

*Маршунина М.А.*

*Студентка*

*1 курс, факультет информатики, математики и электроники  
Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева.*

*Россия, г. Москва*

*Научный руководитель: Казакевич П.В.*

*Кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник*

*ЛЛС СФ ФИАН*

## **ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУР НА СМАЧИВАЕМОСТЬ И ПРИЖИВЛЯЕМОСТЬ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТОВ**

***Аннотация:** В работе рассматривается возможность управления приживляемостью титановых имплантов. Предложен метод лазерной абляции в жидкости, который основан на локальном плавлении материала под слоем жидкости с помощью лазерного пучка. Выявлено, что смачиваемость поверхности меняется, при изменении плотности энергии лазерного облучения. Создан прототип устройства, позволяющего менять смачиваемость импланта с помощью предложенного метода.*

***Ключевые слова:** приживляемость, титан, смачиваемость, лазерная абляция.*

***Annotation:** The paper discusses the possibility of controlling the degree of engraftment of titanium implants, depending on the wettability of their surface. The method of laser ablation in a liquid is used. The wettability of the surface changes according to the laser energy density. Created by a portable device that provides a*

*possibility to change the wettability of the implant using the method of laser ablation in the liquid, depending on surgeon's requirements.*

**Key words:** *engraftment, titanium, wettability, laser ablation.*

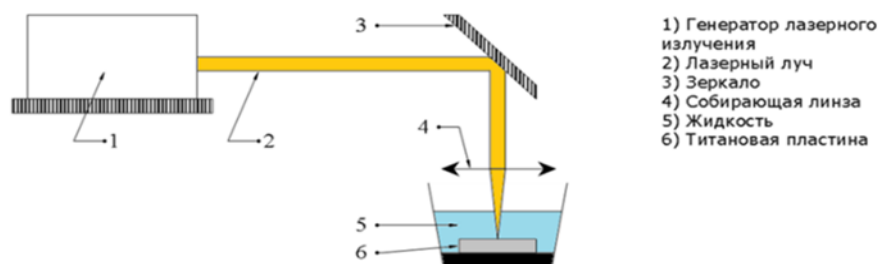
При использовании титановых имплантов важно уметь контролировать смачиваемость их поверхности, ведь от этого параметра зависит последующая интеграция импланта в костные ткани (временная имплантация или постоянная).

Гипотеза заключается в том, что импульсная лазерная абляция титанового импланта в жидкой среде может приводить к формированию химически чистых поверхностных микро- и наноструктур.

При этом изменение их геометрических размеров (путем изменения плотности энергии излучения, попадающего на поверхность образца) позволит контролировать смачиваемость поверхности в рамках одного метода.

Опираясь на гипотезу, предлагается использовать метод лазерной абляции для создания технологии изменения приживляемости титановых имплантов непосредственно в клинике.

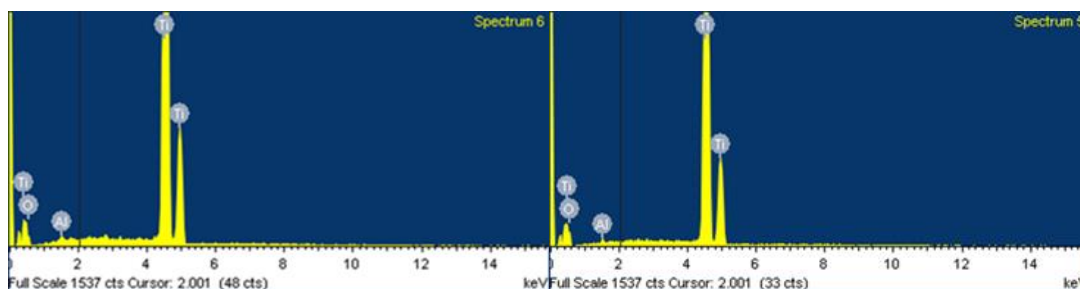
Была собрана экспериментальная установка, которая позволяет облучать поверхность титана марки ВТ-01 в различных жидкостях (дистиллированная вода  $H_2O$ , этиловый спирт  $C_2H_5OH$  (95%), жидкий азот  $N_2$ , жидкий аргон  $Ar$ ). Для этого излучение Nd: YAG (1.064 мкм, 250 пс, 20 Гц, 0.3 мДж) лазера фокусировалось на поверхности титана, находящегося под слоем выбранной жидкости. Толщина слоя жидкости составляла величину порядка 5 мм. Плотность энергии на поверхности мишени изменялась в диапазоне от 0 до 1 Дж/см<sup>2</sup>. Образец перемещался под лазерным излучением с помощью XY-координатных столиков. Оптимальной средой для облучения стал этиловый спирт. Схема собранной экспериментальной установки представлена рисунке 1.



**Рис 1 – Экспериментальная установка**

Экспериментально было определено влияние плотности энергии лазерного излучения на изменение физико-химических свойств поверхности образца. Для этого при облучении изменялось расстояние от мишени до фокусирующего объектива.

Далее был осуществлен спектральный анализ характерных облученных областей на спектрофотометре СФ-56 с приставкой диффузного отражения. На основе полученных данных был построен график спектров поглощения поверхности. Морфология лазерно-модифицированного слоя изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss EVO 50. Были получены изображения структур поверхности и проведён энергодисперсионный анализ элементного состава образцов на приставке к электронному микроскопу X-MAX 80 Oxford Instruments. С помощью энергодисперсионного анализа было выявлено, что концентрация кислорода на поверхностях варьируется от 13.5% до 22.3% массовой доли и на образцах присутствует небольшое количество алюминия. Полученные графики представлены на рисунке 2.

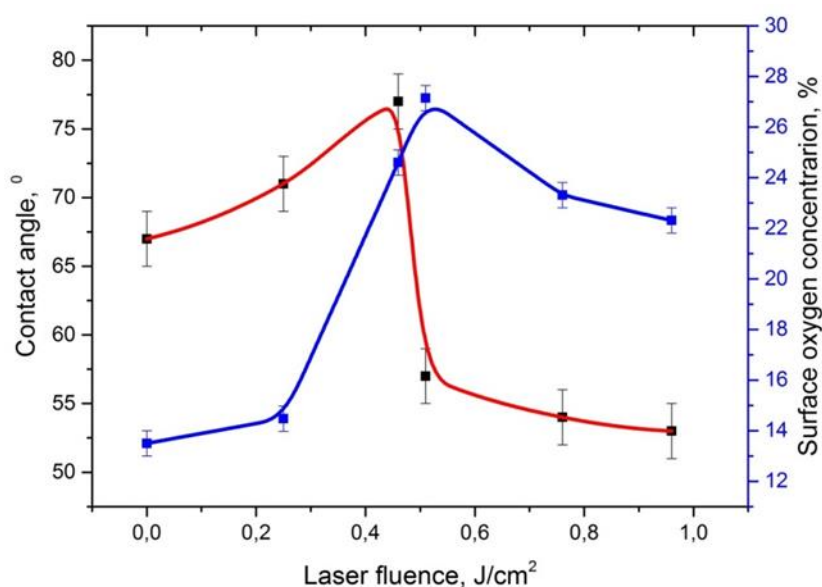


**Рис 2 – Данные энергодисперсионного анализа**

Также поверхность образца облучалась при заданной фокусировке лазерного излучения в одну точку, что позволило изучить динамику изменения геометрического размера структур на поверхности титана с увеличением числа импульсов.

Для определения контактного угла была собрана экспериментальная полуавтоматическая установка, позволяющая формировать каплю заданного объема на поверхности образца. Для этого управление положением гидрозатвора осуществлялось шаговым двигателем управляемого микроконтроллером Arduino Uno.

После построения графика зависимости концентрации кислорода и контактного угла от плотности энергии было обнаружено, что эти зависимости достигают своих максимумов в очень близких диапазонах плотности энергии ( $\sim 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>). До значения плотности энергии 0.5 Дж/см<sup>2</sup> идёт увеличение контактного угла и рост оксидного слоя на поверхности. Это говорит о том, что в данном диапазоне плотности энергии преимущественно идёт формирование окисленных поверхностных структур. Поэтому на контактный угол влияет как геометрия структур, так и толщина оксидного слоя на поверхности. Далее, при увеличении плотности энергии, значение контактного угла падает, а концентрация оксида постепенно уменьшается, что связано с преодолением порога лазерной абляции для титана и над процессами окисления преобладают процессы плавления и удаления материала мишени в окружающую жидкость (влияние гидродинамических неустойчивостей на границе твердое тело-жидкость). При этом основную роль в изменении смачиваемости играет уже морфология облученной поверхности. График зависимости концентрации кислорода на поверхности и контактного угла от плотности энергии излучения представлен на рисунке 3.



**Рис 3 - График зависимости концентрации кислорода на поверхности и контактного угла от плотности энергии излучения.**

Данные экспериментальные зависимости концентрации кислорода в поверхности и контактного угла от плотности энергии наглядно показывают, что с помощью метода лазерной абляции можно контролировать смачиваемость поверхности титана.

Также был выявлен рост структур по направлению лазерного излучения при наклонном креплении образца, что, предположительно, может существенно влиять на сопротивление импланта в момент установки.

Таким образом, данный метод изменения смачиваемости с помощью лазерной абляции в жидкости позволяет сформировать химически чистые структуры. Большую роль в изменении смачиваемости играет толщина оксидного слоя на поверхности титана, а не только размеры нано- и микроструктур, как предполагалось изначально. Также, ожидается, что при увеличении толщины оксидного слоя биосовместимость будет улучшаться.

Используя данный метод, была создана установка, позволяющая изменять смачиваемость (а соответственно и приживляемость) имплантов. Она включает в себя лазерный источник, модель обрабатываемого импланта, находящуюся в кювете с жидкостью и имеющую две степени свободы - по оси

z и вокруг своей оси, а также систему замещения отработанной жидкости и блок микроконтроллерного управления.

#### **Использованные источники:**

- 1) Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, М.Н. Герике, В.Г. Прокошин, К.С. Хорьков. Формирование наноструктурированных тонкопленочных покрытий титана под воздействием фемтосекундного лазерного излучения в вакууме. 2011. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-nanostrukturirovannyh-tonkoplenochnyh-pokrytiy-titana-pod-vozdeystviem-femtosekundnogo-lazernogo-izlucheniya-v-vakuume>
- 2) Д.Н. Бухаров, А.О. Кучерик. Математическое моделирование процессов распространения продуктов лазерной абляции. 2013. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protssessov-rasprostraneniya-produktov-lazernoy-ablyatsii>
- 3) Э.М. Гильмияров, В.М. Радомская, Ф.Н. Гальмиярова, А.В. Бабичев, К.И. Колесова, А.Н. Азизов. Манипуляционные, эстетические свойства, биосовместимость современных адгезивных и пломбирочных материалов. 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/manipulyatsionnye-esteticheskie-svoystva-biosovmestimost-sovremennyh-adgezivnyh-i-plombirovochnyh-materialov>
- 4) С.В. Гнеденков, С.Л. Синебрюхов, В.С. Егоркин, Д.В. Машталяр, Е.В. Легостаева, Ю.П. Шаркеев. Электрохимические свойства наноструктурированного титана. 2011. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrohimicheskie-svoystva-nanostrukturirovannogo-titana>
- 5) В.С. Казакевич, П.В. Казакевич, Д.А. Камынина, П.С. Ярьско. Лазерная абляция титана в криогенных жидкостях и в жидкостях, находящихся при комнатной температуре. 2018.

URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/lazernaya-ablyatsiya-titana-v-kriogennyh-zhidkostyah-i-v-zhidkostyah-nahodyaschihsya-pri-komnatnoy-temperature>

6) В.С. Казакевич, П.В. Казакевич, П.С. Яресько, И.Г. Нестерова. Формирование поверхностных микро и нано структур при лазерной абляции металла в среде жидкого азота. 2012.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-poverhnostnyh-mikro-i-nano-struktur-pri-lazernoj-ablyatsii-metalla-v-srede-zhidkogo-azota>

7) А.Н. Солдатов, А.В. Васильева. Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях. 2008. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/effekt-lazernoj-rezonansnoj-ablyatsii-v-mikroi-nanotekhnologiyah>

8) В.В. Трофимов, О.В. Федчишин, В.А. Клименов. Титан, сплавы титана и их применения в стоматологии. 2009. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/titan-splavy-titana-i-ih-primenenie-v-stomatologii>

9) Г.П. Фетисов, Ю.П. Гончарова, М.И. Монахова. Комплексное обеспечение биосовместимости материалов. 2011.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnoe-obespechenie-biosovmestivosti-materialov>