УДК 621.793.182

АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Д. А. ШПАНОВ[1, 2], Н. А. ПРОКОПЕНКО[1], Е. А. ПЕТРИКОВА[1],
Ю. Ф. ИВАНОВ[1], М. С. ВОРОБЬЁВ[1,2], М. С. ПЕТЮКЕВИЧ[1, 2], Н. Н. КОВАЛЬ[1]
[1]Институт сильноточной электроники СО РАН
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия

Создание на поверхности медико-технических изделий из титановых сплавов, имплантируемых в костную ткань, высокопрочного покрытия на основе оксидов металлов, обладающих биосовместимыми качествами, устраняет проблемы низкого сопротивления царапанию и износу [1], а также интоксикации окружающих тканей алюминием, ванадием, молибденом [2]. Надежное сцепление покрытия с подложкой является определяющим условием долговременной эксплуатации изделий.

Целью работы является исследование структуры и адгезионных свойств систем «пленка (TiO_2)/(ВТ6) подложка», «пленка (ZrO_2)/(ВТ6) подложка», сформированных вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом.

Нанесение оксидных покрытий на пластинки сплава ВТ6 размерами 15 × 15 × 10 мм^3 проводили на ионно-плазменной установке «КВИНТА», разработанной в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН [3]. Нанесение TiO_2 или ZrO_2 покрытия толщиной 3 мкм осуществляли при токе разряда плазменного источника с накаленным катодом (ПИНК) I_p, равном 0, 90 и 130 А, и неизменных значениях тока разряда распыляемого катода I_k = 70 А, соотношения концентрации аргона и кислорода в рабочей камере установки Ar/O_2 = 5/95, давления газа в рабочей камере установки p = 0,3 Па, напряжения смещения $U_{см}$ = 35 В (для TiO_2) и $U_{см}$ = 175 В (для ZrO_2).

Для количественной оценки параметров адгезии использовали методы сдвига пленки относительно подложки [4], применяя метод царапания (scratch-test, установка Макро скретч-тестер Revetest RST (CSM Instruments, SA, Швейцария)). Радиус закругления индентором Роквелла 200 мкм, длина царапины 5 мм, линейно возрастающая нагрузка на индентор в диапазоне от 0,5 до 30 Н. Сбор данных о нормальной силе нагружения F_H, силе трения $F_{тр}$, глубине погружения F_d индентора в материал, величине акустической эмиссии A_e осуществлялось при 5000 изм./с. Исследования адгезии покрытий проводили на каждом образце по трем дорожкам при комнатной температуре и влажности 45 %. Критическая нормальная сила (при которой появляются первые разрушения покрытия) определена по резкому изменению глубины внедрения индентора за счет его попадания в трещину или на отколовшуюся часть покрытия и соответствующего этому моменту всплеску величины акустической эмиссии (рис. 1).

а) *б*)

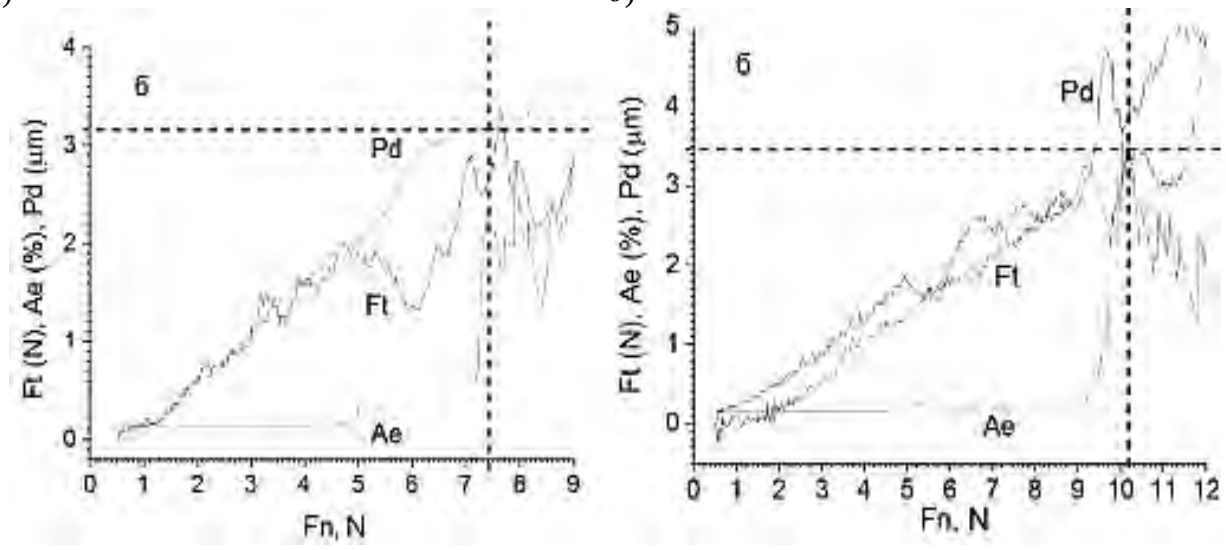

Рис. 1. Зависимость от нагрузки на индентор F_n силы трения F_t, глубины погружения индентора P_d и акустической эмиссии A_e при адгезионных испытаниях пленки TiO_2 (*а*), ZrO_2 (*б*)

Установлено, что покрытия содержат частицы капельной фракции, характеристики которой зависят от тока разряда генератора плазмы.

Критическая нагрузка, при которой наблюдается разрушение (отслаивание) пленки от подложки в системе «пленка (ZrO_2)/(ВТ6) подложка» максимальна при I_p = 0 А и минимальна при I_p = 90 А. Для системы «пленка (TiO_2)/(ВТ6) подложка» ситуация обратная: максимальная величина критической силы нагрузки наблюдается при I_p = 130 А и минимальная – при I_p = 0 А.

Выполненные исследования позволяют подобрать режим формирования оксидных покрытий на титановом сплаве ВТ6, при котором реализуются наиболее высокие значения критической силы нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (*проект № 24-69-00074*).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фомин, А. А.** Научные основы термических процессов получения оксидных покрытий на титановых медицинских изделиях с применением токов высокой частоты: дис. … д-ра техн. наук: 05.09.10; 05.16.01 / Фомин Александр Александрович. – Саратов, 2017. – 421 л.

2. Preparation of TiO2 layers on cp-Ti and Ti6Al4V by thermal and anodic oxidation and by sol-gel coating techniques and their characterization / D. Velten [et al.] // J. Biomed. Mat. Res. – 2002. – Vol. 59, № 11. – P. 18–28.

3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Ю. А. Денисова [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Коваля, Ю. Ф. Иванова. – Томск: НТЛ, 2016. – 304 с. : ил.

4. **Тополянский, П. А.** Адгезионные характеристики тонкопленочного покрытия, осаждаемого при финишном плазменном упрочнении / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков, А. П. Тополянский // Воронежский научно-технический вестник. – 2021. – Т. 3, № 37. – С. 11–27.