

ное пространство из соединения алюминия с кремнием. Для точного анализа строения полученного образца требуются дополнительные исследования.

### **Заключение**

С помощью электронно-лучевой аддитивной установки на стальной подложке из порошка силумина получен сплав, в состав которого входят интерметаллиды железа-алюминия, что значительно повышает твердость полученного сплава по сравнению с твердостью силумина.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Pixner F. et al. Wire-based electron beam additive manufacturing of tungsten //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Т. 108. – С. 105917.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 1999. 416 с
3. Pushilina N. S. et al. Beam current effect on microstructure and properties of electron-beam-melted Ti-6Al-4V alloy //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Т. 28. – С. 6165-6173.
4. Yang X. et al. High-Pressure Solidification of Ternary Al-Ni-Sn Alloy //Crystals. – 2022. – Т. 12. – №. 8. – С. 1025.
5. García-Villarreal S. et al. Microstructural and mechanical characterization of Al-Zn-Si nanocomposites //Materials characterization. – 2013. – Т. 83. – С. 187-197.

Ли Шуай (Китай), Хань Цзэли (Китай)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Клименов Василий Александрович,  
д-р техн. наук, профессор

## **ОСОБЕННОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЁ ИЗУЧЕНИЯ**

Титановый сплав является относительно новым металлическим материалом, так как очень распространен в земной коре, титан, как алюминий, железо, медь, магний и другие металлы, стал основным материалом в современном машиностроении. В частности, из-за его превосходных механических свойств и отличной коррозионной стойкости он широко используется в биомедицинской областях, а также в морской среде. По

типу структуры титановые сплавы принято делить на три категории: титановый сплав на основе  $\alpha$ ,  $\beta$  твердого раствора; титановый сплав на основе твердого раствора и содержащий определенное количество соединений; интерметаллический сплав на основе соединения. Среди них сплав ВТ6св (Ti-4Al-3V) на основе твердого раствора является наиболее широко используемым титановым сплавом, имеет типичную двухфазную  $\alpha$ - $\beta$  микроструктуру. Типовой низкопрочный высокопластичный титановый сплав ВТ1-0 также часто используется в качестве конструкционного материала благодаря отличной технологичности и низкому содержанию вредных примесей [1,2]. По сравнению с технологиейковки, используемой для обработки титанового сплава, технология аддитивного производства титанового сплава имеет много выдающихся особенностей, особенно короткий производственный цикл. Часто было использовано для изготовления пористых деталей, соответствующих человеческой кости. Электронно-лучевое сплавление представляет собой типичный метод 3D-печати металла на основе проволоки, использующий электронные лучи в качестве источника тепла, способный изготавливать сложные металлические детали при высокой температуре и высоком вакууме.

Образцы были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН [3]. Процесс формирования образца из сплава ВТ6св в виде проволоки диаметром 1,6 мм происходил в вакууме при давлении  $10^{-3}$  –  $10^{-2}$  Па. В работе использовали кованные слитки марки ВТ1-0 чистотой 99,7 %. Слиток отжигали при 1073 К в течение 20 ч, затем охлаждали в печи до комнатной температуры и прокатывали. Металлографический анализ, наблюдаемый с помощью оптического микроскопа Axio ObserverA1m, показана на рисунке 1. Среди них большого зерна – это  $\alpha$ -фаза, а темная фаза на границе –  $\beta$ -фаза. ВТ1-0 – чистый  $\alpha$ -сплав. Содержание  $\beta$ -стабилизирующих элементов очень мало. ВТ1-0 претерпевает аллотропный фазовый переход из ГПУ ( $\alpha$ ) в ОЦК ( $\beta$ ) структуру при температурах выше 890 °С. Фазовый переход  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  может изменять микроструктуру и текстуру генетического материала и приводить к значительным изменениям в системах активного скольжения и двойникования [4]. Двойники показаны на рис. 1.

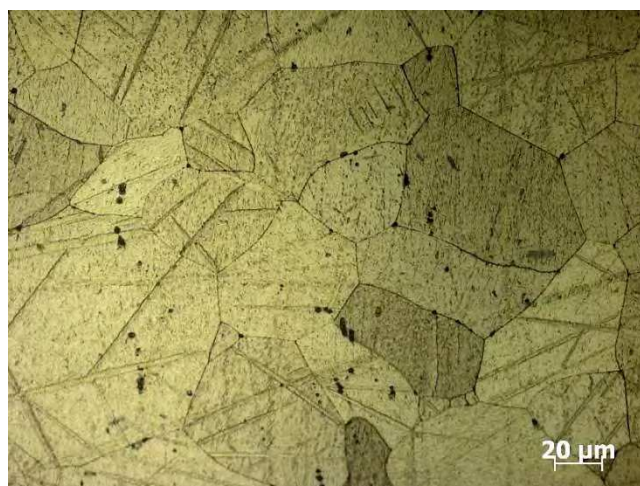


Рис. 1. Микроструктура VT1-0 под оптическим микроскопом

VT6св содержит как  $\alpha$ -стабилизатор, так и  $\beta$ -стабилизатор: алюминий может стабилизировать  $\alpha$ -фазу в титане до более высокой температуры и упрочнить ее по механизму упрочнения твердого раствора. Ванадий стабилизирует  $\beta$ -фазу. Изготовили два образца, один из VT6св после прокатки, другой из VT6св получившегося электронно-лучевого сплавления. После травления поверхности были получены микроструктуры, показанные на рис. 2. Для VT6св после прокатки (а) имеет  $(\alpha + \beta)$  равноосное зерно, где более светлые области представляют собой  $\alpha$ -фазу, а  $\beta$ -фаза распределена в темных областях. Микроструктура (б) в основном состоит из  $\alpha$ -фазы и небольшого количества  $\beta$ -фазы в исходных столбчатых зернах  $\beta$ , ориентированных вдоль направления построения.  $\alpha$ -фаза имеет пластинчатая структура, а  $\beta$ -фазы находятся между  $\alpha$ -пластинчатыми границами.  $\alpha$ -фазы расположены в структуре Видманштеттеновы структура разного размера и ориентации [5].

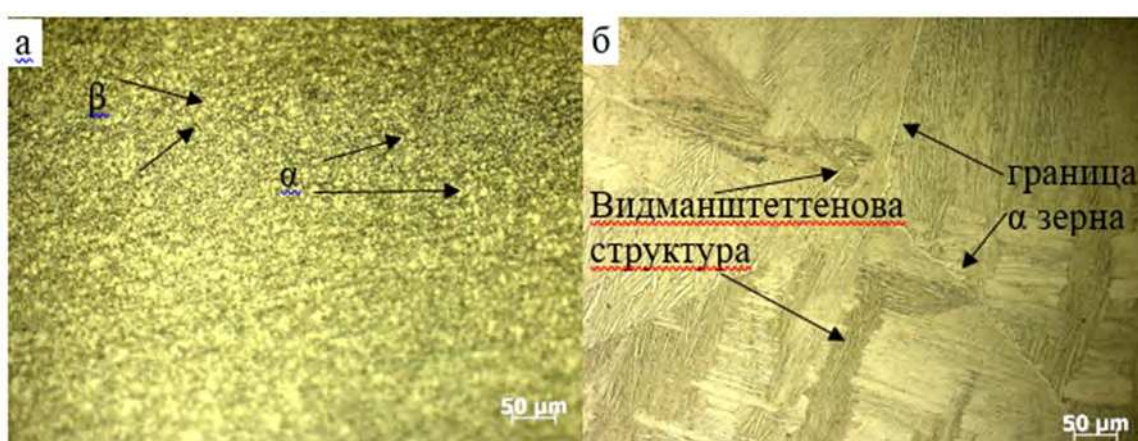


Рис. 2. Микроструктура VT6св после прокатки (а), микроструктура VT6св получившегося электронно-лучевого сплавления (б)

В работе были анализированы микроструктуры материалов, получившие после прокатки, и напечатанные из титанового сплава методом аддитивного производства с использованием электронного луча.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shunyu Liu, Yung C. Shin. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review// *Materials & Design*. – 2019. – № 164.
2. Collins P C, Brice D A, Samimi P, et al. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review// *Microstructural control of additively manufactured metallic materials*. – 2016. – № 46. – С. 63–91.
3. Клименов В.А., Колубаев Е.А., Клопотов А.А., Чумаевский А.В., Рубцов В.В., Хань Ц., Батрагин А.А., Стрелкова И.Л., Химич М.А., Никонов С.Ю. Применение методов физико-механических исследований и методов неразрушающего контроля при разработке аддитивных технологий с использованием титановых сплавов. // *Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. Тез. докл. Междунар. конф. Томск, Россия. – 2022. – С. 430–431.*
4. A. Safdar, L.-Y. Wei, A. Snis, Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V// *Materials Characterization*. – 2012. – № 65. – С. 8–15.
5. Yu, Z.; Chen, Z.; Qu, D.; Qu, S.; Wang, H.; Zhao, F.; Zhang, C.; Feng, A.; Chen, D. Microstructure and Electrochemical Behavior of a 3D-Printed Ti-6Al-4V Alloy// *Materials*. – 2022. – № 15. – С. 4437.

Лу Вейлун (Китай),  
Кузьменко Егор Дмитриевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск  
Научный руководитель: Матренин Сергей Вениаминович,  
канд. техн. наук, доцент

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРМЕТОВ НА ОСНОВЕ ZRC-ZRN-NI**

Кермет – это конструкционный материал, в котором приблизительно равноосные мелкие зерна твердой фазы керамики встраиваются в матрицу из связующего металла или сплава. Металлокерамика на основе