

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 3-Д СЕТЧАТЫХ СКЭФФОЛДОВ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ПО ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

М.С. Ткачев, Е.С. Мельников

Научный руководитель: ст. н. с., к. ф.-м. н. М.А. Сурменова,
Национально-исследовательский Томский Политехнический университет
melnikov.evgeniy92@mail.ru

Аннотация

Методом электронно-лучевой плавки были изготовлены образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V с разной пористостью. Методами сканирующей электронной микроскопии исследованы особенности морфологии. Анализ испытаний на сжатие позволил определить модуль Юнга и предел прочности полученных образцов. Установлено, что значения модуля упругости (2,6-5,1 ГПа) и предела прочности (111–279 МПа), полученных скэффолдов, соответствуют интервалам значений для костной ткани.

Введение

Титан и его сплавы (Ti-6Al-4V) мало ионизируются в биологических средах, а продукты коррозии не токсичны. Титановый сплав Ti-6Al-4V обладает высокой коррозионной стойкостью, имеет высокие значения для отношения прочности к весу [1] и является биосовместимым [2], благодаря чему получил широкое применение в качестве материала для создания имплантатов. Литые титановые имплантаты примерно в два раза тяжелее натуральной кортикальной кости [3]. Что более важно, модуль упругости цельных титановых сплавов составляет 100–115 ГПа, когда значения для разного вида костей составляют от 0,5–20 ГПа. Данное механическое несоответствие является причиной того, что здоровые кости недостаточно нагружаются и возникает эффект «экранирования напряжений» (stress shielding). Эффект «экранирования напряжений» приводит к резорбции здоровых костей и расшатыванию имплантата, вследствие чего уменьшается срок функционирования имплантата. Одним из методов понижения модуля упругости и веса имплантата до значений, соответствующих костям, является создание сетчатых структур [3–5]. Традиционные методы не позволяют получить структуры со сложной геометрией [6]. Перспективными методами в области получения сложной формы являются методы послойного синтеза, в частности метод электронно-лучевой плавки (ЭЛП) [3]. Данный метод позволяет достаточно точно контролировать форму, внутренние и внешние размеры создаваемой детали, в случае создания имплантатов получать индивидуализированные по форме детали [6].

Материалы и методы

Объектом исследований послужили сетчатые образцы кубической формы ($10 \times 10 \times 20$ мм³) на основе титанового сплава Ti-6Al-4V, приготовленные методом ЭЛП на установке фирмы «ARCAM» (Mid Sweden University). Измерения механических характеристик осуществлялись с использованием двухколонной испытательной системы «Instron 5969». Исследования морфологии были выполнены на сканирующем электронном микроскопе.

Результаты и их обсуждение

На рис.1. представлена морфология поверхности сетчатых структур. Развитая морфология поверхности предпочтительна для клеточной адгезии [7]. Размер ячеек сеток выбран в соответствии с условием (размер ячейки > 300 мкм), так как являются рекомендуемыми параметрами для лучшего остеогенеза и формирования капилляров [8].

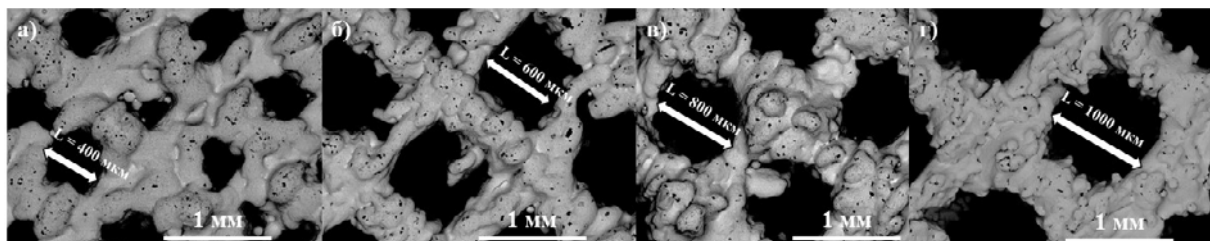


Рис. 1. Морфология сетчатой структуры образцов первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) типов

Механические характеристики такие, как модуль Юнга и предел прочности, соответствующие полученным образцам, приведены в таблице 1. Значения модуля Юнга для всех типов образцов находятся в пределах значений, соответствующих костной ткани [4, 5, 9, 10], и наиболее близки к значениям для губчатой (5 ГПа), а

также лучевой и плечевой кости (2 ГПа). В результате испытаний на сжатие определялся предел прочности. Предел прочности 3-го и 4-го типа образцов лежат в допустимом для костной ткани интервале (100–170 МПа) [9–11]. Образцы 1-го и 2-го типа превышают максимальные значения прочности кости.

Таблица 1.

Тип образцов	Размер ячейки L, мкм	Пористость, %	Модуль Юнга образца, ГПа	Предел прочности, МПа
1	400	54	5,1	279
2	600	64	3,9	228
3	800	72	3,2	119
4	1000	74	2,6	111

Анализ на сжатие показал механизм разрушения образцов при осевой нагрузке. При испытании на сжатие происходило разрушение и смыкание отдельных ячеек сетки без полного разрушения и растрескивания образца.

Заключение

Изготовлены кубические сетки из сплава титана Ti-6Al-4V методом ЭЛП с разной пористостью (54, 64, 72, 74%). Выбранный размер сетчатой структуры сформирован с перспективой проведения биологических испытаний *in vivo* и *in vitro*. Модуль Юнга и предел прочности полученных образцов лежит в пределах значений для костной ткани. Установлена зависимость, определяющая уменьшение модуля Юнга при увеличении пористости. Полученные скэффолды обладают оптимальными механическими параметрами, исходя из чего значительно снижают вероятность явления экранирования напряжений, а, следовательно, являются перспективными в медицинском применении.

Авторы выражают благодарность А. Коптюгу и Р. Сурменеву за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке РФФ (15-13-00043).

Список литературы

1. Khan S.N., Tomin E., Lane J.M. Clinical applications of bone graft substitutes // *Orthopedic Clinics*. – 2000. – Vol. 31, No. 3. – С. 389–398.
2. Branemark P.I. et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period // *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery. Supplementum*. – 1977. – Vol. 16. – P. 1.
3. 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.
4. Pilliar R.M. Porous-surfaced metallic implants for orthopedic applications // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 1987. – Vol. 21, No. A1 Suppl. – P. 1–33.
5. Kienapfel H. et al. Implant fixation by bone ingrowth // *Journal of Arthroplasty*. – 1999. – Vol. 14, No. 3. – P. 355–368.
6. Li X. et al. Fabrication and characterization of porous Ti₆Al₄V parts for biomedical applications using electron beam melting process // *Materials Letters*. – 2009. – Vol. 63, No. 3. – P. 403–405.
7. Алехин А.П. и др. Синтез биосовместимых поверхностей методами нанотехнологии // *Рос. Нанотехнол.* – 2010. – Т. 9, № 10. – С. 128–136.
8. Wieding J., Wolf A., Bader R. Numerical optimization of open-porous bone scaffold structures to match the elastic properties of human cortical bone // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2014. – Vol. 37. – P. 56–68.
9. Самсонова А.В. Гипертрофия скелетных мышц человека. – Rinner USA, 2015.
10. Анисимова Н.Ю. и др. Опыт исследования механических свойств трубчатых костей собак // *Vet Pharma*. – 2012. – № 4.
11. Карлов А.В., Шахов В.П. Системы внешней фиксации и регуляторные механизмы оптимальной биомеханики. – Томск : STT, 2001. – 480 с.