

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

Г.М. Григоренко¹, С.В. Ахонин¹, П.И. Лобода², С.Г. Григоренко¹,
А.Ю. Северин¹, В.А. Березос¹, Ю.И. Богомол²

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.

03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: decan@iff.kpi.ua

Представлены результаты исследований структуры α -титанового сплава, легированного бором. Слитки получены способом электронно-лучевой плавки с применением промежуточной емкости. Изучено влияние легирования диборидом титана, а также термомеханической обработки на структурообразование и механические свойства модельных сплавов. Введение в технически чистый титан химического соединения TiB_2 приводит к измельчению зерна и выделению в мягкой матрице упрочняющей фазы TiB в виде стержневидных кристаллов, раздробленных в процессе термомеханической обработки. Показано, что легирование титанового сплава бором позволяет повысить его прочностные характеристики при сохранении достаточного уровня пластичности. Библиогр. 7, табл. 1, ил. 9.

Ключевые слова: слиток; электронно-лучевой переплав; титан; сплав; легирование; борид титана; структура; термомеханическая обработка

В промышленности Украины титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов. Низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и удельная прочность делают эти сплавы незаменимыми не только для авиационной и космической промышленности, но и для других отраслей, включая медицину. Титановые сплавы успешно используют как броневого материала.

Уже сейчас широко применяются сплавы с улучшенным комплексом эксплуатационных характеристик, полученных за счет твердорастворного упрочнения путем комплексного легирования титана Al, V, Zn, Nb, Cr, Mo и др. элементами. В последние годы получило развитие такое направление, как создание титановых сплавов с дополнительным повышением механических свойств за счет выделения в структуре интерметаллидной фазы или химических соединений. Но создание экономнолегированных сплавов всегда остается актуальным вопросом.

В настоящее время широко ведутся работы по повышению прочности, пластичности, жаропрочности и других характеристик титановых сплавов путем создания в них специального структурно-фазового состояния за счет легирования, термической и термомеханической обработок. При этом важной задачей является достижение дис-

персности и равномерного распределения выделенной упрочняющей фазы в структуре. Известно, что бор давно уже используют в качестве модификаторов для измельчения литой структуры [1]. Кроме того, бор малорастворимый в титане и образует высокопрочные тугоплавкие выделения совместимые с титановой матрицей и обеспечивающие значительное упрочнение зерна [2], что представляет определенный интерес использовать его в качестве легирующего элемента в таких сплавах.

Целью работы является исследование структуры и механических свойств титанового сплава ВТ1-00, легированного бором, полученного способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП).

Для получения экспериментальных слитков использовали многоцелевую лабораторную электронно-лучевую установку УЭ-208 (рис. 1).

Конструкция установки и переменное технологическое оснащение позволяют осуществлять следующие процессы: переплав металла непосредственно в круглом или прямоугольном кристаллизаторе; выплавку круглых и плоских слитков с применением промежуточной емкости; отливку слитков в горизонтальную изложницу, в том числе биметаллическую и многослойную; переработку кусковых отходов металла и стружки, а также выплавку сплавов из различной шихты; выплавку малогабаритных слитков.

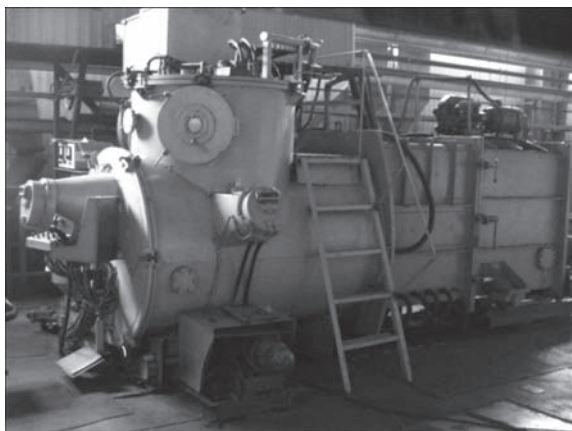


Рис. 1. Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208

Слитки получали способом ЭЛП с применением промежуточной емкости [3]. Такой способ плавки является весьма перспективным, позволяющим обеспечивать высокую степень удаления вредных примесей, а применение промежуточной емкости способствует рафинированию, усреднению химического состава и удалению включений высокой и низкой плотности [4]. При ЭЛП трудность представляет ввод бора в выплавляемый слиток, так как под воздействием электронно-лучевого нагрева в вакууме, при расплавлении бора, имеющего очень высокую упругость пара, происходит его испарение, а также распыление и унос частиц при введении его в шихту в виде порошка. Поэтому для введения бора в сплав использовали химическое соединение TiB_2 .

В качестве шихты использовали прессованные брикеты титановой губки ТГ-130 с добавлением TiB_2 в количестве 5,2 % (рис. 2). Из прессованных брикетов сформировали расходную шихтовую заготовку (рис. 3).



Рис. 2. Прессованный брикет титановой губки ТГ-130 + 5,2 % TiB_2



Рис. 3. Шихтовая заготовка для выплавки слитка $Ti + TiB_2$

Перед проведением опытных плавок осуществляли подготовку оборудования, которая заключалась в чистке камеры плавки, плиты электронно-лучевых нагревателей, промежуточной емкости, кристаллизатора и поддона от конденсата, пыли и остатков металла предыдущих плавок. В обязательном порядке провели замену катодов электронно-лучевых нагревателей.

Опытные плавки проводили в кристаллизаторе диаметром 110 мм (рис. 4). После загрузки шихты установку вакуумировали до уровня остаточного давления: в камере электронно-лучевых нагревателей — 10^{-3} , в камере плавки — 10^{-2} Па. Затем заготовку сплавляли в промежуточную емкость до ее заполнения и периодически сливали жидкий металл в медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Первыми порциями слива формировали затравку будущего слитка до высоты, равной вну-



Рис. 4. Общий вид технологической оснастки



Рис. 5. Слиток титанового сплава, полученный методом ЭЛП: *а* — после плавки (диаметр 110 мм); *б* — после механической обработки (диаметр 105 мм)

треннему диаметру кристаллизатора, на которой, согласно математическим расчетам, плавка переходит в квазистационарный режим. Затем на достигнутом технологическом режиме выплавляли слиток необходимой высоты.

Во время экспериментальных плавки проводили контроль следующих технологических параметров: скорость плавки, ток электронных лучей, величину ускоряющего напряжения. Численные значения ускоряющего напряжения и тока лучей измеряли и регулировали с помощью предназначенных для этого приборов. Скорость плавки регулировали скоростью подачи заготовки, расходуемой в зону плавки.

Технологические параметры плавки слитков диаметром 110 мм следующие:

Общая мощность ЭЛ нагрева, кВт	60
Мощность в кристаллизаторе, кВт	16
Скорость плавки, кг/ч	30

После плавки слиток поместили в камеру в условиях вакуума до полного его охлаждения.

В результате плавки получили слиток диаметром 110, длиной 300 мм и массой 15 кг. Для про-

ведения дальнейших исследований поверхность слитка механически обработали (рис. 5).

Затем полученный методом ЭЛП и механически обработанный слиток подвергали термомеханической обработке, которую проводили на лабораторном реверсивном стане 500/350 фирмы «Skoda».

Конечная толщина заготовки составила 8 мм, а степень обжатия более 90 % (рис. 6, *а*).

После окончания термомеханической обработки полученный полуфабрикат повторно поместили в печь разогретую до температуры 900 °С и выдерживали 30 мин (рис. 4, *а*), а затем провели его рихтовку на гидравлическом прессе П-457 для устранения неровностей поверхности, полученных при прокатке (рис. 6, *б*).

Химический состав сплава определяли методом спектрального анализа на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 6500 DUO, фирмы «Thermo Fisher Scientific» (США). Исследование микроструктуры образцов проводили с помощью светового микроскопа НЕОРНОТ-32 (ГДР) и многофункционального современного прибора с высокими техниче-

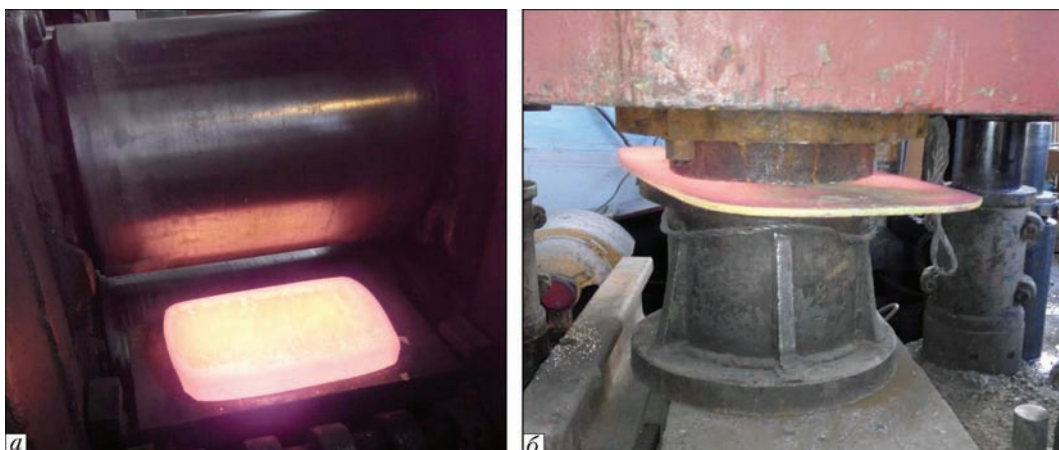


Рис. 6. Термомеханическая обработка слитка (*а*) и рихтовка полуфабриката (*б*)

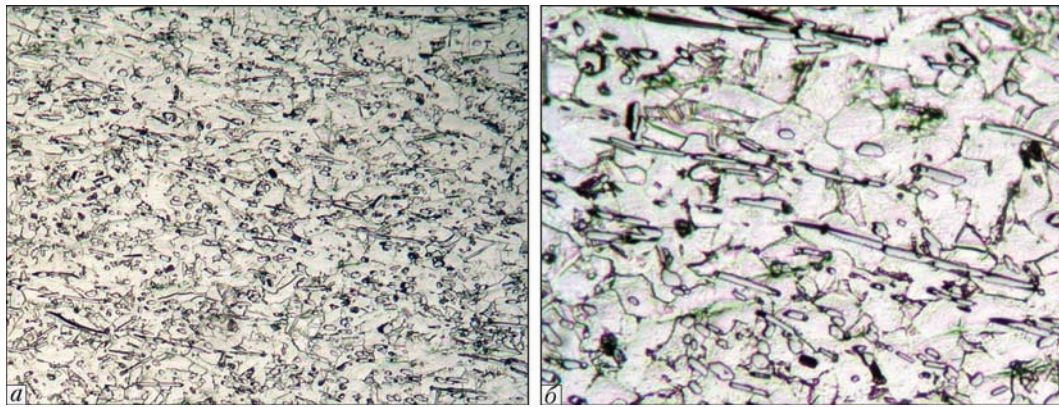


Рис. 7. Микроструктура экспериментального образца: *a* — $\times 200$; *б* — $\times 500$

скими характеристиками JAMP 9500F (JEOL Ltd, Япония). Прибор укомплектован энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) OXFORD EDS INCA Energy 350 для анализа элементов (от бериллия до урана). Энергетическая разрешающая способность $E = 133$ эВ, диаметр электронного зонда — 1 мкм. Исследование проводили в сверхвысоком вакууме $5 \cdot 10^{-8}$ Па. Методом рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) исследовали фазовый состав титановых сплавов и определяли параметры решетки отдельных фаз. Рентгеноструктурные исследования образцов проводили с помощью дифрактометра ДРОН-УМ1 в монохроматическом $\text{CuK}\alpha$ -излучении методом шагового сканирования. Твердость структуры измеряли на твердомере М-400 фирмы «LECO» (США) при нагрузке 9,8 Н.

Состав подготовленных для исследований образцов следующий, мас. %: (основа) Ti–0,112Al–1,11B–0,06Cr–0,204Fe–0,004Nb–0,003Zr–0,048Ni–0,004V–0,006Sn. Микроструктура представлена на рис. 7.

Металлографические исследования показали, что в процессе термомеханической обработки в сплаве формируется полигональная структура матрицы, в которой наблюдаются выделения как в виде отдельных небольших частиц разной фор-

мы, так и крупных стержневидных кристаллов. Стержневидные выделения, в большей степени, раздробленные. Такое дробление является результатом высокотемпературной термомеханической обработки [6, 7].

Методом энергодисперсионной спектроскопии установлено, что матрица состоит из зерен α -фазы, а все выделения внутри нее обогащены бором, и их можно идентифицировать как бориды титана (TiB). Результаты анализа ЭДС приведены на рис. 8.

На рис. 9 представлен результат рентгенофазового анализа, который показал наличие в сплаве двух основных фаз: (α -Ti) в количестве 89,15 мас. % (параметры решетки: $a = 2,9557$, $c = 4,6986$) и TiB — 10,85 мас. % ($a = 6,1031$, $b = 3,0549$, $c = 4,5572$).

Результаты механических испытаний приведены в таблице.

Технический титан характеризуется невысокой прочностью и высокой пластичностью. Анализ результатов механических испытаний показал, что легирование сплава бором снижает показатели пластичности и значительно повышает прочностные характеристики.

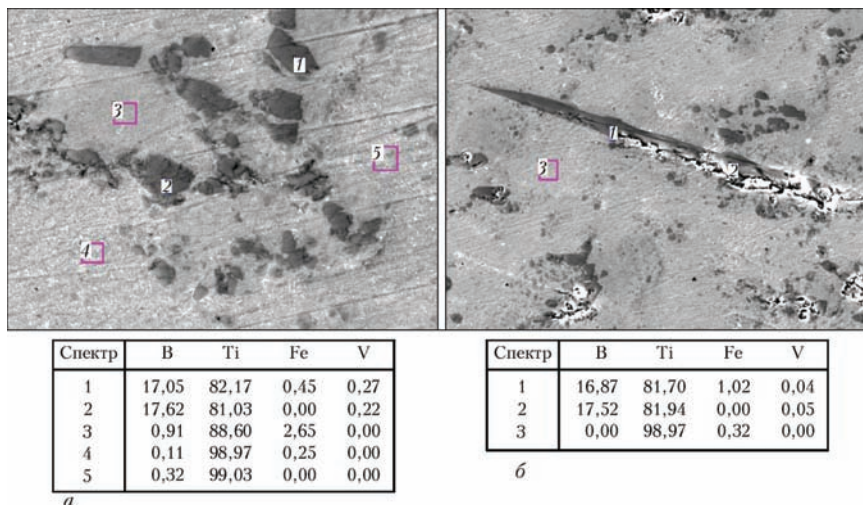


Рис. 8. Результаты ЭДС-анализа экспериментального образца, мас. %: *a* — $\times 5000$; *б* — $\times 2000$

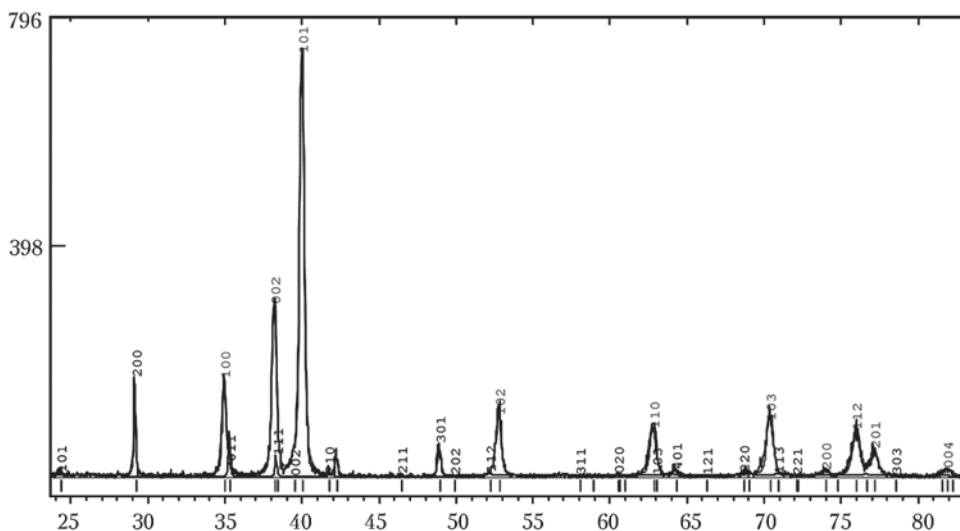


Рис. 9. Рентгенограмма экспериментального сплава

Механические свойства титановых сплавов

Сплав	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	HV , МПа
Технический титан	350...500	450...560	25	55	1400...2000
Опытный образец	631	882	13	16	3500...3700

Выводы

Выплавлены опытные слитки диаметром 110 и длиной 300 мм титанового сплава, легированного бором.

Легирование исследуемого сплава бором путем введения химического соединения TiB_2 приводит к измельчению зерна и выделению упрочняющей фазы TiB в виде стержневидных кристаллов, которые дробятся в процессе последующей термомеханической обработки.

Выделение в мягкой матрице α -титанового сплава твердой тугоплавкой фазы TiB повышает его прочность и твердость.

Пользуясь опытом предыдущих работ [6], для полного дробления стержневидных выделений и их равномерного распределения по структуре, следует провести дополнительную термообработку. Структура, полученная после термической обработки сплава, должна обеспечить хорошее сочетание прочности и пластичности.

Results of investigations of structure of α -titanium alloy, alloyed with boron, are presented. Ingots were produced by the method of electron beam cold hearth melting. The effect of alloying with a titanium diboride, as well as thermodeformation on structure formation and mechanical properties of model alloys was studied. Adding of chemical compound TiB_2 into the commercially pure titanium leads to grain refining and precipitation of strengthening phase TiB in a soft matrix in the form of rod-like crystals, crushed in the process of the thermodeformational treatment. It is shown that the alloying of titanium alloy with boron allows increasing its strength properties, retaining a sufficient level of ductility. 7 Ref., 1 Table, 9 Figures.

Key words: ingot; electron beam remelting; titanium; alloy; alloying; titanium boride; structure; thermodeformational treatment

Поступила 29.01.2016

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. — М.: Металлургия, 1974. — 368 с.
2. Еременко В.Н. Титан и его сплавы. — Киев: Изд-во АН УССР, 1960. — 500 с.
3. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. Электроннолучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 311 с.
4. Зонная перекристаллизация алюминиды титана / Г.М. Григоренко, В.В. Лакомский, И.И. Стагкевич и др. // Тр. конф. «Титан в СНГ-2010» — Екатеринбург, 2010. — С. 132–139.
5. Грабин В.Ф. Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 259 с.
6. Влияние легирования бором и лантаном на структуру и свойства сплава на основе интерметаллидного соединения $TiAl$ / Г.М. Григоренко, С.В. Ахонин, А.Ю. Северин и др. // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 2. — С. 15–20.
7. Структура та властивості високомодульних сплавів системи $Ti-B$ / С.О. Фірстов, М.І. Кузьменко, Л.Д. Кулака та ін. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2006. — № 3. — С. 27–32.