

Чем более гидрофильна пленка, тем значительно будет ее адгезия к поверхности твердого тела.

На основании проведенного эксперимента нами был синтезирован и изучен состав геля на основе хитозана, который может использоваться как тест-среда или электролит при оценке химической и электрохимической устойчивости медицинских сплавов.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абилова Г.К., Махаева Д.Н., Ирмухаметова Г.С., Хуторянский В.В. Гидрогели на основе хитозана и их применение в медицине // Вестник Казахского национального университета. Серия химическая. 2020. Т. 97. № 2. С. 16-28.
2. Chu Min. Biological characteristics of hydroxyapatite/chitosan complexed with metformin for bone defects in rats // Chinese Tissue Engineering Research. 2021, 25(28)

Ли Цзе (Китай)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Ковалевская Жанна Геннадьевна,  
д-р техн. наук, профессор

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ**

#### Введение

С развитием технологии аддитивного производства она широко используется в производстве различных изделий из металлических материалов.

Технология аддитивного производства используется при синтезе различных сплавов. Алюминиевые сплавы имеют низкую плотность, высокую удельную прочность, хорошую коррозионную стойкость и превосходную пластичность [1]. Перспективными являются сплавы, в состав которых входят интерметаллиды системы Al-Fe.

Сплавы на основе интерметаллидов железо-алюминий имеют высокую твердость, высокую коррозионную стойкость и высокую жаростойкость, что позволяет их использовать при повышенных температурах, в условиях абразивного износа, а также при работе в агрессивных средах. Применение интерметаллидов как конструкционных материалов, затруднено из-за свойственной интерметаллидам хрупкости, особенно при комнатной температуре [2].

Поэтому можно считать перспективным создание комбинированных изделий, состоящих из более пластичной части, выполненной из стали, и износостойкой и коррозионностойкой части, выполненной из сплава на основе алюминия с интерметаллидной составляющей.

Технология аддитивного производства в настоящее время широко используется в различных областях. Технология используется NASA, Boeing и Lockheed Martin для производства компонентов для ракетных двигателей. Немецкая компания GEFERTEC использует технологию электронно-лучевого плавления для производства крышек подшипников. Электронно-лучевая технология используется при синтезе различных сплавов, таких как алюминиевые сплавы, титановые сплавы, медные сплавы и многие другие виды сплавов. Электронно-лучевая технология является одной из ключевых технологий в металлической 3D-печати [3].

Цель данной работы – исследовать строение и механические свойства алюминиевого сплава, полученного электронно-лучевым сплавлением на поверхности стальной подложки с перемешиванием.

#### Методика

В работе использовалась электронно-лучевая аддитивная установка Центра аддитивных технологий ТПУ. Принтер имеет максимальную скорость сканирования 800 м/с и минимальный диаметр электронного луча 150 мкм. Высота одного слоя материала, напечатанного устройством, имеет толщину до 300 мкм. Для эксперимента был выбран ток луча 9,5 мА.

Для наращивания использовалась подложка из стали 45 и порошок силумина АК7.

Строение образцов изучали на микроскопе CarlZeiss AxioObserver. Оценивалось расположение структурных составляющих, наличие объемных дефектов, форма и размер зерен.

Твердость в данном эксперименте измеряли с помощью микротвердомера EMCO-TEST DuraScan 50, предназначенного для измерения твердости по методу Виккерса. Метод включает вдавливание четырехгранной алмазной пирамиды в образец и последующее измерение полученного отпечатка.

Химический анализ определялся с помощью оптико-эмиссионного спектрометра PMI-MASTER.

### Экспериментальная часть

Образец силумина серебристо-белого цвета, в форме капли, был разделен на две части (рис 1).



Рис. 1. Исследуемый образец

На верхней поверхности заметны крупные дендриты, большинство из которых имеют столбчатую формы с ориентацией как вертикально от подложки, так и с небольшим углом. При макроанализе видно, что в нижней зоне столбчатые кристаллы имеют меньший размер.

Мы провели анализ химического состава образца и получили следующие экспериментальные данные (таблица 1).

Таблица 1

*Химический состав образца*

Al, %	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Ni, %	Ti, %	Cr, %	V, %	Ca, %	Sr, %
76.7	4.62	18.55	0.05	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

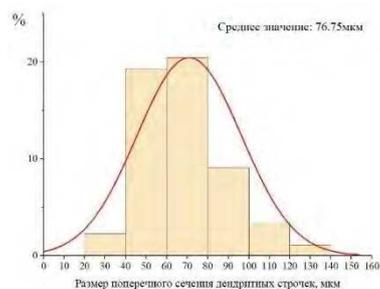
Как видно, в химическом составе полученного сплава присутствует 18,55 % железа и значит должны сформироваться интерметаллиды на его основе.

На основе металлографического анализа поперечного сечения образца определено, что в процессе электронно-лучевого сплавления получен материал с литым строением. Под воздействием энергии луча, материал расплавлялся и кристаллизовался последовательно с наращиванием структурных элементов от подложки к поверхности образца. Такой рост структуры называется эпитаксиальным.

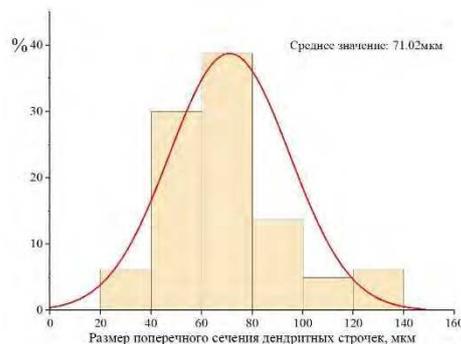
Эпитаксия представляет собой тип роста кристаллов или осаждения материала, при котором новый кристаллический слой имеет одну или несколько четко определенных ориентаций относительно кристаллического исходного слоя.

Проведен расчет размера элементов эпитаксиальной структуры в разных зонах образца. Определялся размер поперечного сечения дендритных строчек (рис. 2 и 3).

Как видно из расчета размера ширины дендритных строчек, верхняя и нижняя зона образца имеют одинаковый размер структурных составляющих, что говорит о том, что кристаллизация по всему объему материала идет в одинаковых условиях.



*Рис. 2. Микроструктура и гистограмма распределения размеров поперечного сечения дендритных строчек верхней части образца*

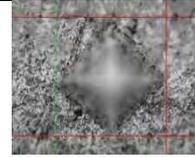
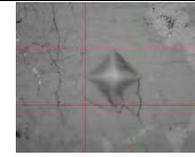
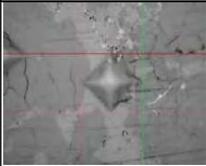
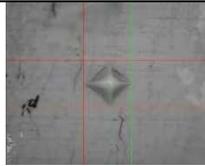
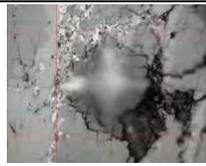


*Рис. 3. Микроструктура и гистограмма распределения размеров поперечного сечения дендритных строчек в нижней части образца*

Измерение значений микротвердости показало, что дендриты и междендритное пространство имеют большой разброс значений микротвердости (таблица 2). Микротвердость дендритов находится в интервале от 9700 МПа до 16170 МПа. Микротвердость в междендритном пространстве около 3500 МПа.

Таблица 2

*Микротвердость по Виккерсу*

№ измерения	1	2	3	4
Фото				
МПа	16170	3410	3730	9700
№ измерения	5	6	7	8
Фото				
МПа	9700	13640	15090	3730

Силумин АК7 это сплав алюминия с содержанием кремния около 7%. Он также содержит другие элементы, такие как медь и магний. Микроструктура сплавов Al-Si обычно состоит из трех фаз: раствор  $\alpha$ -Al, частицы Si и соединения металлов.

Раствор  $\alpha$ -Al (HV=1500 МПа) является наиболее распространенным фазом в алюминиево-кремниевом сплаве [4]. Частицы Si являются другим важным компонентом алюминиево-кремниевого сплава, обычно имеющим форму шара или многоугольника с размерами от 0,5 до 50 микрон. Частицы Si (HV=2300 МПа) могут эффективно увеличить прочность и твердость алюминиево-кремниевого сплава. Металлические соединения являются третьим компонентом алюминиево-кремниевого сплава, обычно представленные соединениями типа  $AlZnSi_x$  (HV= 300 – 1200 МПа), и могут также содержать другие элементы [5].

Микротвердость сплавов системы Fe-Al независимо от их фазового состава значительно выше, чем у алюминия и железа. Максимальной микротвердостью обладают фазы  $FeAl_3$ ;  $FeAl_2$ ;  $Fe_2Al_7$ ;  $Fe_2Al_5$ . Значение микротвердости для этих фаз колеблется в интервале от 9600 до 11500 МПа. Для фазы  $FeAl$  значение микротвердости достигает 6000 МПа, а для фазы  $Fe_3Al$  – 27000 ГПа [2].

Ориентируясь на значения твердости можно предположить, что дендриты состоят из интерметаллида железа-алюминия, а междендрит-

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