



(51) МПК
 G02B 1/10 (2006.01)
 G02B 5/08 (2006.01)
 B64G 1/58 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013139243/28, 23.08.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.08.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.08.2013

(45) Опубликовано: 10.01.2015 Бюл. № 1

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2360032 C1, 27.06.2009. JP 2010002776 A, 07.01.2010, . US 20080174895 A1, 24.07.2008, . WO 2007121898 A1, 01.11.2007. RU 2269146 C2, 27.01.2006

Адрес для переписки:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС (для НОЦ
НМКН)

(72) Автор(ы):

Резник Сергей Васильевич (RU),
Миронов Юрий Михайлович (RU),
Нелюб Владимир Александрович (RU),
Буянов Иван Андреевич (RU),
Бородулин Алексей Сергеевич (RU),
Чуднов Илья Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ
им. Н.Э. Баумана) (RU)

RU 2537515 C1

(54) МНОГОСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КОСМИЧЕСКОГО АНТЕННОГО РЕФЛЕКТОРА

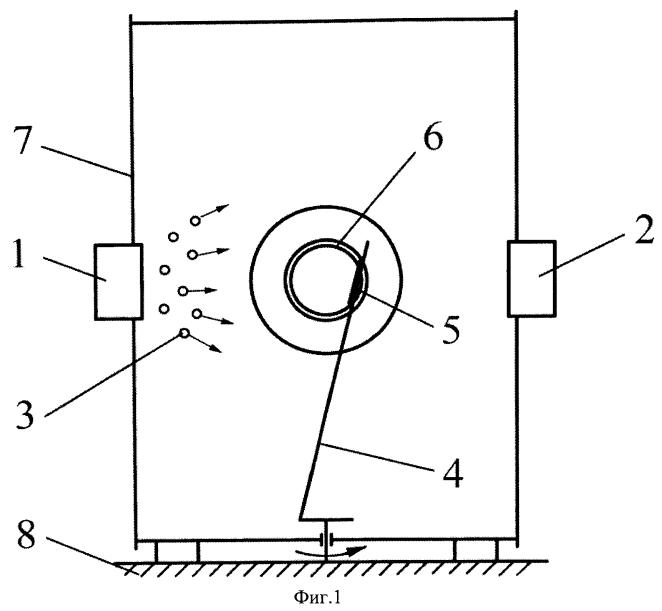
(57) Реферат:

Изобретение может использоваться в многослойных комбинированных покрытиях зеркальных космических антенн с рефлекторами из полимерного композиционного материала - углепластика. Многослойное покрытие содержит три последовательных слоя с равномерной толщиной: нижний зеркальный металлический радиоотражающий скин-слой из чистого алюминия, промежуточный защитный

терморегулирующий диэлектрический слой из диоксида циркония и верхний защитный износостойкий высокопрочный алмазоподобный углеродный слой. Технический результат - обеспечение работы в экстремальных условиях открытого космоса за счет использования тонкой подложки-оболочки из полимерного композиционного материала - углепластика. 2 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 2537515 C1

R U 2 5 3 7 5 1 5 C 1



R U 2 5 3 7 5 1 5 C 1



(51) Int. Cl.
G02B 1/10 (2006.01)
G02B 5/08 (2006.01)
B64G 1/58 (2006.01)

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2013139243/28, 23.08.2013

(24) Effective date for property rights:
23.08.2013

Priority:

(22) Date of filing: 23.08.2013

(45) Date of publication: 10.01.2015 Bull. № 1

Mail address:

105005, Moskva, 2-ja Baumanskaja ul., 5, str. 1,
MGTU im. N.Eh. Baumana, TsZIS (dlja NOTs
NMKN)

(72) Inventor(s):

Reznik Sergej Vasil'evich (RU),
Mironov Jurij Mikhajlovich (RU),
Neljub Vladimir Aleksandrovich (RU),
Bujanov Ivan Andreevich (RU),
Borodulin Aleksej Sergeevich (RU),
Chudnov Il'ja Vladimirovich (RU)

(73) Proprietor(s):

federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovanija "Moskovskij
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni
N.Eh. Baumana" (MGTU im. N.Eh. Baumana)
(RU)

(54) MULTI-LAYERED COATING OF THIN-WALLED ENVELOPE FROM POLYMER COMPOSITE
MATERIAL OF SPACE ANTENNA REFLECTOR

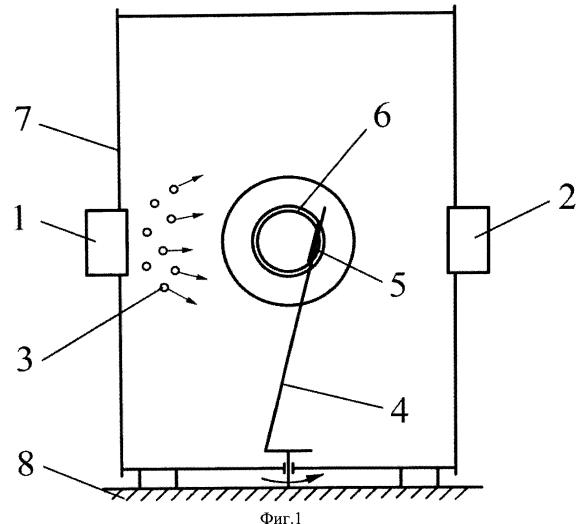
(57) Abstract:

FIELD: chemistry.

SUBSTANCE: multilayered coating contains three successive layers with an even thickness: a lower mirror metal radio-reflecting skin-layer of pure aluminium, an intermediate protective thermoregulatory dielectric layer of zirconium dioxide and an upper protective wear-resistant highly strong diamond-like carbon layer.

EFFECT: provision of the operation in extreme conditions of open space due to the application of a thin substrate-envelope from a polymer composite material.

3 cl, 1 dwg



C1
51
50
2537515

RU

RU
2537515

Область техники

Изобретение относится к области покрытий, эксплуатирующихся в составе космической техники, а именно многослойных комбинированных покрытий зеркальных космических антенн с рефлекторами из полимерного композиционного материала (ПКМ) - углепластика.

Уровень техники

Космические антенные рефлекторы требуют защиты от космической среды, подвергающей их резким изменениям температуры, износу от воздействия различного рода корпускулярных потоков, радиационному влиянию большого потока заряженных частиц. Защита антенн от активной космической среды представляет собой специфичную проблему, потому что обычно используемые материалы для защиты оборудования космического корабля мешают нормальному прохождению и передаче радиосигналов.

Актуальность усовершенствования покрытия космического антенного рефлектора диктуется необходимостью создания рефлекторов для нового поколения спутников связи, предназначенных для длительной (более 15 лет) службы на геостационарной орбите. Перспективные спутники предполагается оснащать рефлекторами, обладающими высокой стабильностью формы, размеров и радиоотражающих характеристик (коэффициент радиоотражения 0,98) при работе в диапазоне частот от 4 до 40 ГГц и имеющими малую погонную массу на уровне, не превышающем $2,5 \text{ кг/м}^2$.

При движении по геостационарной орбите рефлектор будет попадать в тень Земли и остывать до весьма низких температур (до -150°C), а при выходе из тени интенсивно нагреваться прямым солнечным излучением (до $+150^\circ\text{C}$). Возникающие при этом перепады температуры могут стать основной причиной искажения формы рефлектора и нарушения диаграммы направленности антенны, снижающей качество радиосвязи.

Чтобы удовлетворить противоречивым требованиям по малой погонной массе и высокой стабильности формы и размеров оболочки рефлектора должна быть одновременно тонкостенной и иметь высокую жесткость. Наилучшим конструкционным материалом для решения этой задачи является углепластик. Поскольку применение активных систем терморегулирования для данных сверхлегких рефлекторов исключено, то единственным реальным способом поддержания заданного теплового режима рефлектора может быть нанесение на радиоотражающий слой рефлектора терморегулирующего покрытия и защитного износостойкого покрытия от корпускулярных и метеоритных воздействий.

Таким образом, необходимым является создание многофункционального комбинированного покрытия, способного обеспечить целый ряд жестких технических требований работы рефлектора в открытом космосе: прозрачность и радиоотражение для широкого диапазона сигналов радиочастоты; терморегулирующую и износостойкую защиту, малую массу. Все это практически возможно реализовать только посредством тонкого многослойного покрытия, где каждый слой имеет функциональную специализацию, а совместно все слои покрытия в жестких допустимых пределах влияют на выполнение главной радиоотражающей функции антенного рефлектора.

В предыдущем уровне техники применялись различные материалы, отвечающие некоторым упомянутым требованиям, но не полностью и не одновременно всем. Это было также связано с проблемой использования специфических технологий нанесения тонких (микро- и наноразмерных) слоев покрытия с гарантированным обеспечением надежного качественного соединения (сцепления, адгезии) их друг с другом.

Отобранные в ходе патентного поиска по признакам предлагаемого покрытия для полноты картины уровня техники аналоги многослойных покрытий разделены на 2

группы:

- аналоги, более близкие по составу слоев покрытия и применяемой технологии их нанесения на подложку и друг на друга, но при этом не схожие по областям их применения и техническим задачам (патент РФ 2487190 (МПК C23C 22/34, опубликовано: 5 10.07.2013) на базе РСТ-заявки WO 2007121898; патент РФ 2467878 (МПК B32B 15/04, опубликовано: 10.11.2012), патент РФ 2360032 (МПК C23C 14/24, C23C 14/06, B32B 15/04, B82B 3/00, опубликовано: 27.06.2009));

- и наоборот: аналоги, схожие по применению в космической технике, но при этом менее схожие (по сравнению с первой группой аналогов) по составу слоев и технологиям 10 их нанесения (патент РФ 2269146 (МПК G02B 1/10, B64G 1/58, опубликовано: 27.01.2006), патент РФ 2087392 (МПК B64G 1/58, опубликовано: 20.08.1997) (американский патентный аналог US 5273815 (МПК B32B 7/02; B64G 1/58; H01Q 1/00; H01Q 1/42; H05F 1/00; H05F 1/02; (IPC1-7): B32B 15/08; B32B 27/00; B32B 9/04; H01Q 15/24, опубликовано: 28.12.1993)).

15 Из первой группы аналогов ближе всего объект покрытия, описанный в патенте РФ 2487190. Изобретение относится к изготовлению защищенной от коррозии и прежде всего обладающей зеркальным блеском металлической или неметаллической подложки, а также к самой защищенной от коррозии и прежде всего обладающей зеркальным блеском металлической или неметаллической подложке и к ее применению. Конкретно

20 в одном из многочисленных предлагаемых вариантов покрытия возможно использование на неметаллической подложке (в том числе из пластика) слоя чистого алюминия с зеркальным отражением поверхности и поверх него защитного слоя, в том числе из диоксида циркония; при этом одной из технологий нанесения слоев покрытия возможно катодное распыление (синоним: магнетронное нанесение слоев) в высоком

25 вакууме.

Однако это покрытие не содержит защитного износостойкого алмазоподобного (DLC - diamond like coating) слоя, не предназначено для использования в космической технике (самое близкое применение снабженной покрытием подложки - в качестве наружной детали самолетов) и, соответственно, технической задачей является сохранение особо 30 высокой коррозионной стойкости подложек даже под воздействием механической нагрузки.

Патент РФ 2467878 из первой группы аналогов, хоть и защищает в первую очередь 35 вакуумную технологию магнетронного нанесения слоев теплозащитного покрытия на изделия из меди (сходного материала с алюминием), но также при этом содержит описание и самого теплозащитного многослойного покрытия из

40 наноструктурированного поверхностного слоя изделия с наноструктурным металлическим подслоем из циркония и верхнего наноструктурного керамического слоя из оксида циркония и оксида иттрия от 2 ат.-% до 8 ат.-% и имеющего глобуллярную зеренную структуру. Полученное теплозащитное покрытие обладает высокой адгезионной прочностью, термостойкостью и стойкостью к образованию трещин при 45 работе изделий в условиях термоциклирования и высоких температур. Покрытие может быть использовано в авиастроении и других областях.

Однако и это покрытие не содержит защитного износостойкого алмазоподобного (DLC) слоя и не предназначено для использования в космической технике, конкретнее 45 в оболочках космических антенных рефлекторов.

В патенте РФ 2360032 изобретение предназначено для нанесения плазменным (схожим с магнетронным) методом сверхтвёрдых алмазоподобных (DLC) покрытий на изделия из различных материалов (в том числе керамика, пластмасса), при этом перед нанесением

слоя алмазоподобной пленки предварительно наносят слой из металлов: алюминия, циркония или из их оксидов, или их смесей. В структуре многослойного алмазоподобного покрытия на исходном изделии (подложке) нанесен адгезионный слой, далее переходный слой металл-углерод, на котором расположена алмазоподобная пленка. В результате 5 получают износостойкие сверхтвердые многослойные покрытия, которые могут быть использованы в машиностроении, нанотехнологии и т.д. Повышается адгезия, износостойкость и температурная стабильность алмазоподобного покрытия.

Однако и это покрытие не предназначено для использования в космической технике, конкретнее в оболочках космических антенных рефлекторов из полимерного 10 композиционного материала - углепластика, и не содержит слоев чистого алюминия с зеркальной отражающей поверхностью и диоксида циркония в качестве терморегулирующего защитного слоя.

Из второй группы отобранных аналогов известна защищенная патентами во многих странах мира слоистая оболочка для обеспечения тепловой и электростатической 15 защиты элементов космической техники, в том числе обтекателя рефлектора антенны космического корабля (патент РФ 2087392, МПК B64G 1/58, опубликовано: 20.08.1997).

Хотя основной задачей является задача защиты от враждебной среды, минимизация общего веса покрытия также существенна. В результате покрытие представляет из себя прочный материал, способный обеспечить термическую и электрическую защиту, легкий 20 и прозрачный для широкого диапазона сигналов радиочастоты. Слоистая оболочка, которая является прозрачной для излучения радиочастоты, содержит проводящий слой (в предпочтительном варианте проводящий слой содержит полупроводник, такой как германий) для рассеивания электростатических разрядов и терморегулирующий слой для отражения теплового излучения и уменьшения эффекта температурных изменений 25 с одной стороны слоистой оболочки на область с другой стороны.

Недостатком этого покрытия является отсутствие учета особенностей тонкой сверхлегкой основы-подложки (параболической оболочки антенны) из ПКМ - углепластика, предназначенный для работы в составе космического антенного рефлектора с высоким коэффициентом радиоотражения (величина 0,98) в экстремальных 30 условиях открытого космоса и требованиями очень малой деформируемости сложного профиля оболочки ввиду требования высокого качества работы рефлектора, а также износостойкой защиты оболочки от корпусулярных потоков. Зато это покрытие обеспечивает электростатическую защиту, которая практически не требуется для малого космического антенного рефлектора. Также в этом изобретении ничего не сказано об 35 используемой технологии нанесения слоев друг на друга, что не позволяет судить о надежности их сцепления друг с другом.

И наконец, известно многослойное покрытие для элементов космической техники (патент РФ 2269146, МПК G02B 1/10, B64G 1/58, опубликовано: 27.01.2006), состоящее из подложки с прозрачным электропроводным покрытием на внешней поверхности и 40 отражающим покрытием на тыльной поверхности, выполненным в виде пленки металла с высокой отражательной способностью в интервале длин волн 0,3...2,4 мкм.

Прозрачное электропроводное покрытие включает не менее 2-х слоев, причем один из слоев содержит оксид церия, а подложка выполнена из полимерной полиимидной пленки. Внешний слой прозрачного электропроводного покрытия может быть выполнен 45 в виде тонкого (порядка 0,05 мкм) прозрачного радиационно стойкого и износостойкого слоя, например из SiO_2 . Один из слоев прозрачного электропроводного покрытия может быть выполнен на основе оксида олова SnO_2 , легированного оксидом церия

СеO₂, или на основе In₂O₃. Поперечное сечение покрытия состоит из подложки, выполненной в виде полимерной пленки, электропроводного покрытия на лицевой стороне подложки, причем электропроводное покрытие может включать защитный износостойкий слой. Многослойное покрытие также включает на тыльной стороне 5 подложки металлический отражающий слой, также снабженный защитным покрытием. Отражающий слой выполнен из металла с высокой отражательной способностью, например алюминия. Защитное покрытие нанесено на внешнюю сторону отражающего слоя и содержит твердое коррозионно-стойкое соединение, металл или сплав, причем металл или сплав может быть частично или полностью окисленным. Электропроводное 10 покрытие выполнено из оптически прозрачного радиационно стойкого неорганического материала на основе оксидного полупроводника, например оксида индия, и может иметь неорганический износостойкий слой (например, SiO₂) на внешней поверхности. Многослойное покрытие предназначено для использования в качестве 15 терморегулирующего покрытия класса "солнечный отражатель" при нанесении его с помощью kleевого электропроводного слоя на наружные поверхности, преимущественно теплоизлучающие поверхности космического аппарата. Благодаря использованию не менее 2-х слоев электропроводного покрытия, один из которых содержит оксид церия (СеO₂), повышается стойкость покрытия к истиранию (за счет 20 высокой твердости оксида церия) и повышается стабильность свойств подложки под действием электромагнитного излучения Солнца. Благодаря выполнению электропроводного покрытия на основе оксидных полупроводников обеспечивается высокая радиационная стойкость покрытия, причем внешний слой обеспечивает высокую 25 стойкость к воздействию атомарного кислорода (защищает электропроводное покрытие от повреждения атомарным кислородом на участке выведения космического аппарата на орбиту и при эксплуатации на низких околоземных орbitах).

Однако данное покрытие предназначено в первую очередь в качестве многослойного покрытия гибких защитных экранов большой площади космической техники и соответственно не предназначено для применения в оболочках космических антенных 30 рефлекторов, сравнительно малых по площади, но жесткой и практически очень малодеформируемой формы оболочки из углепластика. И в этом покрытии применяется kleевая технология, которую практически невозможно использовать при нанесении микро- и наноразмерных слоев многослойного покрытия на углепластиковую подложку и друг на друга.

В результате анализа всех найденных и отобранных аналогов ни один из них не 35 может быть признан в качестве явного прототипа предлагаемого покрытия из-за несоответствия совокупности решаемых ими технических задач и их применения тому, что было задано в предлагаемом изобретении.

Раскрытие изобретения

Задача предлагаемого изобретения - разработка многослойного радиоотражающего, 40 защитного терморегулирующего и износостойкого покрытия для тонкостенных оболочек рефлекторов зеркальных космических антенн с учетом тонкой подложки-оболочки из полимерного композиционного материала - углепластика, предназначенный для работы в экстремальных условиях открытого космоса.

Задача решается тем, что предложено многослойное покрытие тонкостенной 45 оболочки из полимерного композиционного материала, в первую очередь углепластика, космического антенного рефлектора, характеризующееся наличием трех последовательных слоев с равномерной толщиной: нижнего зеркального металлического

радиоотражающего скин-слоя из чистого алюминия, промежуточного защитного терморегулирующего диэлектрического слоя из диоксида циркония и верхнего защитного износостойкого высокопрочного алмазоподобного (DLC) углеродного слоя. Углеродное алмазоподобное покрытие обладает газобарьерными и защитными

5 свойствами и высокой твердостью.

При этом для качественной адгезии слоев на оболочке и друг на друге многослойное покрытие получено методом «холодного» магнетронного распыления в вакууме за единый установки оболочки рефлектора в вакуумной магнетронной камере с катодными излучателями всех требуемых для покрытия компонентов материалов.

10 При этом толщина оболочки параболического профиля из полимерного композиционного материала, преимущественно волокнистого углепластика, составляет от 1 до 2 мм, толщина радиоотражающего зеркального алюминиевого (Al) слоя - порядка 2 мкм, толщина терморегулирующего защитного слоя из диоксида циркония (ZrO_2) - порядка 35 нм и толщина износостойкого слоя из алмазоподобного (DLC)

15 наноструктурированного углерода - порядка 20 нм.

Перечень фигур

Фиг.1 - схема установки напыления слоев предлагаемого покрытия методом магнетронного распыления в вакууме.

Осуществление изобретения

20 Данное изобретение находится на стыке материаловедения существенно разнородных материалов с различными физико-химическими свойствами и технологии практически бездеформационного нанесения с требуемой адгезией слоев покрытий сверхмалых толщин (nano- и микроразмеров) на основу сравнительно большой площади (порядка $1 m^2$) по отношению к малой толщине (порядка 1 мм) сложного геометрического (в первую очередь параболического) профиля, который для работоспособности антенны должен быть сохранен с отклонениями деформаций профиля в пределах максимум до 0,3 мм как при нанесении покрытия, так и при дальнейшей эксплуатации в условиях всевозможных экстремальных космических воздействий, как то: больших перепадов температур (от -150 до +150°C), высокого ионизирующего облучения, корпускулярных потоков и т.д.

25 В состав многослойного покрытия включены радиоотражающий алюминиевый скин-слой оптимальной толщиной 2 мкм, терморегулирующий защитный слой из диоксида циркония ZrO_2 оптимальной толщиной 35 нм и защитный слой из алмазоподобного наноструктурированного материала оптимальной толщиной 20 нм. В результате

35 достигается повышение надежности, многофункциональной защиты, уменьшение веса и длительной стойкости к действию факторов космического пространства зеркальных антенных рефлекторов космических аппаратов.

30 Состав радиоотражающего покрытия на подложке (оболочке рефлектора) из волокнистого углепластика (с проводящими волокнами и диэлектрическим наполнителем - полимерной эпоксидной смолой): металлическое покрытие (радиоотражающий скин-слой из алюминия); терморегулирующее покрытие (диоксид циркония) и внешнее защитное углеродное алмазоподобное покрытие типа DLC.

40 При этом многослойное покрытие получено методом «холодного» (до +100°C) магнетронного многопроходного распыления в вакууме, чтобы практически не деформировать термически в процессе нанесения слоев геометрически готовый параболический профиль углепластиковой подложки (оболочки) антенного рефлектора. Для качественной адгезии слоев на оболочке и друг на друге все многослойное покрытие

должно быть получено за требуемое количество проходов в единый установ оболочки рефлектора в вакуумной магнетронной камере с катодными излучателями (магнетронами) всех требуемых для покрытия компонентов материалов.

В процессе магнетронного распыления над поверхностью катода горит аномальный 5 тлеющий разряд в среде аргона, кислорода и паров материала катода. Ионизированные атомы из разряда ускоряются при катодным напряжением и бомбардируют поверхность катода. Под действием бомбардировки материал катода магнетрона распыляется, а 10 образующийся поток распыленных атомов оседает на подложке. При наличии в вакуумной камере атомов различных газов (кислород, азот и пр.) распыленный материал 15 образует пленки соединения атомов материала мишени с атомами газов (оксиды, нитриды и пр.). Конструктивно система магнетронного распыления состоит из вакуумной камеры, катода-мишени, анода и подложки.

На фиг.1 номерами обозначены: 1, 2 - магнетроны; 3 - поток распыленных атомов; 4 - оснастка на поворотном устройстве; 5 - образец для нанесения (напыления) слоев; 15 6 - источник ионов (поток ионов направлен на образец); 7 - вакуумная камера; 8 - основание вакуумной камеры.

Процесс напыления слоев предлагаемого покрытия методом магнетронного распыления в вакууме состоит в следующем. После откачки вакуумной камеры до давления $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па напыляют покрытие алюминия. Ток разряда 4 А, время напыления 20 60 минут. Рабочее давление $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па. На 58-й минуте включают второй магнетрон, чтобы очистить поверхность циркониевого катода. На 60-й минуте магнетрон с алюминиевым катодом выключают. После этого в камеру напускают требуемую смесь газов, магнетрон с катодом из циркония выходит на стабильный режим напыления 25 диоксида циркония в течение 3 минут. После этого образцы на поворотном устройстве поворачивают к магнетрону и напыляют диоксид циркония. Время напыления составляет около 2 минут. Далее наносят углеродное алмазоподобное покрытие. Время напыления 30 составляет около 3 минут. Во всех технологических процессах остаточное давление составляет от $7 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Рабочее давление при напылении покрытий - $1,2 \cdot 10^{-1}$ Па. Расстояние от катода магнетронов до подложки - 300 мм. Напыление проводят в среде инертного газа аргона ОСЧ марки 5,5 по ТУ 2114-006-45905715-2010. Массовая доля аргона 99,9995%. В качестве реактивного газа используют кислород ОСЧ ТУ 6-21-10-83. Массовая доля кислорода 99,999%.

35 Формула изобретения

1. Многослойное покрытие тонкостенной оболочки из полимерного композиционного материала космического антенного рефлектора, характеризующееся наличием трех последовательных слоев с равномерной толщиной: нижнего зеркального металлического радиоотражающего скин-слоя из чистого алюминия, промежуточного защитного 40 терморегулирующего диэлектрического слоя из диоксида циркония и верхнего защитного износостойкого высокопрочного алмазоподобного (DLC) углеродного слоя.
2. Покрытие по п.1, характеризующееся тем, что оно получено методом «холодного» магнетронного распыления в вакууме за единый установ оболочки рефлектора в 45 вакуумной магнетронной камере с катодными излучателями всех требуемых для покрытия компонентов материалов.
3. Покрытие по п.1 или 2, характеризующееся тем, что толщина оболочки параболического профиля из полимерного композиционного материала,

преимущественно волокнистого углепластика, составляет от 1 до 2 мм, толщина радиоотражающего зеркального алюминиевого (Al) слоя порядка 2 мкм, толщина терморегулирующего защитного слоя из диоксида циркония (ZrO_2) порядка 35 нм и толщина износостойкого слоя из алмазоподобного (DLC) наноструктурированного углерода порядка 20 нм.

10

15

20

25

30

35

40

45