

# ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ И АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

А.М. Борисов<sup>1</sup>, Л.А.Жиляков<sup>2</sup>, К.Е. Кирикова<sup>1</sup>, Л.С.Новиков<sup>2</sup>, В.Н.Черник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*«МАТИ»-Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ*  
E-mail: anatoly\_borisov@mail.ru

В околоземном космическом пространстве на материалы внешней поверхности космических аппаратов (КА) действуют различные виды излучений, состав и плотность которых зависят от орбиты объекта. Терморегулирование КА с помощью керамических, композиционных и лакокрасочных покрытий осуществляется подбором соответствующих коэффициентов отражения и испускания излучения обращенных в космос поверхностей. При воздействии факторов космического пространства эти коэффициенты в идеале должны оставаться неизменными, но воздействие излучений приводит к уменьшению коэффициента отражения защитных покрытий, что, в конечном счете, уменьшает срок нормального функционирования аппаратов.

Радиационные воздействия обусловлены облучением материалов КА электронами и ионами с энергией выше  $\sim 10^5$ – $10^6$  эВ, вызывая в объеме вещества ионизацию атомов, формирование локальных электрических зарядов, образование дефектов, ядерные превращения и другие процессы. Радиационными эффектами называют любые изменения структуры, свойств и состояний материала, вызванные действием излучения [1].

В настоящей работе осуществлялись имитационные испытания воздействия факторов космического пространства на свойства покрытий, полученных методом микродугового оксидирования (МДО) [2]. Эксперименты проводили для условий длительного воздействия протонами энергии 500 кэВ и потока атомарного кислорода со средней энергией 30 эВ. Сравнительным методом исследовали влияние указанных факторов на морфологию, отражательные и механические свойства МДО-покрытий. В экспериментах также использовали образец с терморегулирующим лакокрасочным покрытием ЭКОМ-1, имеющим коэффициент отражения солнечного излучения 0,4 [3].

Характеристика образцов МДО-покрытий на алюминиевых сплавах АМг5 и Д16 и виды испытаний приведены в таблице 1. Образцы изготовлены в виде шайб диаметром 20 мм и толщиной 5 мм. МДО проводили при равном

отношении катодного и анодного токов.

Для исследования отражающих свойств МДО-покрытий в диапазоне длин волн 340-1000 нм использовали методику, описанную в работе [3]. Измеряли спектральный апертурный коэффициент отражения, который представляет собой отношение излучения, отраженного от поверхности образца в определенных направлениях, к излучению, отраженному в тех же направлениях эталоном.

Таблица 1

Образец	Сплав	Концентрация компонентов электролита, г/л		Время обработки, мин	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>	Вид воздействия
		NaOH	Жидкое стекло			
1	АМг5	1,5	7	180	11	500 кэВ Н <sup>+</sup>
4 (белый)	АМг5	2	7	180	11	500 кэВ Н <sup>+</sup>
7	АМг5	2	7	420	6,5	Ат. кислород
4 (серый)	Д16	1,5	9	20	10	Ат. кислород

Спектральный коэффициент отражения (СКО)  $\beta_\lambda$  получали относительно ЭКОМ-1 или эталона MgO усреднением по горизонтальному участку кривой спектрального апертурного коэффициента отражения (в интервале длин волн от 400 до 650 нм). Ранее [3] было найдено, что спектральная отражательная способность покрытия ЭКОМ-1 в коротковолновой области имеет минимум при длинах волн 340-390 нм, а МДО-покрытия, хотя и имеют меньшие СКО, чем ЭКОМ-1, сохраняют свои отражательные свойства во всем оптическом диапазоне.

**Облучение протонами с энергией 500 кэВ** проводили на каскадном генераторе КГ-500 НИИЯФ МГУ с флюенсом  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> при плотности потока  $6 \cdot 10^{12}$  ион/с·см<sup>2</sup>. Для сравнительных исследований половину облучаемой поверхности образцов закрывали алюминиевой фольгой, непроницаемой для протонов.

Оценено влияние облучения протонами на отражательные характеристики нешлифованных (рис. 1) и шлифованных поверхностей МДО-покрытий и покрытия ЭКОМ-1 (рис. 2). Сравнение данных говорит о существенном потемнении поверхности образцов всех материалов в результате протонного облучения. Для нешлифованных МДО-покрытий до облучения  $\beta_\lambda(1) = 0,47$  и  $\beta_\lambda(4) = 0,61$  соответственно для образцов №1 и №4. Облучение протонами приводит к уменьшению  $\beta_\lambda(1) = 0,33$  и  $\beta_\lambda(4) = 0,54$  на, соответственно, 0,14 и 0,07. Для шлифованных МДО-покрытий до облучения  $\beta_\lambda(1) = 0,42$  и  $\beta_\lambda(4) = 0,35$ . После облучения отражение снизилось на 0,1 и 0,07 соответственно.

В целом, МДО-покрытия являются более стойкими в отношении воздействия протонов на их отражающие свойства по сравнению с используемым на практике терморегулирующим покрытием ЭКОМ-1. Облучение протонами покрытия ЭКОМ-1 приводит к общему существенному уменьшению его спектрального коэффициента отражения, т.е. к окрашиванию

(потемнению) покрытия. До облучения  $\beta_\lambda = 0,96$ . После облучения  $\beta_\lambda$  снижается до 0,34; т.е на 0,62. При этом спектральный коэффициент отражения изменяется на 0,37.

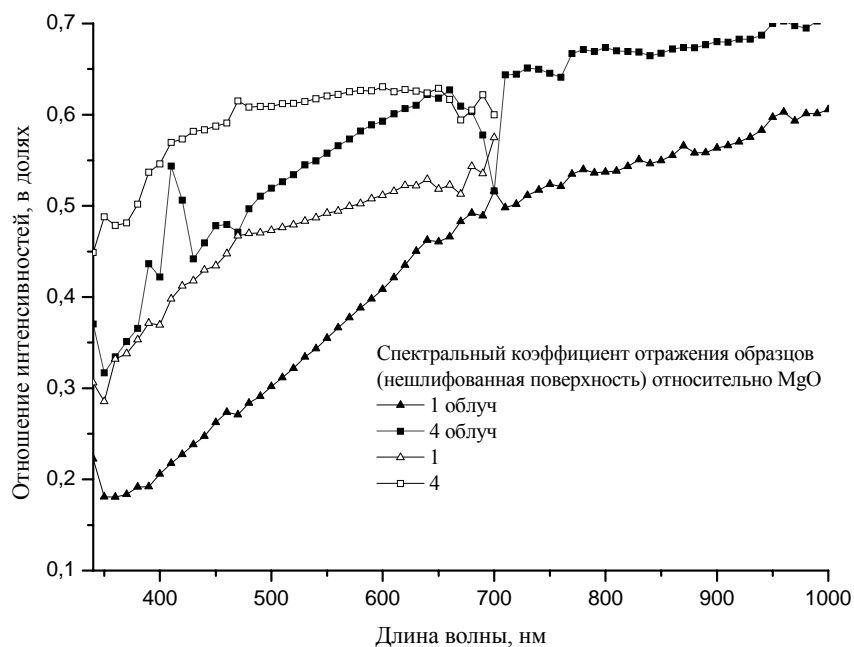


Рис. 1. Спектральный коэффициент отражения нешлифованными МДО-покрытиями относительно MgO

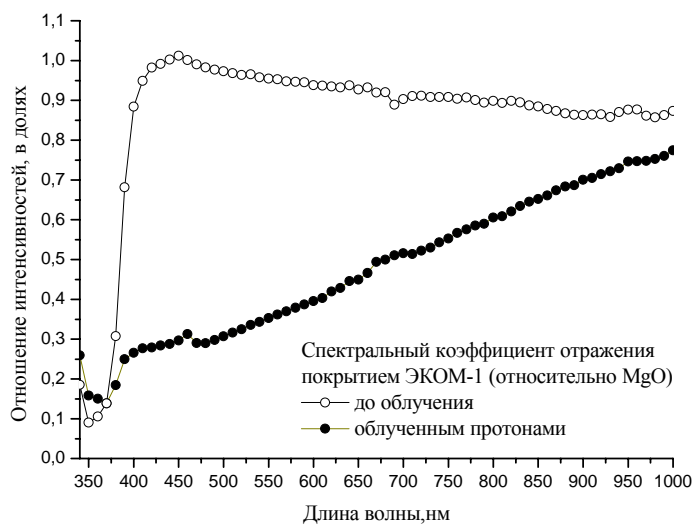


Рис. 2. Спектральный коэффициент отражения покрытием ЭКОМ-1 относительно MgO

Согласно [1], именно протоны оказывают наибольшее радиационное воздействие на терморегулирующие белые эмали. При этом изменение рельефа приводит только к изменению зеркальной составляющей, а изменение структуры и состава вещества в поверхностном слое – к изменению как зеркальной, так и диффузной составляющих зондирующего излучения, отраженного поверхностью. Из рис. 1 и 2 видно, как изменяется характер диффузной составляющей отраженного от шероховатых поверхностей света: она приобретает практически линейную зависимость от длины волны, причем отражение возрастает с ростом длины волны. Для шлифованных МДО-образцов изменения характера кривой не наблюдалось.

Оценку глубины модифицирования МДО-покрытий проводили с помощью компьютерной программы SRIM [4]. Глубина пробега протонов с энергией 500 кэВ, рассчитанная для мишени, состоящей из  $Al_2O_3$ , составляет  $R_p=3,5$  мкм с разбросом  $\Delta R_p=0,2$  мкм.

Проведен анализ влияния радиационного воздействия на микротвердость облученных протонами МДО-покрытий. Микротвердость по Виккерсу определяли на металлографическом комплексе LEITZ Metalloplan (при вдавлении пирамидки с нагрузкой 2Н и временем выдержки 10 с). Сопоставление полученных результатов говорит о практическом отсутствии влияния облучения протонами на микротвердость покрытий, высокие значения которой для МДО-покрытий ( $1100\pm 200$  HV) являются одним из преимуществ этих композиционных керамических материалов.

На низких околоземных орбитах одним из важнейших механизмов повреждения материалов поверхности КА является их эрозия под действием химически активного атомарного кислорода.

**Облучение потоком атомарного кислорода** проводили на имитационном стенде с магнитоплазодинамическим ускорителем кислородной плазмы [5]. Эквивалентный флюенс в описываемых экспериментах с энергией атомов кислорода 30 эВ составлял  $4,3 \cdot 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup>, что соответствует фактическому флюенсу  $0,72 \cdot 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup> [1].

Результаты измерения СКО показали, что облучение кислородом несколько увеличило спектральное отражение (на 0,02 для образца МДО-покрытия на сплаве АМг5). Этот, так называемый эффект отбеливания, небольшой и может быть связан с эрозией поверхности. Для образца покрытия на сплаве Д16 эффект отбеливания еще меньше.

Взвешивание образцов проводили на аналитических весах АДВ-200 с ценой деления 0,1 мг вне камеры до и после облучения. Полученные данные по потере массы позволяют оценить коэффициент распыления МДО-покрытий, как отношение среднего числа удаленных атомов к числу упавших на поверхность атомов кислорода. Коэффициенты распыления для двух образцов МДО-покрытий (расчет для  $Al_2O_3$ ) приблизительно одного порядка величины и составляют 0,05 ат./ат.кислорода.

Моделирование распыления  $\alpha-Al_2O_3$  атомами кислорода с энергиями 20 – 50 эВ показывает, что экспериментально наблюдаемое распыление может

быть обусловлено физическим, столкновительным механизмом распыления твердых тел бомбардировкой быстрыми частицами.

Экспериментально найденная эрозия МДО-покрытий под действием потока атомарного кислорода является незначительной по сравнению с эрозией многих углеродных и полимерных композиционных материалов, применяемых на внешней стороне космических аппаратов.

Изучение поверхностей МДО-покрытий с помощью оптического микроскопа Axiostar Plus также не выявило изменений в морфологии поверхности.

Можно предположить, что совместное (синергетическое) воздействие факторов космического пространства, а именно облучение протонами и атомарным кислородом приведет к уменьшению эффекта потемнения поверхности.

Работа выполнена в рамках госконтракта №02.740.11.0389 и деятельности научно-образовательного центра «Технологии и исследования наноматериалов аэрокосмической техники» НИИЯФ МГУ.

1. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космической техники. М.: Университетская книга, 2010. - 192 с.
2. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Под общей ред. И.В.Суминова. В 2-х томах. Т.2. М.: Техносфера, 2011.- 512 с.
3. Борисов А.М., Кирикова К.Е., Суминов И.В. Светотехнические свойства керамикоподобных покрытий на алюминиевых сплавах // Физика и химия обработки материалов. 2011, №2, с.42-45.
4. [www.srim.org](http://www.srim.org)
5. Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н. Воздействие на материалы и элементы оборудования космических аппаратов вакуума, частиц ионосферной плазмы и солнечного ультрафиолетового излучения. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. т.17. Под ред. Касаева К.С., Новикова Л.С., Панасюка М.И., М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2000, с.100-138.