

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СЕТЧАТОГО  
СКЭФФОЛДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ, И ПОЛИКАПРОЛАКТОНА**

Д.А. Храпов, М.А. Сурменева

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Р. А Сурменев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: dah8@tpu.ru

**INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL BASED  
ON THE ADDITIVELY MANUFACTURED Ti-6Al-4V SCAFFOLD AND POLYCAPROLACTONE**

D. A. Khrapov, M. A. Surmenev

Scientific Supervisor: Prof., Dr. R. A. Surmenev

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: dah8@tpu.ru

***Abstract.** The Ti-6Al-4V alloy is widely used in additive manufacturing of implants. However, the main problem in this area is the mismatch of Young's modulus of bone and metal leading to stress shielding and loosening of the implant. To overcome this inconsistency, it was proposed to use scaffolds - three-dimensional porous matrices providing a support for cells to grow. To maintain the balance of biodegradable polycaprolactone decomposition and the bone ingrowth into the scaffold the total stiffness must remain constant. Unmolten powder or partially molten particles stuck inside the scaffold may cause threat to human body. Polymer filling is proposed to have an influence on mechanical properties and keep the unmolten particles inside the scaffold. Therefore, additively manufactured scaffolds of two types with polycaprolactone filling are investigated in the work.*

**Введение.** Титан и его сплавы являются наиболее привлекательными материалами для ортопедических и зубных имплантатов благодаря превосходным механическим свойствам, достаточной биосовместимости и хорошей коррозионной стойкости. Сплав Ti-6Al-4V, так же известный как ВТ6, широко используется в области аддитивных технологий для изготовления имплантатов. Однако, основной проблемой в этой области, является несоответствие модулей Юнга костей и металла. Из-за этого несоответствия напряжения в кости и металле оказываются разными, что может привести к резорбции кости и возможной потере имплантата. С целью преодоления этого несоответствия было предложено использовать пористые материалы. Такие материалы получили название «скэффолды» – трехмерные пористые или волокнистые матрицы, основная функция которых состоит в обеспечении механического каркаса для клеток. Скэффолды должны обладать рядом свойств, позволяющих достигнуть формирования полноценной костной ткани.

Для работе с такими структурами, состоящими из элементарных ячеек *Amin Yavari* [1] предложил использовать понятие «метаматериал», которое является промежуточным понятием между понятиями «материал» и «конструкция». Метаматериал можно назвать «конструкцией», поскольку он имеет строгую структуру в расположении элементарных ячеек, но он ведет себя как однородный материал, когда его гомогенизированные свойства оцениваются в макромасштабе. Таким образом, предполагается

сплошность метаматериала, исходя из чего следует, что можно определить его модуль Юнга. Рационально разработанная микромасштабная структура метаматериалов может привести к уникальным макромасштабным свойствам.

Для исследования изменения механического поведение аддитивно изготовленных скэффолдов в процессе регенерации костной ткани их заполняли различными полимерами и проводили испытание на сжатие [2]. В данном исследовании для заполнения использовался биоразлагаемый полимер – поликапролактон – с целью определения его влияния на механические свойства скэффолда. Таким образом, параллельно будут протекать два процесса: биодеградация поликапролактона и прорастание костной ткани внутрь скэффолда, за счёт чего общая жёсткость должна оставаться постоянной.

Исходным сырьём для производства металлических скэффолдов является металлический порошок мелкой фракции порядка 100 мкм. Не расплавившиеся или частично приплавившиеся к скэффолду частицы порошка подлежат удалению из скэффолда, что является чрезвычайно сложной задачей из-за мелкого шага пористого материала. Покрытие скэффолда поликапролактоном позволит предотвратить попадание свободных частиц в тело человека. Целью работы явилось исследование механических свойств композита на основе сетчатого скэффолда, полученного из сплава Ti-6Al-4V методом аддитивных технологий, и поликапролактона.

**Материалы и методы исследования.** Сетчатые скэффолды двух типов размером 10x10x20 мм<sup>3</sup> были изготовлены из сплава Ti6Al4V на базе Центрально шведского университета методом электроннолучевой плавки на установке ARCAMA2 фирмы ARCAM AB (Швеция). Ячейки сетки имеют кубическую структуру. Шаг сетки для сетки I типа составил 1,2 мм, для II типа 1,5 мм. Процесс наполнения скэффолда поликапролактоном подробно описан в работе [3]. Испытание на сжатие проводилось с помощью установки Instron 50 kN Static Load Cell. Скорость нагрузки 0,5 мм/с.

**Результаты.** Механические характеристики композита главным образом зависят от свойств металлической матрицы и уровня ее пористости (таблица 1). Определённые значения модуля упругости кубических скэффолдов типа I и II без полимерного напыления имеют значения 5,8 ГПа и 3,7 ГПа, соответственно.

Таблица 1

Механические характеристики скэффолдов

	Тип I		Тип II	
	Скэффолд	Скэффолд +поликапролактон	Скэффолд	Скэффолд +поликапролактон
Предел прочности, МПа	198	193	89	89
Модуль Юнга, ГПа	5,8	6,1	3,7	4,2
Предел текучести, МПа	123	117	66	66

Модифицирование металлических скэффолдов типа I и II приводит к незначительному увеличению модуля Юнга до значений 6,1 и 4,2 ГПа, соответственно. Полученные значения модуля Юнга удовлетворяют значениям модуля Юнга кости, равного по различным оценкам до 20 МПа [4]. Стоит отметить, что модуль Юнга поликапролактона на растяжение  $E_t = 440$  МПа, на сжатие  $E_c = 455$  МПа [5]. На первый взгляд, достаточно малый по сравнению с Ti-6Al-4V (110 ГПа) модуль Юнга оказался достаточным для того, чтобы крепко удерживать обломки разрушенного скэффолда вместе в процессе сжатия, а также после снятия нагрузки, как это показано на рисунке 1.

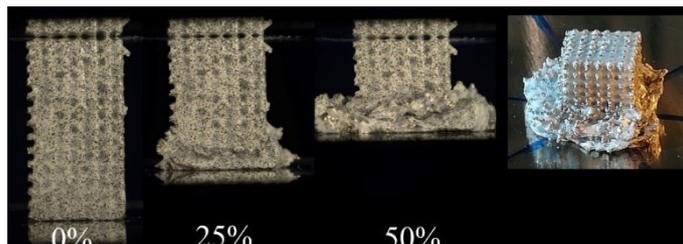


Рис. 1. Процесс разрушения скэффолда типа I

**Заключение.** Были получены металл-полимерные конструкции путем наполнения металлической матрицы, полученной послойным электронно-лучевым синтезом, биodeградируемым поликапролактоном. Покрытие поликапролактона не внесло ощутимого влияния на значения модуля Юнга, предела прочности и предела текучести. Механические характеристики композита главным образом зависят от свойств металлической матрицы и уровня ее пористости. Однако, во время сжатия скэффолда осколки оставались в связанном состоянии. Такая особенность может позволить обезопасить помещение металлического имплантата в кость.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ No. 15-13-00043 (получение образцов) и Немецко-Российского Междисциплинарного Научного Центра G-RISC No. T-2017b-3. Авторы выражают благодарность профессору Андрею Коптюгу за помощь в получении композитов, профессору Джованни Бруно за возможность проведения исследования на базе Федерального института материаловедения и испытаний, Берлин, Германия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yavari S. A., Ahmadi S. M., Wauthleb R., Pourand B., Schrootene J., Weinansa H., Zadpoor A.A. Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2015. – Vol. 43. – P. 91–100.
2. Hedayati R., Janbaz S., Sadighi M., Mohammadi-Aghdam M., Zadpoor A. A. How does tissue regeneration influence the mechanical behavior of additively manufactured porous biomaterials? // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2017. – Vol. 65. – P. 831–841.
3. Khrapov D., Surmeneva M., Koptioug A., Evsevlev S., Léonard F., Bruno G., Surmenev R. X-ray computed tomography of multiple-layered scaffolds with controlled gradient cell lattice structures fabricated via additive manufacturing // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1145. – P. 1-7.
4. Katsamanis F., Raftopoulos D. D. Determination of mechanical properties of human femoral cortical bone by the Hopkinson bar stress technique // *Journal of Biomechanics*. – 1990. – Vol. 23, № 11. – P. 1173–1184.
5. De Formanoir C., Suard M., Dendievel R., Martin G., Godet S. Improving the mechanical efficiency of electron beam melted titanium lattice structures by chemical etching // *Additive Manufacturing*. – 2016. – Vol. 11. – P. 71–76.