

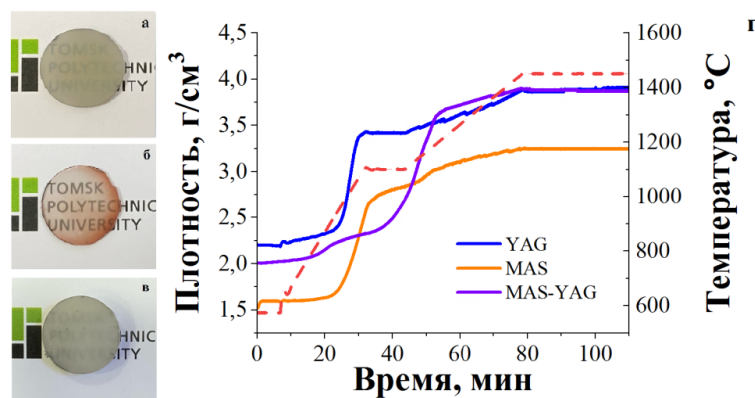


Рис. 1. Фото образца а) MAS; б) YAG; в) MAS-YAG; г) Изменение плотности порошков YAG и MAS в процессе электроимпульсного плазменного спекания

Таблица 1. Значения плотности исследуемых образцов

Образец	m, г	h, мм	D, мм	ρ , г/см ³	$\rho_{\text{отн}}$, %	$\rho_{\text{теор}}$, г/см ³
MAS	1,31	2,36	14,35	3,43	96,68	3,55
YAG	1,28	1,85	14,41	4,24	93,23	4,55
MAS-YAG	2,07	3,24	14,41	3,93	97,79	4,02

Показано, что при изготовлении ФГК основная доля уплотнения приходится на неизотермическую стадию нагрева. В отличие от исходных компонентов, начало уплотнения ФГК смещено в сторону больших температур.

Изготовлена функционально-градиентная керамика на основе иттрий-алюминиевого граната и алюмомагниевого шпинели, изучены

закономерности протекания процесса спекания и определена плотность и исследуемых материалов.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 21-71-10100 на оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Список литературы

1. Shanmugavel P. et al. // Eur. J. Sci. Res., 2012. – V. 68. – № 3. – P. 412–439.
2. Быков Ю. В. и др. // Физика и химия обработки материалов, 2011. – Т. 4. – С. 52–61.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ГРАФЕН-КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА

Е. М. Догадина, Р. Д. Родригес, С. И. Твердохлебов,
Е. В. Плотников, А. И. Козельская, Е. С. Шеремет
Научный руководитель – PhD, профессор Р. Д. Родригес

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, tri@tpu.ru

Титановые имплантаты являются наиболее распространенными имплантатами для восстановления костей. Для улучшения их интеграции используются различные покрытия на основе фосфата кальция или гидроксиапатита. Однако, чтобы ускорить регенерацию костной ткани, пациенты должны уже в первые дни оказывать

нагрузку на поврежденную кость [1]. Поэтому во время послеоперационного восстановления важно правильно подобрать нагрузку на поврежденную конечность. Встроенные датчики деформации помогут при восстановлении кости определить допустимую нагрузку на нее. Более того, титан имеет модуль упругости примерно в

10 раз больший, чем костная ткань [2], что является основной причиной деформации или разрушения имплантата. В этом случае датчик деформации поможет оперативно узнать о перегрузке имплантата.

Кроме того, создание «умного» имплантата может способствовать ускоренной регенерации костной ткани. Например, было показано, что электростимуляция способствует заживлению и регенерации костей как в экспериментах на животных, так и при клиническом лечении [3].

В этой работе с целью изготовления проводящих датчиков, интегрированных в импланты, проводилась лазерная обработка модифицированного графена (Mod-G), нанесенного на титановые подложки с биоактивным кальций-фосфатным (CaP) покрытием.

Кальций-фосфатное покрытие формировалось на титановых пластинах методом микродугового оксидирования (МДО). Затем на CaP покрытие наносилась дисперсия модифицированного графена. Графен был функционализирован солями диазония во время окислительного электрохимического отшелушивания графитового электрода в растворе серной кислоты [4].

Полученный порошок разбавляли этанолом с концентрацией 4 мг/мл. Дисперсию наносили поверх образцов из титана/CaP и сушили. Далее образцы были обработаны лазером с длиной волны 436 нм и мощностью 0,5 Вт.

В результате была получена износостойкая проводящая структура, которая выдерживает испытание на истирание в песке в течении двух часов. Фосфат кальция имеет высокопористую структуру из-за метода МДО. Следовательно, одной из причин образования композита является заполнение и покрытие этих пор графеном. Эта гипотеза подтверждается изображениями

СЭМ и АСМ. Также были получены спектры комбинационного рассеяния и карта комбинационного рассеяния диоксида титана и G-band графена на границе раздела L-ModG/ModG после воздействия ультразвуком, которые также подтверждают, что графен заполняет поры.

Испытание на изгиб, в котором было показано изменение удельного сопротивления при приложении циклической нагрузки, подтвердило, что конструкция L-modG/CaP/Ti может использоваться в качестве датчика деформации.

Также была оценена токсичность покрытия на культуре клеток фибробластов человека в течение 7 дней. Материал L-modG/CaP/Ti показал отличную биосовместимость к клеткам. И была проверена стабильность материала в условиях, близким к физиологическим, – в растворе DPBS в течение 12 недель. Хотя сопротивление меняется в течение всего периода тестирования, оно остается в пределах значений, подходящих для применения в электронике [5]. Электропроводность сохраняется в течение 12 недель, что соответствует среднему времени заживления кости.

В результате работы была продемонстрирована возможность применения полученных покрытий в электронике, а именно, электрическая цепь произвольной формы. Биосовместимые электроды, созданные масштабируемым и недорогим методом лазерной обработки приближают нас к созданию электроники на титановых имплантатах и способствуют появлению новых парадигм, таких как умные имплантаты и Интернет медицинских вещей.

Исследование проведено при финансовой поддержке проекта Приоритет 2030-НИП/ИЗ-007-0000-2023.

Список литературы

1. Goodship A. E., Lawes T. J., Rubin C. T. // *J Orthop Res.*, 2009. – № 27. – P. 922–930.
2. Garot C, Bettega G, Picart C. // *Advanced Functional Material*, 2021. – № 31.
3. Leppik L., Oliveira K., Bhavsar M., Barker J. // *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 2020. – № 46. – P. 231–244.
4. Rodriguez R. D.; Shchadenko S.; Murastov G.; Lipovka A.; Fatkullin M.; Petrov I.; Tran T. H.; Khalelov A.; Saqib M.; Villa N. E.; Bogoslovskiy V.; Wang Y.; Hu C. G.; Zinoviyev A.; Sheng W.; Chen J. J.; Amin I.; Sheremet E. // *Adv. Funct. Mater*, 2021. – 2008818. – P. 1–12.
5. Zambrano B., Renz A.F., Lienemann T., Vörös K., Lee J. // *Advanced Healthcare Material*, 2021. – № 10.