

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИООТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОБРАЗЦАХ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФЕРНОГО ФОРМОВАНИЯ**А. Е. Михеев¹, А. А. Черныatina², И. В. Евкин², А. Ю. Власов¹, В. А. Мартынов¹¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: michla@mail.ru²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорож Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Описана технология изготовления образцов композиционных материалов для последующего нанесения радиоотражающих покрытий. Образцы изготавливались методом трансферного формования с использованием специально разработанной технологической оснастки. Образцы изготавливались с двумя типами связующих: холодного и горячего отверждения. Радиоотражающее покрытие было выполнено в виде многослойной композиции на основе алюминия с адгезионным подслоем из никрома и защитным слоем из оксида кремния. Покрытие наносили методом магнетронного напыления в вакууме. На полученных покрытиях были измерены коэффициенты радиоотражения. Выявлено, что при частоте 24 ГГц коэффициенты радиоотражения образцов всех типов соответствуют предъявляемым требованиям и составляют около 0,98. Однако при увеличении частоты излучения коэффициенты составляют около 0,95, что является недостаточным для применения в рефлекторах антенн КА. Для выявления причин ухудшения характеристик покрытий были проведены измерения параметров газовой выделенности исходных образцов углепластиков и шероховатости поверхности образцов с радиоотражающим покрытием. Параметры газовой выделенности соответствуют требованиям, которые предъявляются к покрытиям данного класса. Шероховатость радиоотражающего покрытия на углепластике составляет $R_a = 363,8$ нм при допустимой шероховатости для 33 ГГц – 600 мкм. Также были измерены терморadiационные характеристики полученных покрытий. Измерения показали, что коэффициент поглощения солнечной радиации A_s несколько завышен по сравнению с требованиями к данному классу покрытий, а коэффициент излучения E_n соответствует этим требованиям. Выявлено, что для обеспечения заданных параметров покрытия необходимо проведение операций по предварительной подготовке углепластика: очистка поверхности от следов антиадгезива, увеличение продолжительности обезгаживания углепластика перед напылением, снижение интенсивности в процессе напыления.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, радиоотражающие покрытия, вакуумное нанесение покрытий.

**SPECIFICATIONS OF RADIO-REFLECTIVE COATING ON A SAMPLE
OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS, FABRICATED WITH TRANSFER MOLDING**А. Е. Miheev¹, А. А. Chernyatina², I. V. Evkin², А. Y. Vlasov¹, V. A. Martunov¹¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: michla@mail.ruJSC “Information Satellite Systems” named after Academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

The technique for preparing samples of composite materials for the subsequent application of radio-reflective coatings is described. The samples were fabricated by transfer molding using a specially developed industrial equipment. Samples were made with two types of binding: cold and hot curing. Radio-reflective coating was formed as a multilayer compositions based on alumina with an adhesive underlayer of nickel-chromium and the protective layer of silicon oxide. The coating was applied by magnetron sputtering in a vacuum. On the obtained coatings coefficients of

radio reflection were measured. It was revealed that at 24 GHz radio reflection coefficients of both types of samples meet the requirements and is about 0,98. However, when the frequency of the radiation coefficients are about 0,95, which is insufficient for use in spacecraft antenna reflectors. To identify the causes of degradation of coatings were measured options gassing initial samples of carbon plastics and surface roughness of the samples with radio-reflective coating. Parameters of gassing compliant coatings that apply to this class are given. The roughness of the radio-reflective coating on carbon plastics is $Ra = 363,8$ nm with allowable roughness to 33 GHz – 600 microns is shown. Also thermoradiation characteristics resulting coating were measured. Measurements have shown the absorption coefficient of solar radiation of As somewhat high compared with the requirements of this class of coatings and emissivity En comply with these requirements. The work revealed that in order to set parameters coating is necessary to conduct operations on the preliminary preparation of carbon fiber: cleaning the surface of traces of release agent, increasing the duration of degassing prior to the deposition of carbon fiber, reducing the intensity during the deposition process.

Keywords: The polymeric composite material, carbon fiber, radio-reflective coating, vacuum coating.

Введение. Развитие рынка спутников требует изготовления антенн, работающих в высокочастотном диапазоне и обеспечивающих высокую скорость передачи данных. Рефлекторы, поддерживающие Ka-диапазон, должны соответствовать ужесточённым техническим характеристикам по отношению к современным рефлекторам S- и Ku-диапазонов [1–3].

Материал, из которого изготавливаются рефлекторы космического назначения, должен обладать рядом необходимых параметров, от которых зависят радиоотражающие, механические и другие характеристики. Таким материалом является углепластик, который обладает высокими прочностными характеристиками, термостойкостью до 150 °C и низким температурным коэффициентом линейного расширения.

Углепластик представляет собой материал из переплетенных нитей углеродных волокон, расположенных в матрице из полимерных смол. Сочетание таких важных свойств, как высокая прочность, жесткость и малый удельный вес, предопределили его широкое распространение во многих сферах. В ракетно-космической технике этот материал стал основой многих конструкций [4]. В направлении армирующих волокон он имеет отрицательное значение коэффициента теплового расширения, и при рациональном проектировании изделия можно добиться практически нулевого температурного коэффициента расширения. Это позволяет избежать значительных тепловых деформаций, увеличивает надежность работы и продлевает срок эксплуатации космического аппарата.

В состав современных космических аппаратов (КА) входят высокоточные рефлекторы антенн диаметром от 0,6 до 3 м. Для повышения эффективности антенно-фидерных систем (АФС) необходимо обеспечить максимальное отражение радиоизлучения рефлекторами антенн. Для этого на поверхность рефлектора наносят радиоотражающее покрытие, коэффициент радиоотражения которого должен быть не менее 0,98, терморadiационные характеристики As не более 0,35, En не более 0,20 [5–10].

Одним из наиболее важных этапов изготовления рефлекторной антенны является придание её внутренней (вогнутой) поверхности высокой способности к отражению электромагнитного излучения в диапазоне 1–33 ГГц. Этот результат достигается осаждением специального покрытия, обладающего высокой электропроводностью, состоящего из слоя металла,

защищенного специальной пленкой из материала, прозрачного для электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот.

При создании радиоотражающего покрытия необходимо учитывать множество факторов, непосредственно влияющих на возможность применения разработанной схемы в конструкции АФС КА, начиная от структуры (изотропности) поверхности углепластиковой подложки, состава, толщины материалов слоев радиоотражающего покрытия, согласования их электрохимических, тепловых, адгезионных, прочностных характеристик и заканчивая стабильностью характеристик покрытий к воздействию факторов хранения и деструктивных факторов космического пространства.

Целью работы является исследование свойств радиоотражающих покрытий, полученных на образцах углепластиков различных вариантов изготовления.

Экспериментальная часть. Для изготовления экспериментальных образцов полимерного композиционного материала (ПКМ) использовалась технология трансферного формования, которая будет применена и для получения рефлекторов антенн КА и позволит отказаться от дорогостоящих методов автоклавного формования. К преимуществам трансферного формования относится возможность получения поверхностей изделия высокого качества, высокая производительность, возможность производства крупногабаритных изделий, снижение себестоимости изготовления изделия при мелкосерийном производстве. Для изготовления экспериментальных образцов была изготовлена специализированная технологическая оснастка, включающая в себя матрицу и пуансон, выполненные из алюминия.

В качестве связующих для изготовления образцов использовались две коммерческие эпоксидные системы с пониженной вязкостью: горячего (образцы под номерами 1, 2 и 4) и холодного (образцы № 3) отверждения.

Для эффективной работы углепластиковых рефлекторов в высокочастотных диапазонах на рабочую поверхность рефлектора необходимо наносить радиоотражающее покрытие. Радиоотражающий слой должен обладать высокой электропроводностью. В качестве такого слоя могут быть использованы металлы Al, Cu, Au и Ag. Характеристики этих металлов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики металлов для радиоотражающего слоя

Металл	Температурный коэффициент линейного расширения, град ⁻¹	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м	Модуль упругости, ГПа	As	En
Алюминий	$24,3 \cdot 10^{-6}$	0,027	70	0,078	0,011
Медь	$16,8 \cdot 10^{-6}$	0,0175	129,5	0,17	0,01
Серебро	$19,5 \cdot 10^{-6}$	0,016	75	0,05	0,01
Золото	$14,2 \cdot 10^{-6}$	0,023	77	0,19	0,011

Таблица 2

Толщина скин-слоя для исследуемых металлов

Металл	Частоты, ГГц		
	15	25	33
Алюминий	0,71 мкм	0,55 мкм	0,48 мкм
Медь	0,54 мкм	0,42 мкм	0,36 мкм
Серебро	0,52 мкм	0,40 мкм	0,35 мкм
Золото	0,62 мкм	0,48 мкм	0,42 мкм

Важным параметром для приведённых выше металлов является толщина скин-слоя, это глубина проникновения электромагнитных волн в толщу материала и их ослабление по мере проникновения. В табл. 2 приведены величины толщины скин-слоёв для Al, Cu, Au и Ag на частотах 15, 25 и 33 ГГц. Значения коэффициентов As и En в этой таблице являются предельными, полученными в процессе вакуумного напыления, в условиях, близких к идеальным.

Среди рассматриваемых металлов алюминий и золото наиболее устойчивы при воздействии промышленной атмосферы. При этом алюминиевые покрытия имеют большую адгезионную прочность и значительно дешевле, чем золотые.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что алюминий является наиболее подходящим материалом для создания радиоотражающих покрытий. Также важно отметить, что алюминиевые покрытия обладают приемлемыми значениями терморadiационных коэффициентов, что важно для рефлекторов космического назначения, подвергающихся циклическому воздействию солнечного излучения.

Однако кроме максимального радиоотражения в требуемом диапазоне частот радиоотражающее покрытие должно также иметь хорошие оптические и механические характеристики, стойкость к коррозии, радиационному воздействию и адгезионную прочность.

Все эти характеристики могут быть достигнуты при создании радиоотражающего покрытия, состоящего из нескольких функциональных слоев.

Нанесение многослойных радиоотражающих покрытий на крупногабаритные конструкции из композиционных материалов относится к более сложным технологиям, чем металлизация моносоставных материалов (полимерных пленок и деталей). Это вызвано тем, что свойства наполнителя и связующего существенно различаются и необходимо согласование характеристик слоев покрытия со свойствами компонентов материала и требованиями к конструкции: точности профиля, допустимым технологическим температурам и др. Для согласования композиционной подложки с радиоотражающим покрытием необходимо при-

менение многослойной структуры покрытия. Первый слой должен иметь высокую адгезию к углепластику, предотвращать электрохимическое взаимодействие углеродных волокон подложки и радиоотражающего слоя (алюминия). Второй слой – из высокоэлектропроводного, стабильного в условиях хранения и эксплуатации материала (например, алюминия), должен обеспечивать заданный коэффициент радиоотражения и терморadiационные коэффициенты, при этом иметь небольшую толщину для минимизации внутренних напряжений и влияния на геометрию рефлектора. Третий слой – защитный, должен иметь высокую твердость и прочность, быть радиопрозрачным и обеспечивать сохранение характеристик слоя алюминия при удалении загрязнений с покрытия, возможных при монтажных работах и хранении рефлектора.

Следовательно, радиоотражающее покрытие будет состоять из трех слоев:

- первый слой – подслой материала, связывающего основной функциональный слой и подложку;
- второй – основной функциональный слой материала, выполняющего функцию радиоотражения;
- третий – защитный слой, защищающий основной слой от механических, коррозионных и прочих повреждений.

Для выбора материала, используемого в качестве подслоя, который наиболее рационально и выгодно использовать с точки зрения приобретения нужных адгезионных и иных технологических свойств, необходимо провести исследования свойств основных материалов, применяемых в качестве адгезионных подслоев. Ниже приведена табл. 3 для оценки материалов подслоя.

В качестве подслоя необходим материал, который бы обладал достаточно высокой степенью адгезии к углепластику, минимальным значением модуля упругости, значением коэффициента линейного термического расширения (КЛТР), промежуточного между КЛТР алюминия и углепластика, малыми величинами электрохимического потенциала относительно углерода и алюминия. Такими материалами могут быть нихром 20Х80Н, цирконий, титан, а также диэлектрики – оксид кремния, оксид алюминия и др.

Таблица 3

Характеристики материалов подслоя

Материал	Электрохимическое взаимодействие компонентов. Потенциал, В, относительно		Коэффициент линейного термического расширения, 10^{-6} град $^{-1}$	Модуль упругости, ГПа	Напряжения на границе с углепластиком, кгс/мм 2 (для $\Delta T = 200$ °C)	Напряжения на границе с алюминием, кгс/мм 2 (для $\Delta T = 200$ °C)
	C (0,15)	Al(-1,66)				
Хром	-0,6	-0,94	6,2	280	36,2	106
Титан	-0,05	-1,56	8,5	96,6	16,6	31
Никель	-0,1	-1,44	16,6	213	71,7	33
Цирконий	-0,15	-1,66	5,9	95	11,3	36
SiO $_2$	0	0	0,5	65,5	0,5	32
Al $_2$ O $_3$	0	0	8,4	241,3	41	78
Нихром	-0,1	-1,44	10	216	43,7	63

Из всех вышеперечисленных вариантов материала подслоя для целей создания стабильных плёнок наилучшим является нихром, так как он отличается высокой адгезией к различным материалам, включая полимеры. Кроме того, большим преимуществом нихрома по сравнению с другими известными сплавами является то, что он распыляется без чрезмерного разделения на отдельные составляющие. Также полезным свойством нихрома является то, что он способен захватывать загрязняющие компоненты остаточного газа при напылении (распылении) радиоотражающего материала (алюминия). Такая хемосорбция способствует улучшению чистоты вакуума и, как следствие, осаждению более чистого радиоотражающего материала поверх нанесённого подслоя.

Высокие адгезионные свойства нихрома могут быть объяснены наличием тонкого оксидного слоя, возникающего между плёнкой и подложкой, а также небольшим предварительным распылением хрома, который обладает более низкой энергией распыления, чем никель. Хорошие результаты по изготовлению механически прочных и стабильных плёнок нихрома даёт магнетронный способ распыления нихрома.

В качестве защиты радиоотражающего покрытия от воздействия коррозии и механических повреждений, а также для обеспечения требуемого коэффициента излучения, целесообразно использовать тонкий слой защитного материала, наносимого непосредственно на слой металла. Такими материалами могут быть оксиды алюминия и кремния, а также кремний-органическое покрытие.

Напыление производили методом магнетронного распыления [11–15] на вакуумной установке на образцы размером 100×100 мм и 35×35 мм.

Для напыления использовали мишени из нихрома Х20Н80 ГОСТ 10994, алюминия чистотой ГОСТ 25905 и оксида кремния.

Результаты и их обсуждение. Коэффициент радиоотражения измеряли волноводным методом с помощью генератора Anritsu MG3696B, аттенюатора ДЗ-35 и измерительной линии Р1-30. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Измерение коэффициентов радиоотражения показали, что при частоте 24 ГГц коэффициенты радиоотражения всех образцов соответствуют предъявляемым

требованиям и составляет около 0,98. Неудовлетворительные результаты получены при частоте 33 ГГц, что может быть связано с повышенным газовыделением исходных образцов углепластика или высокой шероховатостью поверхности. Для выявления факторов, влияющих на показатели коэффициентов радиоотражения, были проведены исследования по определению величины газовыделения полученных образцов и шероховатости их поверхности.

Таблица 4

Результаты измерения коэффициентов радиоотражения

№ образца	Коэффициент радиоотражения, дБ	
	24 ГГц	33 ГГц
2/2	98,18	95,93
2/3	98,08	95,69
2/4	98,36	95,92
3а/3	98,42	95,0
3а/4	98,24	96,17
3а/7	98,35	95,35
3а/8	98,37	96,19

Параметры газовыделения измерялись по следующей методике. Перед вакуумно-тепловым воздействием образцы материалов подвергались кондиционированию при температуре (22 ± 3) °C в течение 24 ч в эксикаторе с относительной влажностью воздушной среды (55 ± 3) %. Воздушная среда в эксикаторе с относительной влажностью (55 ± 3) % создавалась перенасыщенным водным раствором азотнокислого магния ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), над которым размещались испытываемые образцы материалов, в соответствии с ГОСТ 12423–66.

После кондиционирования предварительно взвешенные образцы материалов и конденсационные пластины помещались в испытательный блок установки УГ-5.

Проводилась откачка вакуумной камеры до остаточного давления $7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.). После достижения температуры на конденсационных пластинах, равной (25 ± 1) °C, включался нагревательный блок и устанавливалась на образцах материалов температура, равная (125 ± 1) °C. Время выдержки образцов материалов при температуре 125 °C составляло 24 ч.

После вакуумно-теплого воздействия и взвешивания образцы материалов подвергались рекондиционированию при температуре $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 24 ч в эксикаторе с относительной влажностью окружающего воздуха $(55 \pm 3)\%$.

Потеря массы (ПМ), летучие конденсирующиеся вещества (ЛКВ), равновесный водяной пар (РВП) и потеря массы с учетом рекондиционирования (ПМР) материалов определялись взвешиванием образцов и конденсационных пластин до и после вакуумно-теплого воздействия и рекондиционирования на прецизионных электронных весах HR-202 производства фирмы A&D Company Ltd (Япония), в диапазоне взвешиваемой массы от 0 до 42 г с дискретностью $1 \cdot 10^{-5}$ г.

Погрешность взвешивания массы составляла ± 120 мкг в соответствии с руководством по эксплуатации на весы HR-202.

Образцы материалов и конденсационные пластины взвешивались на весах не позднее 2-х минут после их изъятия из эксикатора. Общее время взвешивания образцов материалов после вакуумно-теплого воздействия не превышало 0,5 ч.

ПМ материалов, содержание ЛКВ, РВП, а также ПМР вычислялись по формулам:

$$\text{ПМ} = \frac{M'_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}}}{M'_{\text{обр}}} 100 \%, \quad (1)$$

где $M'_{\text{обр}}$ – масса образца материала до испытаний, г; $M''_{\text{обр}}$ – масса образца материала после испытания, г;

$$\text{ЛКВ} = \frac{m''_{\text{кп}} - m'_{\text{кп}}}{M'_{\text{обр}}} 100 \%, \quad (2)$$

где $m'_{\text{кп}}$ – масса конденсационной пластины до испытания, г; $m''_{\text{кп}}$ – масса конденсационной пластины после испытания, г;

$$\text{РВП} = \frac{M^*_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}}}{M'_{\text{обр}}} 100 \%, \quad (3)$$

где $M^*_{\text{обр}}$ – масса образца материала после рекондиционирования, г;

$$\text{ПМР} = \frac{M'_{\text{обр}} - M^*_{\text{обр}}}{M'_{\text{обр}}} 100 \%. \quad (4)$$

Определение параметров газовой выделенности проводили на двух образцах каждого материала. За результат испытаний принимали среднее арифметическое из

полученных значений каждого параметра. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний

№ образца	ПМ, %	ЛКВ, %	РВП, %	ПМР, %
4/1	0,97	0,00	0,32	0,66
2а/1	0,59	0,01	0,21	0,37

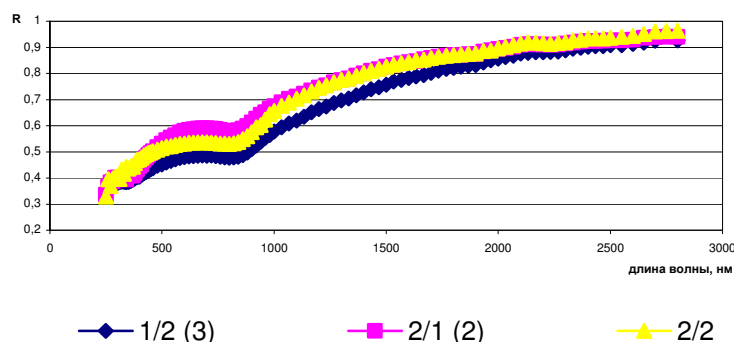
Согласно требованиям к неметаллическим материалам параметры газовой выделенности должны быть: $\text{ПМР} \leq 1\%$; $\text{ЛКВ} \leq 0,1\%$. Таким образом, параметры газовой выделенности соответствуют требованиям, которые предъявляются к покрытиям данного класса.

Измерения шероховатости поверхности углепластика с радиоотражающим покрытием проводились с использованием оптического интерферометра MicroXAM-100 при 100-кратном увеличении.

Шероховатость радиоотражающего покрытия на углепластике составляет $R_a = 363,8$ нм при допустимой шероховатости для 33 ГГц – 600 мкм.

Разрабатываемые покрытия по своему назначению предполагается использовать на внешних поверхностях КА. Рабочая температура таких покрытий определяется поглощением электромагнитного излучения Солнца и излучением тепла в космическое пространство. В научно-технической документации, относящейся к покрытиям, к которым предъявляются терморadiационные свойства, для количественной оценки этих процессов используются терморadiационные характеристики – коэффициент поглощения солнечной радиации A_s и коэффициент излучения E_p . Данные параметры покрытий являются интегральными по диапазону длин волн и пространственному распределению поглощаемой и излучаемой энергии.

Измерение коэффициента поглощения солнечного излучения (A_s) и спектрального коэффициента отражения (R_λ) проводили спектрорефлектометром LPSR-300 в диапазоне длин волн от 250 до 2800 нм в соответствии с технической инструкцией и инструкцией по эксплуатации прибора. Измерение коэффициента теплового излучения E_p проводили рефлектометром TEMP-2000A в абсолютном режиме в соответствии с технической инструкцией и инструкцией по эксплуатации прибора. На рисунке приведены спектры отражения образцов в оптическом диапазоне длин волн от 200 до 3000 нм.



Спектральный коэффициент отражения различных вариантов покрытий

Анализ спектров отражения указывает на наличие сильной полосы поглощения в диапазоне 500–1500 нм по сравнению с чистым алюминием. Вероятной причиной загрязнения является распыление полимерной части подложки (связующего) в процессе магнетронного напыления.

Результаты измерений коэффициентов As и En приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты измерения
терморадационных коэффициентов**

Номер образца	Размер образца	As	En
2/1 (2)	100×100	0,38	0,06
1/2 (3)	100×100	0,45	0,07
2/2	35×35	0,38	0,07

Выявлено, что коэффициент поглощения солнечной радиации As несколько завышен по сравнению с требованиями к данному классу покрытий, а коэффициент излучения En соответствует этим требованиям.

Заключение. Для оптимизации технологии с целью обеспечения заданных параметров покрытия, необходимо проведение операций по предварительной подготовке углепластика: очистка поверхности от следов антиадгезива, увеличение продолжительности обезгаживания углепластика перед напылением, снижение интенсивности (увеличение времени) в процессе напыления, а также целесообразно проведение мер по уменьшению степени загрязнения плазмообразующего газа остаточной атмосферой камеры и доработка установки с целью удаления из зоны воздействия плазмы деталей внутрикамерной оснастки, что позволит изготовить экспериментальные образцы с требуемыми характеристиками.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 02.G2531.0043.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, government contract № 02.G2531.0043.

Библиографические ссылки

1. Baril S. Qualifications large deployable reflector ka-band. Hellmich A., EADS Space Transportation BP 3002 – 78133 Les Mureaux – France.
2. Malmberg P., Ingvarson P., Petersson M., Woxlin K. The development of the design and development of the reflector in the company saab ericsson space. Gothenburg, Sweden, Saab Ericsson Space AB, SE-405 15.
3. Stute Th. Optical reflectors mission planck esa / eads-astrum gmbh. Friedrichshafen, Germany.
4. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
5. Разработка технологии нанесения радиоотражающих покрытий / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 4 (50). С. 222–226.

6. Пашенко О. В., Соловьев А. М., Юдаков С. В. Система управления промышленной установкой «КО/МРК» // Изв. Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 5. С. 100–104.
7. Испытание образцов радиоотражающих покрытий на стойкость к внешним воздействующим факторам / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 4 (50). С. 227–230.
8. Исследование состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 216–219.
9. Плазменная технология осаждения отражающего покрытия на поверхность углепластика / О. Х. Асаинов [и др.] // Известия вузов. Сер. Физика. 2011. Т. 54, № 11/2. С. 158–161.
10. Обработка поверхности материалов плазмой магнетронного разряда и ионными пучками / О. Х. Асаинов [и др.] // Известия вузов. Сер. Физика. 2019. Т. 52, № 11/2. С. 172–175.
11. Handbook of thin-film deposition process and techniques / edited by K. K. Schuegraf // Noyes Publications. New Jersey. 1988. 413 p.
12. Mohan S., Ghanashyam Krishna M. A review of ion beam assisted deposition of optical thin films // Vacuum. 1995. Vol. 46, No. 7. P. 645–659.
13. Neumann M., Web Milde F., Schiller S. Coating by Reactive Plasma Activated Evaporation and Sputtering Processes // Society of Vacuum Coaters. 1996, No. 39. P. 371–377.
14. CVD-processes by hollow cathode glow discharge / A. Hellmich [et al.] // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 98. P. 1541–1546.
15. Bunshah R. F. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings / Noyes Publications. Park Ridge, 1994. 131 p.

References

1. Baril, S. Qualifications large deployable reflector ka-band. – Hellmich A., EADS Space Transportation BP 3002 – 78133 Les Mureaux – France.
2. Per Malmberg, Per Ingvarson, Mikael Petersson, Karin Woxlin. The development of the design and development of the reflector in the company saab ericsson space. Gothenburg, Sweden, Saab Ericsson Space AB, SE-405 15.
3. Stute, Thomas. Optical reflectors mission planck esa / eads-astrum gmbh. Friedrichshafen, Germany.
4. Komkov M. A., Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktсий raket i sredstv porazheniya* [Technology of winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2011, 431 p.
5. Mikheev A. E., Girm A. V., Kharlamov V. A., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [Development of technology for the application of radio-reflective coatings]. *Vestnik SibGAU*. 2013, Vol. 50, No. 4, P. 222–226 (In Russ.).
6. Pashchenko O. V., Solov'ev A. M., Yudakov S. V. [Control systems for industrial installation «КО/МРК»]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012, Vol. 320, No. 5, P. 100–104 (In Russ.).

7. Mikheev A. E., Ivasev S. S., Kuznetsov A. B., Bashkov I. V., Ravodina D. V. [Test specimens radio reflective coatings for resistance to external factors]. *Vestnik SibGAU*. 2013, Vol. 50, No. 4, P. 227–230 (In Russ.).
8. Mikheev A. E., Kharlamov V. A., Kryuchek S. D., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [Study of the composition of the residual gas and plasma in the chamber vacuum coaters]. *Vestnik SibGAU*. 2013, Vol. 48, No. 2, P. 216–219 (In Russ.).
9. Asainov O. Kh., Bainov D. D., Krivobokov V. P., Romanenko S. E., Chernyatina A. A. [The plasma deposition technique on the surface of the reflective coating CFRP]. *Izvestiya vuzov. Ser. Fizika*. 2011, Vol. 54, No. 11/2, P. 158–161 (In Russ.).
10. Asainov O. Kh., Bainov D. D., Krivobokov V. P., Yudakov S. V. [Surface treatment of materials by plasma magnetron discharge and ion beams]. *Izvestiya vuzov. Ser. Fizika*. 2019, Vol. 52, No. 11/2, P. 172–175 (In Russ.).
11. Handbook of thin-film deposition process and techniques : edited by K. K. Schuegraf. // Noyes Publications. New Jersey. 1988. 413 p.
12. Mohan S., M. Ghanashyam Krishna. A review of ion beam assisted deposition of optical thin films. *Vacuum*. 1995, Vol. 46, No. 7, P. 645–659.
13. Neumann M., Web Milde F., Schiller S. Coating by Reactive Plasma Activated Evaporation and Sputtering Processes. *Society of Vacuum Coaters*. 1996, No. 39, P. 371–377.
14. Hellmich A., Jung T., Kielhorn A., Ribland M. CVD-processes by hollow cathode glow discharge. *Surf. Coat. Technol.* 1998, Vol. 98, P. 1541–1546.
15. Bunshah R. F. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings / Noyes Publications. Park Ridge, NJ. 1994, 131 p.

© Михеев А. Е., Чернятина А. А., Евкин И. В.,
Власов А. Ю., Мартынов В. А., 2014