 130 ГПа. Однак пластичність сплаву 3 у порівнянні зі сплавом 1 майже не зростає. Такий неоднозначний вплив легування Sn на пластичність евтектичного сплаву Ті—6,4Сі—0,5В може бути пояснений спільною дією декількох механізмів зміцнення-знеміцнення сплавів.

Дослідження впливу олова на довготривалу гарячу твердість литих сплавів Ті—Сі—В показало зростання твердості сплавів 2 і 3 в інтервалі температур 300—700 °C (рис. 3). Це зумовлено, в першу чергу, утворенням твердого розчину олова в титані, за рахунок чого вповільнюються дифузійні процеси в Ті матриці при підвищених температурах [6—8]. Крім того, формування при кристалізації більш грубої евтектичної структури в сплавах 2 і 3 також може сприяти підвищенню жароміцності [10]. Сплав 3 з 12% (мас.) Sn зберігає високу твердість (~2,9 ГПа) до 600 °C.

Висновки

Показано, що легування малою концентрацією олова (5% (мас.)) евтектичного сплаву Ti—6,4Si—0,5В підвищує його пластичність майже в два рази, що пояснюється утворенням доевтектичної структури і значним зниженням вмісту Si (в 4 рази в порівнянні з базовим сплавом) за рахунок формування твердого розчину олова в титановій матриці. Подальше збільшення концентрації олова до 12% (мас.) практично не змінює пластичність сплаву, але приводить до суттєвого підвищення міцності (1318 МПа) при кімнатній температурі, а також гарячої твердості за рахунок механізму твердорозчинного зміцнення.

1. Ramos E. C. T., Silva G., Ramos A. S. et al. Microstructure and oxidation of Ti—Si—B alloys // Mater. Sci. Eng. — 2003. — **A363**. — P. 297—306.
2. Ramos A. S., Nunes C. A., Rodrigues G. et al. Ti₆Si₂B, a new ternary phase in the Ti—Si—B system // Intermetallics. — 2004. — **12**, Issue 5. — P. 487—491.
3. Горна І. Д., Горпенко К. О., Бега М. Д. та ін. Вплив бору на структуру, фазовий склад і механічні властивості евтектичних сплавів системи Ti—Si—X // *Металлофізика и новейшие технологии*. — 2006. — **28**. — С. 1047—1054.
4. Горна І. Д., Горпенко К. О., Коваль О. Ю. та ін. Структура та фізико-механічні властивості сплавів системи Ti—Si—X // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2008. — № 3. — С. 35—42.
5. Бондарь А. А., Великанова Т. Я., Подрезов Ю. Н., Белоус О. А. Жаропрочные эвтектические титановые сплавы с силицидо-боридным упрочнением: структура и свойства // Тез. докл. 49-й Междунар. конф. АПП-2010. — К., 2010. — С. 53.
6. Rodrigues G., Nunes C. A., Suzuki P. A., Coelho G. C. Thermal expansion of the Ti₃Si₃ and Ti₆Si₂B phases investigated by high-temperature X-ray diffraction // Intermetallics. — 2006. — **14**. — P. 236—240.
7. Bulanova M., Soroka A., Zheltov P. et al. Phase equilibria in the Ti-rich corner of the Ti—Si—Sn system // Z. Metallkd. — 1999. — **90**, No. 7. — P. 505—507.
8. Bulanova M., Tretyachenko L., Meleshevich K. et al. Influence of tin on the structure and properties of as-cast Ti-rich Ti—Si alloys // J. of Alloys and Comp. — 2003. — **350**. — P. 164—173.
9. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: (Учебное пособие для вузов)*. — М.: *Металлургия*, 1981. — 416 с.
10. Григорович В. К. *Жаропрочность и диаграммы состояния*. — М.: *Металлургия*, 1969. — 324 с.

Структура и механические свойства эвтектического сплава системы Ti—Si—B, легированного Sn

И. Д. Горная, Е. А. Валуйская, Н. Д. Бега, С. С. Пономарев,
В. В. Ковыляев, А. В. Котко, Я. И. Евич, С. А. Фирстов

Исследовано влияние олова на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства эвтектического сплава системы Ti—Si—B. Установлено повышение пластичности литого сплава Ti—6,4Si—0,5B в два раза при легировании 5% (мас.) Sn. Показано, что увеличение концентрации олова до 12%

приводит к росту прочности и жаропрочности литого Ti—Si—B сплава при незначительном повышении низкотемпературной пластичности.

Ключевые слова: система Ti—Si—B, эвтектика, легирование оловом, структура, механические свойства.

Structure and mechanical properties of Ti—Si—B eutectic alloy doped with Sn

I. D. Gorna, K. A. Valuyska, M. D. Bega, S. S. Ponomarev, V. V. Kovylyayev,
A. V. Kotko, Ya. I. Yevich, S. A. Firstov

The effect of tin on the structure, phase composition and mechanical properties of eutectic alloy of the Ti—Si—B system is studied. An increase of the RT plasticity of Ti—6,4Si—0,5B cast alloy with addition of 5-wt. Sn in two times is established. It is shown that growing of the tin concentration up to 12-wt. leads to an increase of strength and heat resistance of cast Ti—Si—B alloy but a low-temperature ductility practically does not rise.

Keywords: Ti—Si—B system, eutectics, the alloying with tin, structure, mechanical properties.