

**АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАДИЕНТНЫХ СКАФФОЛДОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ**

М.С. Ткачев, Е.А. Чудинова, Е.С. Мельников

Научный руководитель: снс, к.ф-м.н. М.А. Сурменова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: 5.877@mail.ru

**ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF GRADIENT SCAFFOLDS OBTAINED BY
ELECTRON-BEAM MELTING**

M.S. Tkachev, E.A. Chudinova, E.S. Melnikov

Scientific Supervisor: senior researcher, M.A. Surmeneva

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

E-mail: 5.877@mail.ru

***Abstract.** Ti-based mesh structures with different size and shape of lattice were fabricated via electron beam melting. Mechanical properties of the obtained samples were investigated using uniaxial compression testing scanning electron microscopy allowed to estimate compression test mechanism. The homogeneity and the presence of powder in inner structure were investigated by scanning electron microscopy.*

Введение. На сегодняшний день титан и его сплавы нашли широкое применение в имплантологии, благодаря высокой химической стойкости, прочности и биосовместимости [1]. Актуальной проблемой имплантологии является лечение крупных сегментных дефектов костей, которая может быть решена благодаря использованию титановых скэффолдов [1]. Так как пористость кости неоднородна по объёму, а изменяется в зависимости от расстояния от центра [1], то наиболее подходящим решением, в случае сегментной замены, являются градиентные сетчатые структуры. Данные структуры позволяют регулировать процессы васкуляризации и остеоинтеграции за счет изменений размеров ячеек градиентного скэффолда. Кроме того, за счет изменения параметров ячейки имеется возможность контролировать механические свойства [1]. Важными механическими параметрами для имплантата являются модуль упругости и предел прочности. Высокие значения модуля упругости имплантата являются причиной эффекта «экранирования напряжений»[2]. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование механических свойств градиентных скэффолдов с различными размерами ячеек сетчатой структуры.

Материалы и методы исследования. В данной работе исследованы пять типов цилиндрических сетчатых структур (рис.1) на основе сплава титана ВТ6 высотой 30 мм, полученные методом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) на установке фирмы «ARCAM» (Mid Sweden University). Геометрические параметры исследуемых скэффолдов представлены в таблице 1. Изображения профилей представлены на рис. 1. Измерения механических характеристик осуществлялись с использованием двухколонной испытательной системы «Instron 3369 (Illinois Tool Works Inc., USA)». Исследования морфологии выполнены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).

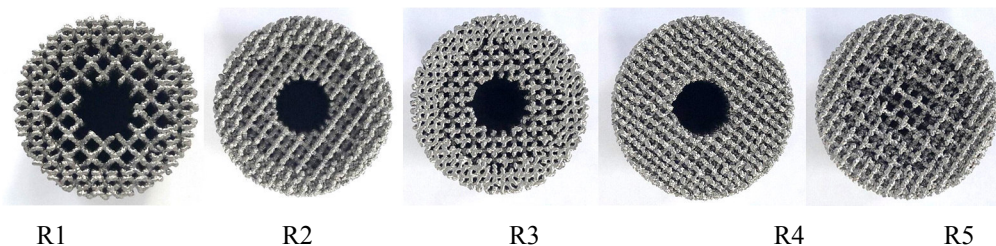


Рис. 1. Изображения профилей, полученных скэффолдов

Таблица 1

Геометрические параметры полученных скэффолдов согласно их CAD моделям.

| Тип образца | Внутренняя структура (диаметр 5 мм) | Средняя структура (диаметр 11 мм) | Внешняя структура (диаметр 15 мм) |
|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| R1 | Отсутствует | Восьмиугольная 2.0 мм | Восьмиугольная 1.25 мм |
| R2 | Отсутствует | Алмазоподобная 2.0 мм | Алмазоподобная 1.25 мм |
| R3 | Отсутствует | Восьмиугольная 1.25 мм | Восьмиугольная 1.0 мм |
| R4 | Отсутствует | Алмазоподобная 1.25 мм | Алмазоподобная 1.0 мм |
| R5 | Алмазоподобная 3.0 мм | Алмазоподобная 2.0 мм | Алмазоподобная 1.25 мм |

Результаты. На рис. 2. представлена морфология поверхностей скэффолдов после механических испытаний. Изображения образцов после механических испытаний позволяют оценить морфологию недеформированных участков и проанализировать механизм деформации скэффолда. Образцы имеют развитую поверхность, что предпочтительно для клеточной адгезии [3].

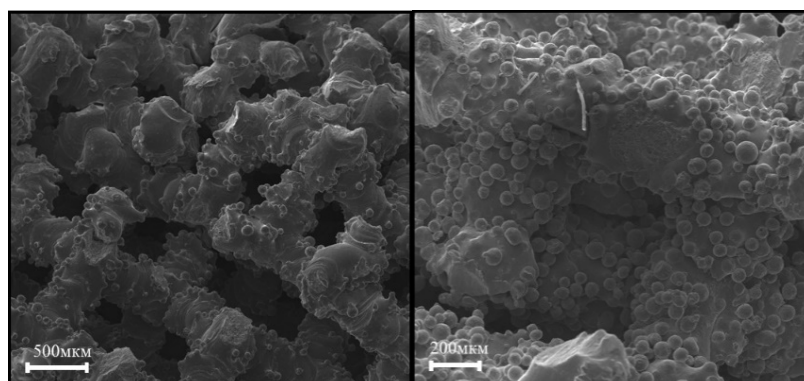


Рис. 2. СЭМ-изображение скола образца R2 и R4 после механических испытаний

Кривая напряжение-деформация, полученная в результате механических испытаний представлена на рис. 3. В результате испытаний на одноосное сжатие образцов определены предел прочности, модуль упругости и предел текучести материалов (таблица 2). Модуль упругости полученных образцов принимает значения в диапазоне от 0,9 до 3,6 ГПа, в то время как предел прочности изменяется от 31 до 212 МПа. Полученные значения модулей упругости образцов схожи и не превышают значений, характерных для костной ткани, для кортикальной кости от 3 – 30 ГПа, для губчатой кости от 0,02 – 2 ГПа [1, 4]. Предел прочности образцов соответствует значениям из диапазона для костной ткани от 10 до 200 МПа [1, 4].

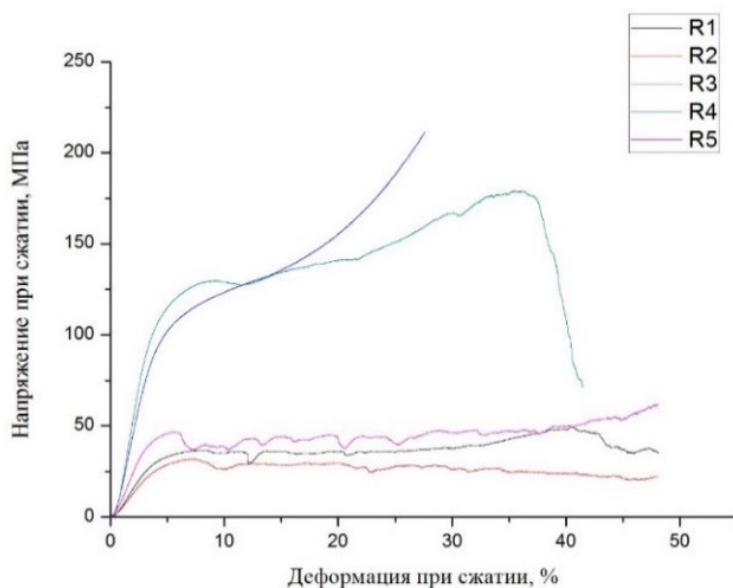


Рис. 3. Кривая напряжение-деформация механических испытаний на сжатие полученных образцов всех типов

Таблица 2

Результаты механических испытаний на сжатие полученных скэффолдов

| Тип образца | Предел прочности [МПа] | Модуль упругости [ГПа] | Предел текучести [ГПа] |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| R1 | 48±1 | 1,25±0,47 | 36,59 |
| R2 | 31±1 | 0,87±0,08 | 31,82 |
| R3 | 212±1 | 2,26±0,07 | - |
| R4 | 162±24 | 3,09±0,55 | 129,78 |
| R5 | 49±19 | 1,28±0,35 | 46,77 |

Деформация образцов на сжатие имеет аналогичный механизм что и пластичный материал (рис. 2) [4]. Деформация образцов происходит преимущественно за счет изгиба и смыкания сетчатой структуры (рис.2).

Выводы. Методом ЭЛП были получены скэффолды на основе титанового сплава ВТ6 с градиентной структурой. Поверхность скэффолдов является однородной и обладает развитой морфологией, образцы имеют механические параметры схожие с человеческой костью. В процессе разрушения образцы деформировались аналогично пластичным металлам. Таким образом, данные скэффолды являются перспективными в проведении дальнейших испытаний и использования в медицинской практике.

Авторы благодарят А. Коптюга за помощь в работе. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 15-13-00043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang X. et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: a review //Biomaterials. – 2016. – Т. 83. – pp. 127-141.
2. Parthasarathy J. et al. Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM) // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2010. – Vol. 3, No. 3. – P. 249–259
3. Алехин А.П. и др. Синтез биосовместимых поверхностей методами нанотехнологии // Рос. Нанотехнол. – 2010. – Т. 9, № 10. – С. 128–136.
4. Kienapfel H. et al. Implant fixation by bone ingrowth // Journal of Arthroplasty. – 1999. – Vol. 14, No. 3. – pp. 355–368