

УДК 621.763

**Н.Н. Струков, А.А. Сметкин**

**N.N. Strukov, A.A. Smetkin**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**Н.Б. Асташина**

**N.B. Astashina**

Пермская государственная медицинская академия им. ак. Е.А. Вагнера  
Perm State Medical Academy

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ «УГЛЕКОН – ТИТАН»**

### **RESEARCH OF INTERPHASE INTERACTION IN THE COMPOSITE MATERIAL “UGLEKON – TITANIUM”**

Представлены результаты исследований межфазного взаимодействия титана и углерода в композиционном материале «углекон – титан». При наплавке титана на углеродный материал формируется карбидный слой, определяющий свойства экспериментальных образцов. Дана оценка структурным параметрам материала, и предложены их оптимальные величины для повышения эффективной эксплуатации конструкций из композиционного материала.

**Ключевые слова:** углекон, титан, карбид титана, структура, сканирующая электронная микроскопия.

Results of researches for interfacial interaction of titanium and carbon in composite "uglekon – titanium" are submitted. At overlaying welding titanium on a carbon material the carbide layer determining properties of experimental samples is formed. The estimation is given to structural parameters of a material and their optimal values for increase of efficient operation of designs from composite are offered.

**Keywords:** uglekon, titanium, titanium carbide, structure, scanning electron microscopy.

В настоящее время для эндопротезирования применяются имплантаты из различных материалов (металлов, керамики, композитов). Одним из наиболее перспективных материалов для хирургического замещения дефек-

тов челюстных костей, обещающим успешное последующее ортопедическое лечение и реабилитацию, является углерод-углеродный композиционный материал «Углекон-М», отличающийся биологической совместимостью с костной тканью челюстей [1–3].

Одним из важных направлений современной челюстно-лицевой ортопедии является разработка рациональных конструкций зубочелюстных протезов с применением современных материалов, что позволит повысить эффективность лечения пациентов с дефектами челюстей [4]. Актуальность проблемы обусловлена выбором наиболее адаптированного материала для замещения костных дефектов челюстей и устранения деформаций челюстно-лицевой области у больных с дефектами челюстных костей.

Целью выполненной работы явилась разработка и изучение взаимодействия компонентов новых имплантационных систем, выполненных на основе биологически инертных материалов с применением современных технологий.

Получение титанового покрытия на «Углекон-М» производили APS-способом (атмосферное плазменное напыление) и TIG-наплавкой (Tungsten Inert Gas Welding – сварка вольфрамом в среде инертных газов). Процессы состоят из трех этапов: 1) генерация плазменной струи/дуги; 2) ввод распыляемого/наплавляемого материала в плазменную струю/дугу, его нагрев и ускорение/плавление и перенос; 3) взаимодействие плазменной струи/дуги и расплавленных частиц с основой [5, 6]. В качестве основы использовали композиционный углерод-углеродный материал «Углекон-М» (УУКМ), на который наносили титановое покрытие с применением различных видов исходных материалов (порошки марок ТПП-7, ПТ-6, механоактивированная титановая губка МАТГ, компактный титан ВТ1-00). Исследование структуры и анализ элементного состава экспериментальных образцов выполнены с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Ultra 55 (Carl Zeiss, Германия) и энергодисперсионного спектрометра Inca Energy 450 (Oxford Instrument, Великобритания). Оценка структурных параметров покрытий выполнена с помощью обработки цифровых изображений посредством программного обеспечения SmartSEM.

При нанесении титанового покрытия на волокна, определяющие прочность материала, учитывалось, что основной механизм диссипации энергии при механической нагрузке заключается в торможении распространения магистральной трещины в присутствии волокон, а также увеличении работы разрушения за счет отслоения волокна.

Экспериментальные работы по выбору оптимальной технологической схемы формирования качественного сплошного покрытия показали, что наиболее эффективным является использование компактного сплава ВТ1-00. Полученный вывод основан на сравнительных испытаниях прочности сцепления покрытия с основой опытных образцов.

Применение порошков с широким диапазоном гранулометрического состава приводит к повышению несплошности покрытия, снижению прочностных характеристик покрытий и адгезионных свойств. Использование порошка ТПП-7 фракционного состава 20–40 мкм приводит к изменению прочностных характеристик в 2 и более раза. Установлено, что прочность сцепления покрытия при использовании в технологии титановых порошков фракций менее 120 мкм и 20–49 мкм составляет 1,0–1,5 МПа и более 3,5 МПа соответственно.

Образцы, подвергнутые наплавке, показали достаточно высокую прочность покрытия и адгезию, при наличии литой структуры покрытия. Разрыв образцов происходит по составляющей УУКМ. Часть УУКМ остается на образце с покрытием. Исследование образцов с покрытием с помощью сканирующей электронной микроскопии, совмещенной с энергодисперсионным спектральным анализом, показало, что область контакта углеродного материала с титаном характеризуется тремя зонами: основы (УУКМ), переходной/граничной зоны и титанового покрытия.

На рис. 1 показано СЭМ-изображение во вторичных электронах излома образца с титановым покрытием: светлая область характеризует титановое покрытие, темная – углеродный материал. Из микроскопического анализа следует, что титановое покрытие толщиной около 200 нм достаточно плотно прилегает к углеродному материалу.

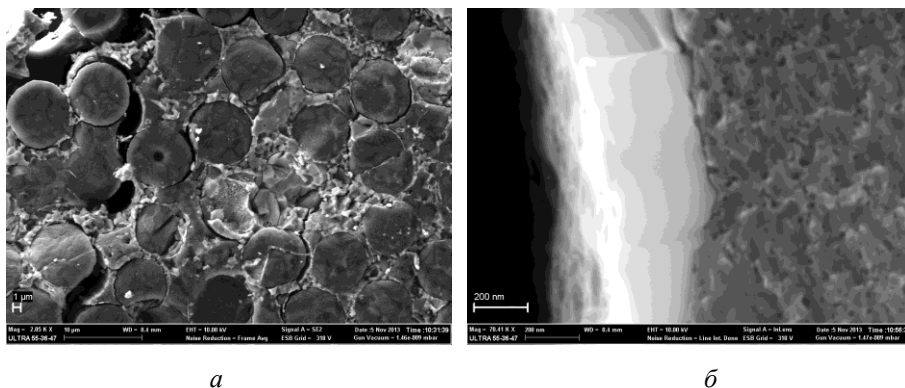


Рис. 1. СЭМ-изображение при различных увеличениях излома образца с нанесенным титановым покрытием: *a* –  $\times 2000$ ; *б* –  $\times 70\,000$

В контактной зоне «титан – углеродный материал» происходит взаимодействие титана и углерода, сопровождающееся образованием карбидов титана  $Ti_xC_x$ , характеризующихся высокой твердостью и хрупкостью. В системе кроме соединения  $TiC$  образуются твердые растворы  $TiC$  с элементарным титаном. В первую очередь при науглероживании титана происходит внедрение углерода (в виде  $TiC$ ) в решетку металла с сохранением его металличе-

ских свойств. Содержание углерода линейно увеличивает прочность титанового сплава только в пределах области гомогенности альфа-фазы. В двухфазной области прочность с возрастанием содержания углерода в системе почти не изменяется. Известно, что предельная растворимость углерода в альфа-титане возрастает от 1,0 ат. % при 400 °С до 1,9 ат. % при 920 °С.

Экспериментальные исследования показали, что в результате повторного нагрева при выполнении наплавки на напыленный слой происходит разрушение поверхностного слоя УУКМ через так называемую переходную зону, содержащую карбиды титана в слое порядка десятков микрометров.

Образцы, подвергнутые наплавке, разрушаются по УУКМ. За счет механического сцепления и большей прочности покрытие при отрыве захватывает с собой часть углеродного материала. Полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа данные и анализ химического состава подтверждают наличие переходной зоны в системе «титан – углеродный материал», состоящей из карбидной фазы и твердых растворов.

Важный аспект проведенной работы – оценка величины переходного слоя и ее влияния на адгезию с углеродным материалом. Исследования показали, что величина переходной зоны зависит от ориентировки углеродных волокон относительно покрытия. В случае для жгутов углеродных волокон, ориентированных нормально к титановому покрытию, формируется слой с размерами карбидных зерен 70–80 нм.

Карбидный слой на боковой поверхности углеродных волокон выглядит несколько иным образом (рис. 2): карбидные зерна размером 30–50 нм образуют очень плотный высокоадгезионный слой толщиной порядка 80 нм. В зависимости от условий нанесения титана толщина такого слоя может достигать 200 нм. В полученном карбидном слое отсутствуют трещины и другие дефекты.

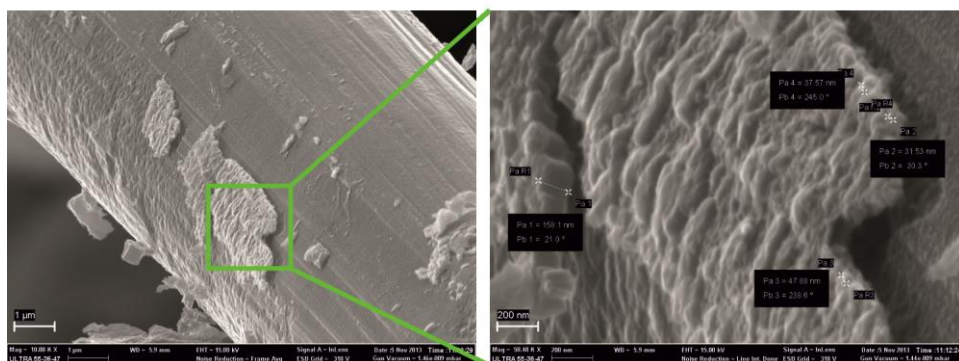


Рис. 2. СЭМ-изображения боковой поверхности углеродного волокна с карбидным слоем

Тонкие однородные трещиностойкие покрытия из TiC, состоящие из гомогенной фазы TiC кубической структуры (рис. 3) толщиной 80–200 нм, обеспечивают повышение прочности материала. Если толщина карбидного слоя превышает 200 нм, то покрытие становится хрупким (рис. 4, стрелками указаны трещины в переходной зоне).

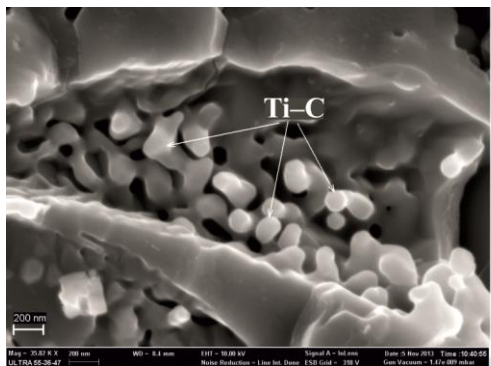


Рис. 3. Карбид титана в промежуточной зоне «титан – углеродный материал»

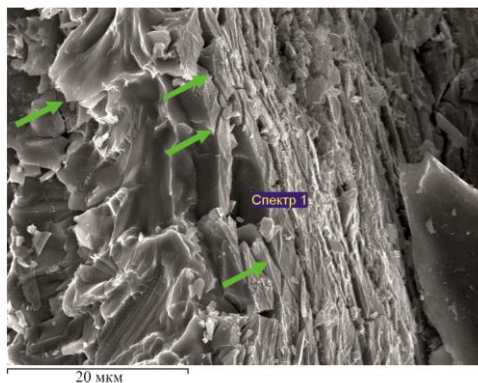


Рис. 4. Структура излома образца с карбидным слоем около 4 мкм

Таким образом, проведенные исследования показали, что при формировании наиболее эффективного высокоадгезионного титанового покрытия в композиционном материале «титан – УУКМ» необходимо контролировать толщину переходной зоны, содержащей карбиды титана. Оптимальным является трещиностойкий карбидный слой 80–200 нм с размером зерен 30–50 нм. Это некий критический размер, превышение которого будет приводить к отслоению титанового покрытия в целом и хрупкому разрушению по карбидному слою.

С учетом вышеописанного, с использованием методов APS-напыления и TIG-наплавки, получен опытный образец углеродного имплантата с титановым покрытием суставного отростка. Применение технологий наплавки, напыления обеспечивает формирование биоинертного покрытия на имплантатах с адгезионной прочностью 3,5–5,0 МПа и возможностью регулирования структуры покрытия.

### Список литературы

1. Асташина Н.Б. Перспективы комплексного подхода при лечении пациентов с дефектами челюстных костей // Уральский медицинский журнал. – 2009. – № 5. – С. 5–8.

2. Кислых Ф.И., Рогожников Г.И., Асташина Н.Б. Лечение больных с дефектами челюстных костей. – М., 2006. – 193 с.

3. Рапекта С.И. Пластика дефектов нижней челюсти углеродными имплантатами «Углекон-М»: автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Пермь, 2008. – 21 с.

4. Оценка основных характеристик новой комбинированной имплантационной системы для эндопротезирования височно-нижнечелюстного сустава / В.Н. Анциферов, Н.Б. Асташина, Г.И. Рогожников, М.Н. Каченюк, С.И. Рапекта // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 2, ч. 1. – С. 20–23.

5. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко, О.П. Солоненко, В.А. Сафиуллин. – М.: Наука, 1990. – 408 с.

6. Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasma: Fundamental and applications. – Vol. 1. – Plenum Press, New York, 1994. – 452 p.

Получено 6.02.2014

**Струков Николай Николаевич** – кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Проф. Поздеева, 6, e-mail: kpmc@pm.pstu.ac.ru).

**Сметкин Андрей Алексеевич** – кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Проф. Поздеева, 6, e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru).

**Асташина Наталья Борисовна** – доктор медицинских наук, Пермская государственная медицинская академия им. ак. Е.А. Вагнера (614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: caddis@mail.ru).

**Strukov Nikolai Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614013, Perm, Prof. Pozdeeva st., 6, e-mail: kpmc@pm.pstu.ac.ru).

**Smetkin Andrey Alekseevich** – Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614013, Perm, Prof. Pozdeeva st., 6, e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru).

**Astashina Natalia Borisovna** – Doctor of Medicine, Perm State Medical Academy (614000, Perm, Petropavlovskaya st., 26, e-mail: caddis@mail.ru).