

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТИТАНОВЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТАХ

*Иванов П. И.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Иванов М. А. – канд. физ.-мат. наук*

Исследованы три модели титановых нанотрубок с различной структурой. Проведены испытания на прочность и удлинение. Первая модель показала наилучшую пластичность (55,58 %), вторая — умеренные характеристики, а третья — наименьшую прочность (4,67 МПа). Результаты демонстрируют влияние структуры на механические свойства, что важно для разработки медицинских имплантатов.

Титановые нанотрубки представляют собой перспективный материал для медицинских имплантатов благодаря их уникальной структуре, высокой механической прочности и биосовместимости. Цель данного исследования — изучить свойства и строение титановых нанотрубок, а также оценить их потенциал для применения в медицине. В рамках работы были созданы модели нанотрубок с различными параметрами, проведены испытания на разлом и анализ их механических характеристик. Результаты исследования позволят определить оптимальные параметры нанотрубок для разработки имплантатов с улучшенной остеоинтеграцией и долговечностью, что особенно актуально в условиях растущих требований к качеству медицинских материалов.

### **Строение и свойства титановых нанотрубок**

Титановые нанотрубки представляют собой упорядоченные полые цилиндрические структуры с диаметром от нескольких до сотен нанометров, формирующиеся в процессе анодного окисления титана в электролитах на основе фторидов [1]. Образование трубок обусловлено конкуренцией процессов электрохимического окисления и локального растворения оксидного слоя под действием фторид-ионов.

Эти наноструктуры обладают высокой удельной поверхностью и пористостью, что обеспечивает их превосходные функциональные свойства. Кристаллическая структура нанотрубок может регулироваться от аморфной до кристаллических фаз (анатаз, рутил) посредством термической обработки, что существенно улучшает их механическую прочность и коррозионную стойкость [3].

Механические свойства титановых нанотрубок превосходят компактный титан благодаря их уникальной наноструктуре, эффективно распределяющей механические нагрузки [4]. Важнейшим преимуществом является их исключительная биосовместимость: они не вызывают токсических реакций и способствуют адгезии и пролиферации клеток, что критически важно для медицинских имплантатов [5].

Структуру поверхности можно модифицировать, изменяя параметры анодирования (напряжение, состав электролита) или применяя последующую термическую обработку. Функционализация поверхности (например, нанесение гидроксиапатита или антибактериальных агентов) расширяет возможности их применения в медицине, включая ортопедические и стоматологические имплантаты [6].

### **3. Экспериментальная часть: создание и сравнение моделей титановых нанотрубок**

В рамках данного исследования в лаборатории БГУ были созданы три пластиковые модели титановых нанотрубок с различными структурными характеристиками для изучения их механических свойств, таких как предел прочности и максимальное удлинение. Все модели представляли собой цилиндры со сквозным отверстием, радиусом 6 мм и длиной 80 мм. Основные различия между моделями заключались в их внутренней структуре и ориентации слоев, что позволило провести сравнительный анализ их механического поведения. Печать моделей проходила на 3д принтере ORIGINAL PRUSA i3 MK2. Исследования проходили на разрыв-машине Testometric M350-10CT DBB TCL-1000 kg.

**Модель 1**, приведенная на рисунке 1а, была выполнена в виде цилиндра со сквозным отверстием и шестигранными отверстиями. Структура модели была ахиральной, с типом укладки слоев, известным как "кресло" (chair-type). Количество слоев составило один. Испытания на разлом показали, что данная модель обладает пределом прочности 6 МПа и максимальным удлинением 55,58 %. Высокое значение удлинения свидетельствует о значительной пластичности материала, что может быть полезным для имплантатов, подвергающихся циклическим нагрузкам. Однако относительно низкий предел прочности указывает на необходимость оптимизации структуры для повышения механической устойчивости.

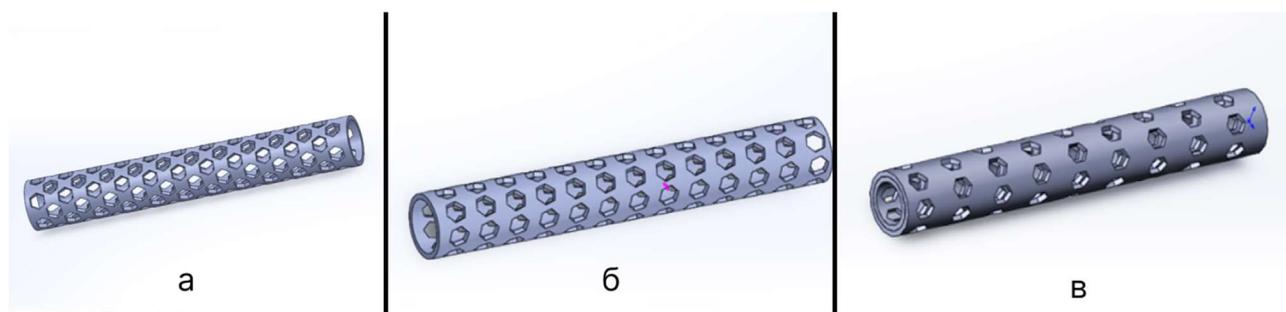


Рисунок 1. Пластиковые модели нанотрубок

**Модель 2** (рисунок 1б) также представляла собой цилиндр со сквозным отверстием и шестигранными отверстиями, но с ахиральной структурой типа "зигзаг" (zigzag-type). Количество слоев осталось равным одному. Результаты испытаний показали, что предел прочности этой модели составил 5,1 МПа, а максимальное удлинение — 22,3 %. По сравнению с первой моделью, прочность снизилась, а удлинение уменьшилось более чем в два раза.

**Модель 3** (рисунок 1в) отличалась от предыдущей хиральной структурой с углом к оси 15°. Количество слоев также составило один. Предел прочности этой модели оказался наименьшим — 4,67 МПа, а максимальное удлинение составило 28,52 %. Хиральная структура, несмотря на свою сложность и потенциальные преимущества в распределении нагрузок, показала худшие механические характеристики по сравнению с ахиральными моделями.

Графики зависимостей нормального напряжения  $\sigma$  от относительной деформации  $\epsilon$  для трёх пластиковых моделей приведены на Рис. 2.

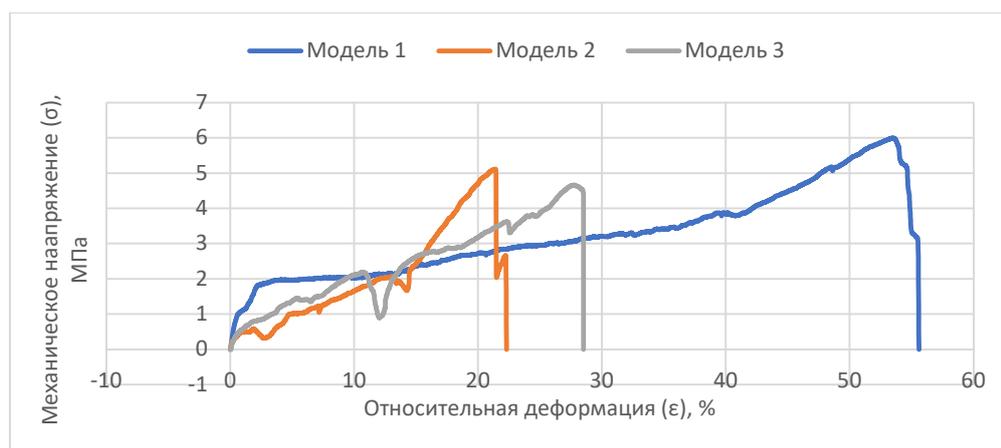


Рисунок 2. Зависимость нормального напряжения  $\sigma$  от относительной деформации  $\epsilon$  для трёх моделей

### Заключение

Проведенное исследование трех пластиковых моделей титановых нанотрубок с различными структурными характеристиками показало, что их механические свойства существенно зависят от типа структуры. Первая модель продемонстрировала наибольшую пластичность (удлинение 55,58 %) при умеренной прочности (6 МПа), что делает ее перспективной для применений, где важна устойчивость к деформациям. Вторая и третья модели показали снижение прочности и пластичности, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации их структуры. Результаты исследования подчеркивают важность выбора архитектуры нанотрубок для создания медицинских имплантатов с улучшенными механическими свойствами.

#### Список использованных источников:

1. Zwilling, V., et al. (1999). "Structure and physicochemistry of anodic oxide films on titanium and TA6V alloy." *Surface and Interface Analysis*, 27(7), 629-637.
2. Brammer, K. S., et al. (2009). "Improved bone-forming functionality on diameter-controlled TiO<sub>2</sub> nanotube surface." *Acta Biomaterialia*, 5(8), 3215-3223.
3. Macak, J. M., et al. (2007). "TiO<sub>2</sub> nanotubes: Self-organized electrochemical formation, properties and applications." *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 11(1-2), 3-18.
4. Park, J., et al. (2007). "Nanotube morphology changes for Ti-Zr alloys as Zr content increases." *Nanotechnology*, 18(5), 055705.
5. Popat, K. C., et al. (2007). "Titania nanotubes: A novel platform for drug-eluting coatings for medical implants?" *Small*, 3(11), 1878-1881.
6. Ercan, B., et al. (2011). "Diameter of titanium nanotubes influences anti-bacterial efficacy." *Nanotechnology*, 22(29), 295102.