

**СТРУКТУРА ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ ТИТАН-ЦИРКОНИЙ,
СФОРМИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ
НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ**

Соснин К.В., Романов Д.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,
Россия, k.sosnin@mail.ru*

В качестве подложки использовали дентальный имплантат из сплава титана марки ВТ6. Формирование покрытия осуществляли методами электровзрывного легирования с использованием электровзрывной установки ЭВУ 60/10М. С этой целью электрическому взрыву подвергали ниобиевую фольгу массой 850 мг. Продукты взрыва, проходя через графитовое сопло формировали импульсную плазменную струю, которая обеспечивала на поверхности напыляемого образца поглощаемую плотность мощности 2,0 ГВт/м². Фронт плазменной струи нагревал поверхность образца до температуры плавления, а конденсированные частицы формировали на ней покрытие. При указанных параметрах воздействия толщина покрытия составляла ≈ 50 мкм. Исследование элементного состава и морфологии структуры поверхности и поперечного шлифа покрытия осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор LEO EVO 50 фирмы Zeiss, Германия). Состояние дефектной субструктуры покрытия изучали методами просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг (прибор JEM 2100F JEOL). Фазовый состав и состояние кристаллической решетки покрытия изучали методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000). Физико-механические и трибологические свойства покрытия характеризовали твердостью, модулем Юнга, параметром износа и коэффициентом трения. Трибологические испытания проводили на приборе TRIBOtester (фирма TRIBOtechnic, Франция). Схема испытаний: «диск-палец»; условия испытаний: нагрузка на индентор 8 Н, скорость вращения образца 25 мм/с, длина пути испытания 30 м, радиус трека 2 мм, индентор шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, испытания проводили при комнатной температуре.

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры и элементного состава поперечного шлифа системы «покрытие/подложка» сформированной электровзрывным методом. По морфологии структуры и контрасту травления формирующееся покрытие можно условно разделить на два подслоя. Вблизи границы раздела подслоя №1 имеет столбчатое строение; подслоя №2 – дендритное строение. Можно предположить, что подслоя №2 был сформирован в результате плавления и последующей скоростной кристаллизации поверхностного слоя подложки (сплав на основе титана), иницированным налетающим потоком плазмы, образовавшейся в результате электрического взрыва титановой фольги с расплавленным на ней порошком циркония. Подслоя №1 является собственно покрытием системы Ti-Zr.

Элементный состав покрытия анализировали методами микрорентгеноспектрального анализа. Микрорентгеноспектральный анализ элементного состава по точкам выявил присутствие, наряду с атомами титана и циркония, атомов других элементов. Наряду с элементами, характерными для сплава на основе титана, в покрытии присутствуют атомы углерода и кислорода. Характерно, что атомы углерода выявлены исключительно в поверхностном слое, а атомы кислорода присутствуют по всей глубине покрытия. Основываясь на результатах элементного анализа можно предположить, что сформированное покрытие является многофазным и должно содержать, наряду со сплавом Ti-Zr, карбидные и оксидные фазы.

Фазовый состав поверхностного слоя покрытия изучали методами рентгеноструктурного анализа. Выполненные исследования выявили присутствие в поверхностном слое покрытия трех фаз: основной является α-модификация сплава TiZr (81,3 объемных %), в существенно меньшем объеме присутствуют оксид циркония ZrO (9,5 объемных %) и карбид титана TiC (9,2 объемных %). Таким образом, полученные методом рентгенофазового анализа результаты хорошо согласуются с

результатами микрорентгеноспектрального анализа. Присутствие в поверхностном слое покрытия оксидной и карбидной фаз обусловлено, очевидно, техническим вакуумом рабочей камеры установки электровзрывного легирования и применением графитового электрода.

Дефектную субструктуру покрытия исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг. Фольги готовили методами ионного распыления пластинок, вырезанных из объема образца в поперечном сечении покрытия. Такое расположение фольги позволяло провести анализ структуры материала на различном расстоянии от поверхности покрытия. Слой, формирующий поверхность покрытия, имеет нанокристаллическую структуру, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от 20 нм до 100 нм. Нижележащий слой толщиной до 30 мкм имеет субмикроструктурную структуру. Размер кристаллитов, формирующих данный подслой изменяется в пределах от 200 нм до 450 нм. Слой, расположенный на большем удалении от поверхности покрытия, имеет бимодальную структуру. Наряду с кристаллитами, размеры которых изменяются в пределах 200-300 нм, присутствуют кристаллиты, размеры которых составляют десятки нанометров. По мере приближения к зоне контакта покрытия с подложкой относительное содержание наноразмерных кристаллитов увеличивается. Можно предположить, основываясь на результатах микрорентгеноспектрального анализа элементного состава покрытия, что наноразмерные кристаллиты являются окисными фазами на основе титана и циркония.

Физико-механические и трибологические свойства сформированного покрытия характеризовали, определяя твердость, модуль Юнга, параметр износа (величина, противоположная, износостойкости материала) и коэффициент трения. Для электровзрывного покрытия Ti-Zr параметр износа составил $5,5 \cdot 10^{-4}$, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, коэффициент трения 0,572, твердость $3730 \pm 0,495$ МПа, модуль Юнга $73,8 \pm 6,19$ ГПа. Для образца без покрытия параметр износа составил $6,5 \cdot 10^{-4}$, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, коэффициент трения 0,376, твердость 3630 ± 260 МПа, модуль Юнга $84,3 \pm 7,62$ ГПа. Формирование покрытия состава Ti-Zr сопровождается незначительным (на 18 %) снижением параметра износа (повышением износостойкости) поверхностного слоя, повышением коэффициента трения в 1,5 раза, незначительным (на 3%) повышением твердости и снижением модуля Юнга на 14 %.

Таким образом, электровзрывным методом на поверхности дентального имплантата из сплава на основе титана сформировано покрытие состава Ti-Zr толщиной не менее 50 мкм. Установлено, что покрытие является многоэлементным и многофазным. Показано, что наряду с твердым раствором на основе Ti-Zr, в покрытии присутствуют карбидная и оксидная фазы. Обнаружено, что покрытие, сформированное электровзрывным методом, обладает субмикронанокристаллической структурой. Выявлено, что формирование покрытия состава TiZr сопровождается (относительно подложки без покрытия) незначительным (на 18 %) снижением параметра износа (повышением износостойкости) поверхностного слоя, повышением коэффициента трения в 1,5 раза, незначительным (на 3%) повышением твердости и снижением модуля Юнга на 14 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00075 мол_а.