

4. Carlos N.E., Yoshiki O., José Henrique C.L. Carlos A.M. Relationship between surface properties (roughness, wettability and morphology) of titanium and dental implant removal torque // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. – 2008. – Vol. 1. – 234–242.
5. Dauphin-Ducharme P., Mauzeroll J. Surface Analytical Methods Applied to Magnesium // Corrosion Analytical Chemistry. – 2015. – Vol. 87. – С. 499–509.

**ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ГИПЕРСКОРОСТНЫМИ МИКРОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗА
НА СВЕТОПРОПУСКАНИЕ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ
In-Sn-O В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Р.Б.ТУРСУНХАНОВА^{1,2}, В.П.СЕРГЕЕВ^{1,2}, О.В.СЕРГЕЕВ¹, В.В.НЕЙФЕЛЬД¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: rbt1@tpu.ru

Иллюминаторы космических аппаратов (КА) обычно изготавливаются из кварцевого стекла. Кварцевое стекло имеет очень низкую степень защиты от ультрафиолетового (УФ) излучения и пропускает через себя все длины волн в УФ диапазоне [1]. Факторы космической среды, включающие глубокий вакуум, резкие перепады температур, ионизирующее излучение, ультрафиолетовое излучение, бомбардировку частицами космического мусора и микрометеороидами, оказывают негативное влияние на ресурс работы КА. Перспективным способом защиты КА от высокоэнергетических излучений, в частности, от ультрафиолетового излучения является нанесение оптических прозрачных в видимой области тонких пленок на поверхность стекол иллюминаторов, которые эффективно поглощают ультрафиолетовый свет. Вместе с тем, спектральные диапазоны излучения, которые должны пропускаться материалом покрытия, необходимо экспериментально подбирать в зависимости от типа и назначения оптических систем. Например, авторы работы [2] провели сравнение оптических свойств УФ отражающей пленки и покрытия Ta₂O₅, осаждённого на кварцевые подложки с помощью электронного пучка. Было выявлено, что оба типа покрытий обладают превосходной поглощательной способностью к УФ излучению в вакууме, поэтому могут быть рекомендованы для применения в космосе. Ранее, в статье [3] была показана целесообразность использования просветляющих широкополосных многослойных покрытий, нанесенных на крышки солнечных элементов и испытательные подложки, для поглощения УФ излучения в имитируемых космических условиях на Международной космической станции Experiment-7 (MISSE-7). Однако в условиях космоса оптические системы непрерывно подвергаются бомбардировке высокоскоростными метеороидами и частицами космического мусора. При этом защитные покрытия подвергаются локальным повреждениям в результате ударов, так что происходит деградация их защитных свойств. Долговечность работы оптических систем КА в условиях космической среды может быть повышена путем нанесения тонких покрытий на стекла иллюминаторов, которые одновременно защищают стекло от микроразрушений при ударах микрочастиц и экипаж КА от ультрафиолетового излучения. Ранее показано [4], что защитная способность пленок на основе In-Sn-O является достаточно эффективной от ударов высокоскоростных микрочастиц.

Цель работы – оценить величину светопропускания защитных покрытий In-Sn-O в УФ диапазоне как до, так и после ударного воздействия высокоскоростными микрочастицами, моделирующего бомбардировку потоками метеороидов и микрочастиц космического мусора поверхности кварцевого стекла.

Покрытие на основе In-Sn-O было получено методом импульсного магнетронного осаждения с использованием металлических мишеней из сплава индия с 7,5 вес.% олова диаметром 120 мм. Формирование покрытий на поверхности подложек из кварцевого стекла марки «КВ» размером 27×12×4,5 мм осуществлялось в среде из смеси газов аргона и кислорода. Углеродные загрязнения с поверхности образцов перед осаждением покрытий были удалены с помощью ультразвуковой ванны и ионно-плазменного метода очистки в смеси газов (Ar+O₂). Толщина покрытий составляла ~6 мкм. После окончания процесса осаждения образцы с покрытием подвергались отжигу при атмосферном давлении в электропечи в течение 2 часов при температуре 673 ± 10 К.

Элементный состав покрытий определяли методом энергодисперсионного анализа (ЭДС) на спектрометре Octane Elect Super (EDAX, США), являющемся приставкой к сканирующему электронному микроскопу (СЭМ) Apreo 2 S LoVac (Thermo Fisher Scientific, США). Экспериментальные испытания на ударную стойкость образцов из кварцевого стекла без покрытия и с покрытием In-Sn-O проводили с помощью двухступенчатой легкогазовой пушки МПХ23/8 путем обстрела потоком сферических микрочастиц железа, движущихся со скоростью 5 – 8 км/с [4]. При обстреле общее количество образцов в контрольных группах (кварцевое стекло без покрытия, кварцевое стекло с покрытием) было одинаковым, а эксперимент по бомбардировке микрочастицами железа осуществлялся одновременно для обеих контрольных групп. Для получения спектров оптического пропускания образцов из кварцевого стекла без покрытия и защитными покрытиями In-Sn-O в интервале длин волн 200-400 нм использовался спектрофотометр УФ-6100 (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd, China). Методам ЭДС/СЭМ установлено, что покрытие имеет следующий элементный состав: In-31,6 ат. %, Sn-2,27 ат. %, O-66,1 ат. %.

В результате проведенных испытаний выявлено, что после бомбардировки высокоскоростным потоком микрочастиц железа на поверхности исходного кварцевого стекла образуются кратеры, а их общее количество, нормированное на площадь образца, составляет n=284. При тех же условиях испытаний обстрел образца с покрытием In-Sn-O приводит к образованию на поверхности стекла меньшего количества кратеров (n=88), а отношение поверхностной плотности кратеров ρ в сравнении с исходным стеклом составляет $\rho_0/\rho_6 \approx 3,3$.

Значения коэффициента оптического светопропускания исходных стекол до и после бомбардировки потоком высокоскоростных микрочастиц железа показаны на рисунке 1. Средняя величина коэффициента оптического светопропускания (Т), определенная по спектрам пропускания для исходного кварцевого стекла без покрытия в УФ диапазоне длин волн (200–350 нм), составляет ~91,7 %, после бомбардировки ~89,8 %, таблица 1.



Рисунок 1 - Коэффициент оптического светопропускания исходного стекла КВ: до бомбардировки (а) и после бомбардировки (б)

Таким образом, в образцах кварцевого стекла без защитного покрытия после бомбардировки микрочастицами железа происходит значимое изменение спектров пропускания света, приводящее к понижению среднего значения коэффициента пропускания света в ультрафиолетовой области на ≈ 2 %.

Таблица 1 – Значения коэффициента оптического светопропускания (Т) в УФ области образцов исходного стекла и стекла с защитным покрытием In-Sn-O до и после обстрела высокоскоростным потоком микрочастиц железа

Образец	Т (%) в интервале длин волн от 200 до 350 нм	
	до бомбардировки	после бомбардировки
Исходное стекло КВ	91,7 ± 0,3	89,8 ± 0,3
Стекло с покрытием In-Sn-O	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,2

При нанесении покрытия In-Sn-O на кварцевое стекло коэффициент светопропускания в УФ диапазоне значительно понижается, так что средняя величина Т в пределах длин волн от 200 до 350 нм уменьшается до ~0,1 %, таблица 1. Практически полная задержка ультрафиолетового излучения покрытием толщиной 6 мкм обусловлена оптическими свойствами материала In-Sn-O в ультрафиолетовой области [5]. После бомбардировки потоком высокоскоростных микрочастиц железа наблюдается изменение спектра кварцевых образцов с покрытием в сторону повышения средней величины коэффициента светопропускания Т до ~0,3 %, таблица 1.



Рисунок 2 - Коэффициент оптического светопропускания стекол с защитным покрытием In-Sn-O до (а) и после бомбардировки потоком высокоскоростных микрочастиц железа (б)

Анализ механизма, обеспечивающего повышение коэффициента светопропускания кварцевых стекол после бомбардировки высокоскоростными частицами, показал, что одной из вероятных причин такого эффекта может являться образование на поверхности образцов большого количества кратеров. В месте образования кратеров происходит локальное отслоение и удаление покрытия, так что поверхность стекла частично освобождается от покрытия, и, таким образом, частично пропускает ультрафиолетовое излучение, что мы наблюдаем по изменению спектра, рисунок 2 и таблица 1.

Таким образом, в данной работе на подложке из кварцевого стекла было синтезировано покрытие на основе In-Sn-O методом импульсного магнетронного распыления. Изучение светопропускания исследуемых стекол показало, что нанесение тонкого (~6 мкм) защитного покрытия приводит к значительному уменьшению на 99,9 % коэффициента светопропускания Т в УФ области, что может быть использовано для практического применения указанных покрытий в качестве защитных от ультрафиолетового излучения. После бомбардировки потоком высокоскоростных микрочастиц железа происходит небольшое возрастание величины Т на ~0,2 %. Это связано с локальным отслоением и удалением покрытия в результате образования кратеров в местах удара высокоскоростных частиц, через которые начинает частично проходить ультрафиолетовое излучение.

Исследование выполнено в рамках программ развития Томского политехнического университета и фундаментальных научных исследований ИФПМ СО РАН (FWRW-2021–0003).

Список литературы

1. Adothu B., Bhatt P., Zele S. et al. Investigation of newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant principle properties for the c-Si PV module application // Materials Chemistry and

- Physics. – 2020. – Vol. 243. – P. 122660. Doi:10.1016/j.matchemphys.2020.122660.
2. Xu L., He Y., Li K. et al. Optical properties of Ta₂O₅ single layer and ultraviolet reflective film under ultraviolet irradiation // Optoelectronics Letters. – 2021. – Vol. 17. – P. 464–467. Doi:10.1007/s11801-021-0157-8.
3. Pellicori S.F., Martinez C.L., Hausgen P. et al. Development and testing of coatings for orbital space radiation environments // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53. – P. A339-A369. Doi:10.1364/ao.53.00a339.
4. Tursunkhanova R.B., Sergeev V.P., Kalashnikov M.P., Sergeev O.V., Neufeld V.V. The effect of indium–tin oxide coatings on the formation of craters on glass surfaces under the impact of high-velocity microparticles // Acta Astronautica. –2023. – Vol.204. – P.863 - 868. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.047
5. Тамбасов И.А. Тонкие In₂O₃, Fe–In₂O₃ и Fe₂O₃–ZnO пленки, полученные твердофазными реакциями: структурные, оптические, электрические и магнитные свойства. Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук, г. Красноярск, изд-во ФГБУН Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 2014 г., с. 116.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ АКРИЛОВОГО ЛАКА И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

И.Н.ШЕВЧЕНКО, ЛИ ХАОНАНЬ, Г.В.ЛЯМИНА

Томский политехнический университет

E-mail: ins16@tpu.ru

Нанесение защитных полимерных покрытий является одним из наиболее эффективных и простых способов защиты металлов от коррозии. На характеристики органических полимерных покрытий часто влияет присущая им пористость, обеспечивающая проницаемость для коррозионно-активных веществ и снижению механических свойств. Нивелировать данный эффект можно посредством использования в качестве армирующий антикоррозионной добавки наночастиц (НЧ) металлов и их соединений. НЧ в качестве наполнителя снижают проницаемость полимерного покрытия для агрессивных сред и увеличивают гидрофобности покрытия [1].

Одной из популярных органических основ для получения антикоррозионного полимерного покрытия является акриловый лак (АЛ) [2-4]. В качестве армирующей добавки увеличивающей барьерные свойства покрытия хорошо зарекомендовали себя наночастицы оксида цинка (ZnO) [5, 6].

Так как использование наночастиц в антикоррозионных составах зачастую меняет механизм электрохимических процессов, в качестве метода оценки эффективности ингибитора использовали метод электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС). ЭИС успешно используется в области контроля коррозии благодаря широкому спектру получаемой информации о электрохимической кинетике на границах раздела электрод-среда, что позволяет определять механизм и скорость диффузии агрессивной среды к защищаемому материалу [7].

Целью работы была оценка эффективности полимерного покрытия на основе акрилового лака с добавкой НЧ ZnO в качестве антикоррозионного покрытия методом электрохимической импедансной спектроскопии.

В работе были использованы наночастицы оксида цинка, полученные на установке Nanospray Drying B-90 из суспензий гидроксида цинка. Суспензии гидроксида цинка получали методом химического осаждения из 1 М растворов ZnO(NO₃)₂ при помощи гидроксида натрия. Далее