

На правах рукописи

УДК 621.767

ШИШЛОВ Андрей Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ
ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ
НА УСТАНОВКАХ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре технологий приборостроения.

Научный руководитель: **Сагателян Гайк Рафаэлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кондратенко Владимир Степанович**
доктор технических наук, академик РАЕН,
профессор, директор Физико-технологического
института, заведующий кафедрой «Оптических и
биотехнических систем и технологий» МГУПИ

Рыжиков Илья Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий
лабораторией ФГБУН «Института теоретической
и прикладной электродинамики» РАН

Ведущая организация: ФГУП «НПО «Техномаш», г. Москва

Защита диссертации состоится «____» ____ 2016 г. в ____ часов ____ минут
на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Федеральном
государственном образовательном учреждении высшего профессионального
образования «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенных
печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря
диссертационного совета Д212.141.18 по адресу: 105005, г. Москва, 2-я
Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «____» ____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Цветков Юрий Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Внедрение в системы управления (СУ) летательных аппаратов и сложных технических систем мощных бортовых вычислительных комплексов, используемых для решения кинематических уравнений и аналитического построения инерциальной системы координат, сделало возможным применение в таких СУ инерциальных навигационных систем, построенных на различных чувствительных элементах (ЧЭ), например, динамически настраиваемых гироскопах, либо волоконно-оптических гироскопах (ВОГ), а также кварцевых маятниковых акселерометрах (МА). Основными требованиями, предъявляемыми к этим приборам, являются точность, надежность, малые вес и габариты, экономичность производства. Наиболее значимыми разработками в настоящее время являются приборы на основе ВОГ и МА.

В настоящее время в составе изделий данного класса имеется характерная группа ответственных деталей с различными функциональными покрытиями. Они отличаются высокими требованиями конструкторского допуска на равномерность покрытий – отклонения от равнотолщинности составляют менее 10%.

Следует отметить, что при реализации технологических процессов изготовления деталей данной группы на предприятиях точного приборостроения возникают значительные трудности, обусловленные отсутствием научно обоснованных данных для технологического обеспечения равномерности покрытий. Это приводит к необоснованным производственным затратам, в том числе по причине низкого выхода годных деталей (до 50%) от запускаемой партии.

Вместе с тем, решению вопросов, направленных, на обеспечение равномерности толщины функциональных покрытий деталей гироскопических приборов не уделено достаточного внимания, как в практическом, так и в теоретическом плане. В этой связи, представляется актуальной, имеющей научное и практическое значение работа, направленная на разработку технологического обеспечения равномерности функциональных покрытий с целью обеспечения эксплуатационных свойств гироприборов.

Целью диссертации является повышение равномерности тонкопленочных покрытий для деталей гироскопических приборов, получаемых магнетронным распылением мишеней на установках с планетарным движением подложки.

Для достижения поставленной цели в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель и программное обеспечение для расчета скорости роста толщины покрытия в заданной точке подложки и прогнозирования формы распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности в зависимости от технологических факторов операции напыления.

2. Экспериментально определить численные значения коэффициентов модели, обусловленные осаждением напыляемого материала и техническими параметрами установки.

3. На основе результатов математического моделирования определить наиболее рациональные кинематические режимы установки, обеспечивающие заданную равномерность наносимых покрытий.

4. Предложить способ модернизации серийных вакуумных установок для нанесения тонкопленочных покрытий с обеспечением заданной в КД равномерности на основе применения полученных расчетных и экспериментальных результатов.

Объектом исследования являются тонкопленочные функциональные покрытия, входящие в конструкцию деталей приборов гироскопического направления.

Предметом исследования является задача обеспечения равномерности тонкопленочных покрытий на основе выбора рациональных режимов магнетронного распыления.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в работе использовались методы аналитической геометрии, теоретической механики, математического анализа, компьютерного моделирования и экспериментальные исследования.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель для оценки скорости роста толщины покрытия в рассматриваемой точке подложки при её планетарном движении, как в прямом направлении, так и в обратном, впервые учитывающая отношения частот вращения сателлита к водилу планетарного механизма, расстояния от поверхности распыления и углов направленности и падения с учётом коэффициентов максимума диаграммы направленности распыления от мишени и напыляемого материала.

2. Создан пакет прикладных программ, основанный на разработанной математической модели и реализующий методику расчетов для скорости роста покрытия в рассматриваемой точке на поверхности подложки, находящейся в планетарном движении. Результатом работы пакета прикладных программ является банк данных, отражающий изменение кинематических и геометрических параметров в процессе напыления, а на их основе – итоговое распределение толщины покрытия по напыляемой поверхности.

3. Экспериментально определены коэффициенты напыляемого материала и режима работы распылительной системы для таких материалов как хром, алюминий, титан, композит TiAl, что позволяет обосновывать технологические режимы во взаимосвязи с кинематическими параметрами при модернизации имеющихся и при разработке новых установок магнетронного напыления.

Практическая значимость работы

1. Создана инженерная методика выбора технологических режимов магнетронного распыления с раздельных мишеней одно- и двухкомпонентных покрытий с обеспечением их заданной в КД разнотолщинности за счет перемещения напыляемых деталей гироскопических приборов по расчетным циклоидальным траекториям благодаря применению новой конструкции механизма карусели, позволяющей сообщать планетарному механизму одновременно два независимых вращательных движения. На планетарный механизм карусели и способ напыления подана заявка на изобретение. Разработана система управления приводами вращательных движений карусели.

2. Разработаны и внедрены в производство технологические режимы маг-

нетронного нанесения тонких пленок из различных материалов на различные подложки. Экспериментально установлены наиболее рациональные технологические режимы нанесения хрома, алюминия, композита TiAl на подложки из кварцевого стекла с обоснованием необходимости термической обработки кварцевого стекла перед напылением для исключения отслаивания покрытий. Также установлены режимы напыления цветных металлов с высокой электропроводностью – меди и алюминия с созданием покрытий толщиной 40...80 нм – на детали гироприборов с исключением островковости.

3. На основе экспериментальных исследований установлено, что двухкомпонентные покрытия TiAl обладают высокой селективностью при плазмохимическом травлении (ПХТ) кварца и рекомендуются в качестве материала маски толщиной 20 мкм и более для операции ПХТ в технологическом процессе изготовления кварцевой пластины маятникового акселерометра, обеспечивая на пластинах создание не только столбиков высотой 30 мкм, но и лунок глубиной до 230 мкм.

4. Предложенные конструктивно-технологические решения позволили снизить неравномерность толщины покрытий.

Методы исследований и достоверность результатов. Теоретические исследования базировались на законе Кнудсена-Ламберта в сочетании с анализом кинематики плоского движения методами теоретической механики. Обоснованность теоретических выводов с использованием корректных математических приемов подтверждена экспериментальными данными, полученными лично соискателем. При обработке данных были использованы методы математической статистики.

Экспериментальные исследования включали напыление одно- и двухкомпонентных покрытий на магнетронной установке UniCoat600 с планетарным движением подложек. Толщины покрытий определяли профилографированием на профилографе модели Form Talysurf 420. Данные исследования проводились в филиале ФГУП «ЦЭНКИ»-«НИИ ПМ им. акад. В.И.Кузнецова». Химическую стойкость покрытий определяли при ПХТ кварца на установке Caro-line 15 PE в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрические свойства покрытий исследовались на кафедре технологий приборостроения МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Рекомендации к внедрению. Результаты, полученные в диссертации, используются в филиале ФГУП «ЦЭНКИ»-«НИИ ПМ им. акад. В.И.Кузнецова» в технологических и производственных работах при разработках и напылении тонкопленочных функциональных покрытий. Результаты работы могут быть также рекомендованы к применению для технологии нанесения функциональных покрытий на поверхности деталей, изготавливаемых предприятиями АО «МЗЭМА», ОАО «Серпуховский завод «Металлист», ОАО «НИИ командных приборов».

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель формирования скорости роста толщины покрытия в различных точках для случаев одно- и двух- магнетронного нанесения тонких пленок как на неподвижную подложку, так и на подложку, совершающую планетарное движение;

- результаты исследований нанесения тонкопленочных покрытий для различных материалов мишеней при варьировании технологическими режимами напыления;
- методика выбора технологических режимов магнетронного распыления с раздельных мишеней одно- и двух- компонентных покрытий с обеспечением их заданной в КД разнотолщинности за счет перемещения подложки по расчетной циклоидальной траектории;
- рекомендации по улучшению технологического процесса напыления за счет применения новой конструкции механизма карусели, позволяющий сообщать планетарному механизму одновременно два независимых вращательных движения.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследований диссертации докладывались на 1-ой, 2-ой «Всероссийской конференции молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора академика АН СССР В.И. Кузнецова» в 2013 г., 2014 г., г. Москва.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 11 научных работах, 8 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 2,1 п. л., подана заявка на изобретение.

Личный вклад автора. Провёл анализ методов и средств изготовления покрытий с установлением перспективности магнетронного распыления как при напылении однокомпонентных, так и многокомпонентных электропроводящих, резистивных металлических покрытий; разработал математическую модель и программное обеспечение для определения распределения толщины покрытий по напыляемой поверхности; реализовал экспериментальные исследования по магнетронному напылению одно- и двух- компонентных покрытий с обеспечением их равномерности, осуществил измерения геометрических и электрических свойств нанесенных покрытий, разработал инженерную методику выбора технологических режимов магнетронного распыления для обеспечения заданной равномерности покрытий.

Структура и краткое содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и приложения. Работа содержит 205 страниц, включая 109 рисунков, 22 таблицы и список литературы из 94 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе проведен анализ технологии, методов и средств изготовления тонкоплёночных функциональных покрытий, который показал перспективность магнетронного распыления применительно к функциональным покрытиям деталей гироскопических приборов.

Благодаря результатам деятельности таких ученых как В.И. Кузнецов, Н.А. Пилигин совершенствование гироскопических систем включено в программы ракетно-космической отрасли по освоению космического пространства при помощи ракет-носителей, разгонных блоков, космических аппаратов (КА) и орбитальных станций. Основой гироскопических систем являются гироскопы и акселерометры. В

работах А.М. Курбатова, Р.А. Курбатова, С.Ф. Коновалова, А.Р. Бахратова показано, что точность гироскопических систем обеспечивает применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и маятниковых акселерометров (МА).

Исследования В.Б. Волынцева, Д.С. Пономарева показали, что точность ВОГ определяется стабилизацией распределения температуры в его объеме, которая, в связи с требованиями минимизации массогабаритных характеристик, обеспечивается применением электронагревательного элемента. Представленная на Рис. 1, а конструкция нагревательного элемента, применяемая в настоящее время, не обеспечивает параметров нагрева, характерных для высокоточных ВОГ, а также трудоёмка технология его изготовления. Поэтому предлагается напылять на диэлектрическую подложку резистивное покрытие однородным слоем без операции подбора сопротивления.

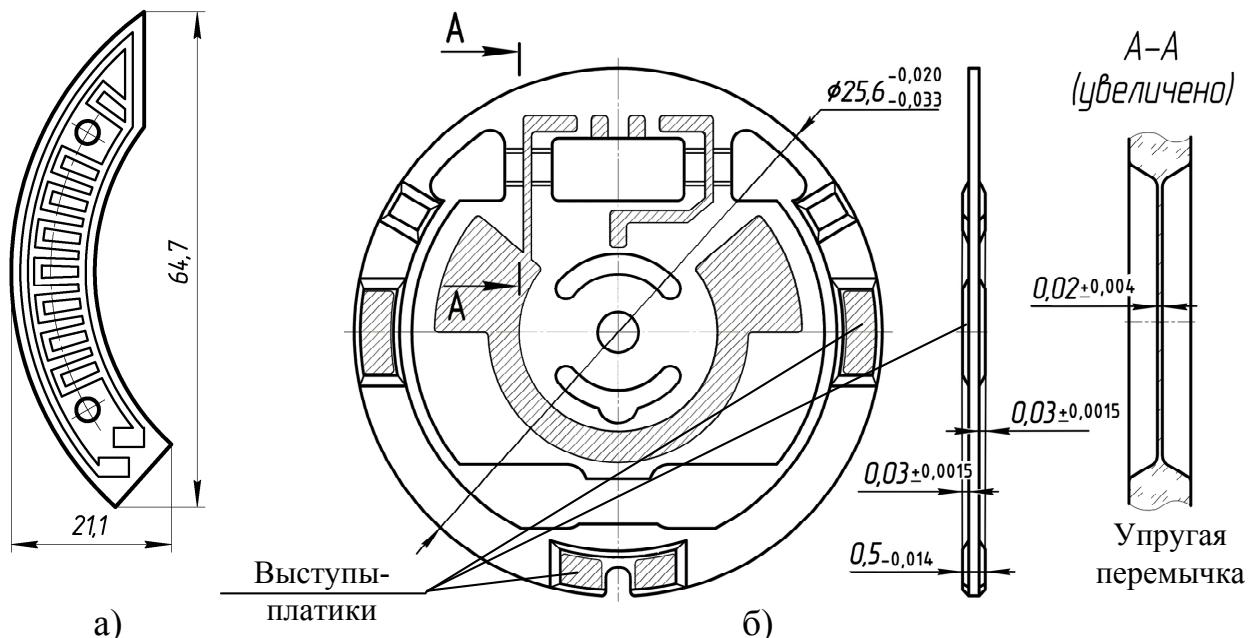


Рис. 1. Общий вид нагревательного элемента (а) и пластины МА (б)

Другим примером использования тонкопленочных покрытий в конструкциях ЧЭ является подвес МА. Точность МА связана и с применением в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) кварцевой пластины, конструкция которой представлена на Рис. 1, б. Повышение точности МА может быть достигнуто при выполнении следующих условий:

- обеспечение равномерности толщины токопроводящего золотого покрытия на подслое из хрома;
- обеспечение одинаковости высоты предусмотренных в конструкции пластины выступов;
- обеспечение одинаковости глубины предусмотренных конструкцией пластины углублений, формирующих рабочие перемычки.

Выступы и углубления на пластине МА предусмотрено получать методом плазмохимического травления, используя в качестве маски химическистойкое тонкопленочное покрытие.

Таким образом, в современном цикле производства высокоточных ВОГ и МА для обеспечения равномерности покрытий необходимо совершенствовать тех-

нологию их нанесения.

Для уменьшения отклонений от равнотолщинности тонкопленочных покрытий в основном наиболее эффективно используют такие технологические решения, как мультимагнетронное напыление (С.В. Тимаков, Ю.В. Панфилов, Д.В. Духопельников, В.А. Васильев, S. Yasushi, J. Musil, P.J. Kelly, R.D. Arnell), варьирование формами магнетронов (В.В. Одиноков, Г.Я. Павлов, E. Shidoji), перемещение источника испаряемого материала по заданному закону (В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков), перемещение напыляемых деталей относительно системы распыления материала по круговой (Е.В. Берлин, Е.Н. Котликов, Г.В. Качалин, N. Koji, Y. Kimisumi, Shao-Kai Pei) и сложной траекториям (А.В. Федотов, Ю.А. Агабеков, А.М. Сутырин, Н.С. Сочугов, К. Матл).

При этом возможности обеспечения равнотолщинного покрытия за счет подбора кинематических режимов при напылении до сих пор не уделялось достаточного внимания. Наиболее универсальным перемещением подложки в установках с магнетронным распылением металла в настоящее время является кинематика планетарного движения.

Поскольку для создания каждого из рассматриваемых покрытий требуется применение нескольких функциональных материалов, целесообразной представляется дуальная схема напыления при сложной траектории движения напыляемых подложек – с применением технологической оснастки карусельного типа. Предпочтительно вертикальное расположение напыляемой поверхности детали, поскольку при этом минимизируется загрязнение напыляемого покрытия при использовании магнетронов протяженной конструкции.

Для обеспечения равномерности покрытия, наносимого с применением технологической системы, видится решение задачи нахождения наиболее рациональной кинематики движения подложек относительно мишней, поскольку ейделено мало внимания и исследования, позволяющих прогнозировать форму и толщину распределения покрытия по напыляемой поверхности, носят ограниченный характер.

Во второй главе приведена математическая модель формирования толщины покрытия при различных режимах напыления, произведен анализ ожидаемого распределения толщины тонкопленочного покрытия и представлен алгоритм вычисления толщины покрытия.

В рамках решения первой задачи отметим, что обеспечить равномерность толщины покрытия можно, зная скорость роста толщины в каждой точке напыляемой поверхности. Предложена математическая модель, устанавливающая зависимость скорости ξ роста толщины покрытия от факторов процесса напыления. Модель базируется на законе Ламберта-Кнудсена, т.е. предполагает косинусоидальную зависимость ξ от углов направленности и падения. Кроме того, скорость роста толщины покрытия ξ обратно пропорциональная квадрату расстояния между рассматриваемой точкой на поверхности детали и источником напыляемого материала.

Предполагается, что в произвольной точке A поверхности детали скорость роста ξ толщины покрытия по закону Ламберта-Кнудсена будет определяется величиной

$$\xi = K \cdot \frac{h_m}{\rho^2} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\varepsilon , \quad (1)$$

где

K – коэффициент осаждения материала, мкм·мм²/частица;

h_m – максимум диаграммы направленности распыления, частиц/с;

ρ – расстояние от источника до рассматриваемой точки, мм;

φ – угол направленности, соответствующий рассматриваемой точке A ;

ε – угол падения для точки A .

Новизна предлагаемой модели заключается в том, что рассматриваются мгновенные значения указанных углов и расстояний, учитывая, таким образом, их изменения в процессе сложного движения деталей относительно мишеней. Модель также включает коэффициенты максимума диаграммы направленности распыления от мишени и осаждения формируемого покрытия, определяемые экспериментально.

Определение ожидаемого распределения толщины покрытия вдоль поверхности детали сводится к расчету скорости роста толщины ξ по формуле (1), в которой величины K и h_m принимаются за постоянные и определяются экспериментально, а искомые параметры для математической модели (Рис. 2) имеют вид

$$\rho = \sqrt{\chi_A^2 + \eta_A^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\chi_A}{\eta_A}, \quad \varepsilon = \theta + \beta + \varphi, \quad (2)$$

причем

$$\begin{aligned} \chi_A &= -\chi_\Omega + \frac{L}{\cos\theta} \sin\theta - R \sin\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r \sin(\theta + \beta) - x_A \cos(\theta + \beta); \\ \eta_A &= L - R \cos\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r \cos(\theta + \beta) + x_A \sin(\theta + \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где

χ_A, η_A – координаты рассматриваемой точки A с системе координат $\chi\Omega\eta$, связанной с точкой эмиссии Ω ;

χ_Ω – координата точки пересечения плоскости магнетрона с плоскостью симметрии камеры;

L – расстояние от центра планетарного механизма до плоскости магнетрона;

θ – угол наклона магнетрона к фронтальной плоскости камеры;

n – соотношение между частотами вращения сателлита и водила планетарного механизма;

R – радиус водила планетарного механизма;

r – радиус расположения напыляемых деталей на сателлите планетарного механизма;

x_A – координата рассматриваемой точки A в системе координат xy , связанной с деталью.

Величины, входящие в выражения (1) – (3), находят по формулам, выводимым при рассмотрении геометрических задач, соответствующих вариантам встречного и попутного вращения сателлита и водила при прямом и обратном

ходах планетарного механизма. При этом т. Ω совмещена с источником напыляемого материала, а т. A – это текущая рассматриваемая точка на напыляемой поверхности детали. В качестве постоянных параметров рассматриваются: длина водила R , радиус r расположения деталей на сателлите, размер D вакуумной камеры, расстояние χ_Ω до плоскости симметрии камеры и угол θ наклона магнетрона к фронтальной плоскости. Переменными параметрами являются углы α и β поворотов вокруг своих осей водила и сателлита – с водилом связана система координат XOY , с сепаратором – xoy , а с мишенью магнетрона $\chi\Omega\eta$.

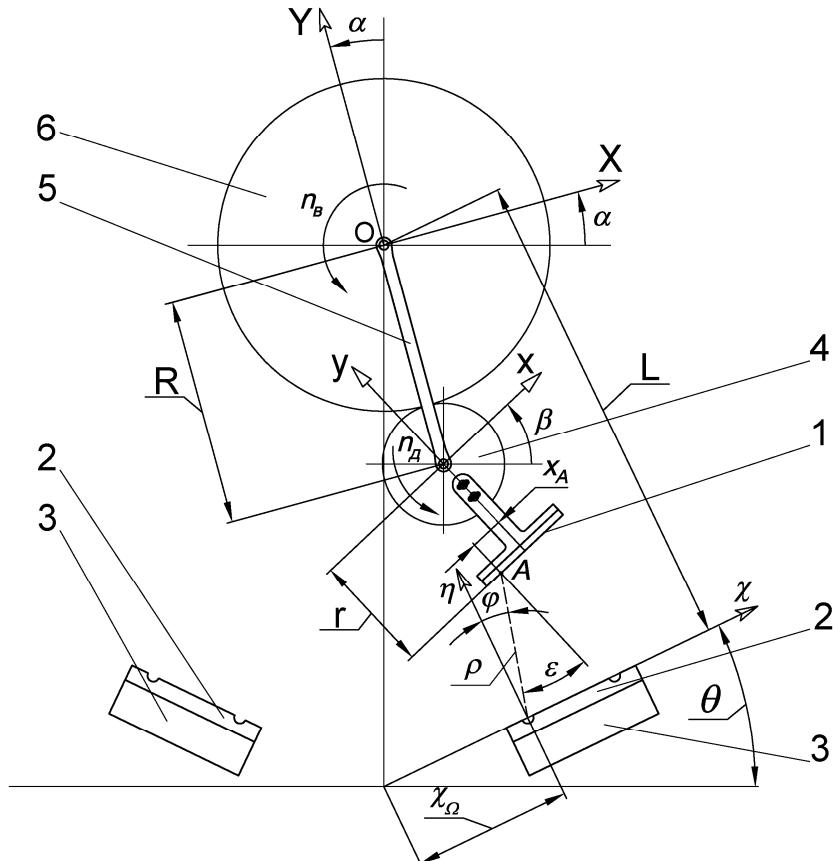


Рис. 2. Расчетная схема магнетронного напыления на установке с планетарным движением подложки: 1 – подложка; 2 – мишень; 3 – магнетрон; 4 – сателлит планетарного механизма; 5 – водило; 6 – внутреннее зубчатое колесо

Методика определения ожидаемой формы распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности сводится к следующему.

Поскольку между частотами вращения сателлита и карусели установки имеется жесткая кинематическая связь, то имеет место соотношение $\beta = n \cdot \alpha$, и областью определения аргументов полученных математических моделей является диапазон

$$-(90^\circ + \theta)/n < \alpha < (90^\circ - \theta)/n. \quad (4)$$

Расчет начинается с положения, при котором углу α соответствует его нижнее граничное значение из области определения (4). Для этого положения величину, рассчитываемую по формуле (1) принимают за мгновенную ожидаемую долю толщины напыляемого покрытия во всех перебираемых точках A от рассматриваемого источника, сохраняя результат в виде массива.

Входящие в формулу (1) величины ρ , φ и ε при этом рассчитывают по формулам (2), (3). Далее задаются элементарным приращением $d\alpha$ и осуществляют рекуррентную замену $\alpha=\alpha+d\alpha$, для каждого из значений α , повторяя описанную выше процедуру. Для каждой текущей точки A на поверхности подложки процесс напыления от рассматриваемого источника Ω происходит при выполнении условия $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$, где $\alpha_{\min} = \beta_{\min} / n$ и $\alpha_{\max} = \beta_{\max} / n$. Полученные значения приращений толщины покрытия в рассматриваемых точках A накапливают, представляя соответствующие элементы массива в виде накопленных сумм. Вычисления заканчивают, когда текущее значение угла α становится больше верхней границы области определения (4) для всех источников.

Выполняя расчет для различных координат точек x_A напыляемой поверхности, можно получить график распределения напыляемого материала на поверхности детали в виде зависимости $H = f(x_A)$, который и представляет собой искомое расчетное распределение толщины напыляемого покрытия по поверхности детали. В качестве характеристики неравномерности нанесения покрытия приняли величину σ , равную отношению разности между максимальной и минимальной толщиной покрытия к его средней толщине.

Таким образом, предложенная математическая модель для вычисления скорости роста толщины покрытия при различных вариантах движения подложки относительно магнетронной распылительной системы позволяет определять распределение толщины покрытия по напыляемой поверхности. Необходимо отметить, что её применение основано, в том числе, на численных значениях коэффициентов максимума диаграммы направленности и осаждения формируемого покрытия.

Третья глава посвящена решению двух задач: нахождению численных значений коэффициентов максимума диаграммы направленности и осаждения формируемого покрытия и математическому моделированию по определению рациональных кинематических режимов технологического оборудования, обеспечивающих заданную равномерность покрытий, наносимых на детали гиropриборов.

Методика определения коэффициентов заключалась в следующем. Напыление производили на подложку, располагаемую неподвижно на фиксированном расстоянии напротив единичного магнетрона параллельно его плоскости, за определенное время. Замеряли толщину покрытия H в нескольких точках вдоль напыляемой поверхности. Для каждой точки вычисляли скорость напыления и определяли произведение коэффициентов $K \cdot h_m$. Далее вычисляли коэффициент осаждения K напыляемого материала, исходя из расстояний между узлами кристаллической решетки и учитывая, что алюминий, медь и золото формируют покрытие с гранецентрированной кубической решеткой, хром и никель – с объемно-центрированной кубической решеткой, а титан – с максимально плотной гексагональной решеткой.

Для реализации этой методики была проведена модернизация установки UniCoat600 (Рис. 3), которая заключалась в оснащении её дополнительным единственным магнетроном, расположенным удаленно от системы сдвоенных магне-

tronov. Это позволило:

- экспериментально установить численные значения коэффициентов максимумов диаграмм направленности h_m и осаждения формируемых покрытий K ;

- получить форму распределения толщины напыленного покрытия, дополняющую до равномерной, создаваемой системой сдвоенных магнетронов.

Дополнительно разработана система управления двигателем карусели, создающая возможность возвратно-вращательного движения подложки, что расширяет возможности создания взаимно компенсирующих форм распределения толщины покрытий.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного варианта подложек применяли плоские образцы из керамики (в том числе, содержащие выступы и впадины), ситалла, алюминиевых сплавов, коррозионно-стойких и конструкционных сталей. Кроме того, применяли образцы цилиндрической, сферической и сложной пространственной формы. Толщину покрытия измеряли на профилографе-профилометре Talysurf 420 PGI по величине формируемого с применением маски уступа.

На основании экспериментальных данных были получены численные значения коэффициентов максимумов диаграмм направленности h_m и осаждения K формируемых покрытий, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты осаждения покрытия K и максимума диаграммы направленности h_m

Материал покрытия	Режим			$K, \text{ мкм} \cdot \text{мм}^2/\text{частицу}$	$h_m, \text{ частиц}/\text{с}$
	Схема напыления	$I, \text{ А}$	$p, \text{ Па}$		
Cr	Единичный боковой магнетрон	4,5	0,16	$8,6 \cdot 10^{-18}$	$9,3 \cdot 10^{17}$
TiAl	Дуальное напыление	12/6,0	0,16	$1,4 \cdot 10^{-17}$	$6,5 \cdot 10^{16}$
Al	Дуальное напыление	5,4/5,1	0,30	$1,2 \cdot 10^{-17}$	$7,0 \cdot 10^{16}$
Ti	Дуальное напыление	8,5/8,7	0,30	$1,4 \cdot 10^{-17}$	$3,1 \cdot 10^{16}$

I – анодный ток магнетрона; p – давление в камере

В свою очередь, определенные коэффициенты могут положить начало для формирования базы данных подобных коэффициентов для изготовления

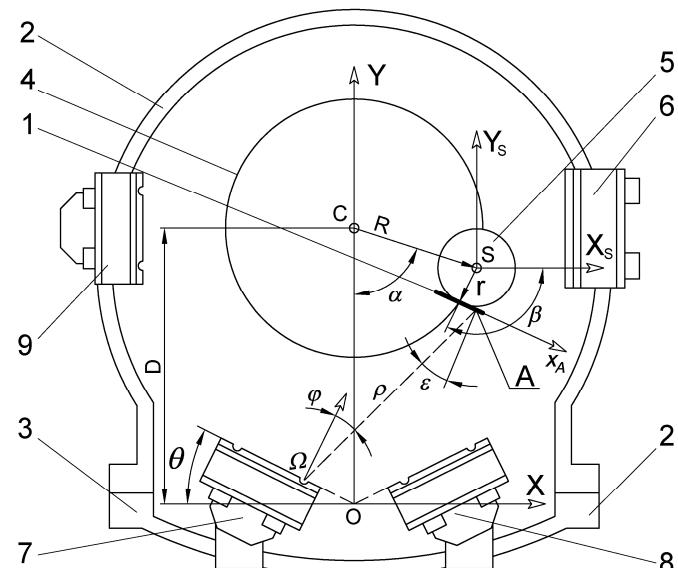


Рис. 3. Схема экспериментальной магнетронной установки: 1 – подложка, 2 – камера, 3 – дверь камеры, 4 – водило карусели, 5 – сателлит, 6 – ионный источник, 7, 8 – дуальная система магнетронов, 9 – боковой единичный магнетрон

ответственных деталей гироприборов с функциональными покрытиями.

Дополнительно оценивали селективность травления покрытия TiAl относительно кварца для формирования выступов и впадин на кварцевой пластине маятникового акселерометра и обосновывали возможность замены жидкостного травления кварца плазмохимическим. Экспериментально достигнута высота выступов в диапазоне 25...30 мкм.

Вторая часть данной главы посвящена определению рациональных кинематических режимов на установках магнетронного напыления с планетарным движением подложки, обеспечивающих заданную равномерность покрытий, наносимых на детали гироприборов.

Для вычислений распределения толщины покрытия при различных режимах напыления разработан работающий в среде MathLab пакет компьютерных. Рассматриваются неподвижная или движущаяся (в одном направлении или возвратно-вращательно) деталь у единичного или сдвоенных магнетронов. Изменяемыми конструктивными параметрами являются: расстояние от центра планетарного механизма до плоскости магнетрона L , радиус водила R , радиус расположения деталей r , расстояния до точечных источников магнетронов χ_Ω , угол наклона магнетрона θ , соотношение между частотами вращения сателлита и водила n , взятое со своим знаком и учетом характера вращательного движения, и значения коэффициентов, характеризующих технологические режимы напыления, определенные ранее.

По результатам работы программы строится эпюра распределения толщины покрытия (Рис. 4) вдоль напыляемой поверхности с информацией о средней толщине слоя. Отклонения расчетных значений от полученных экспериментально составляют 10-15%.

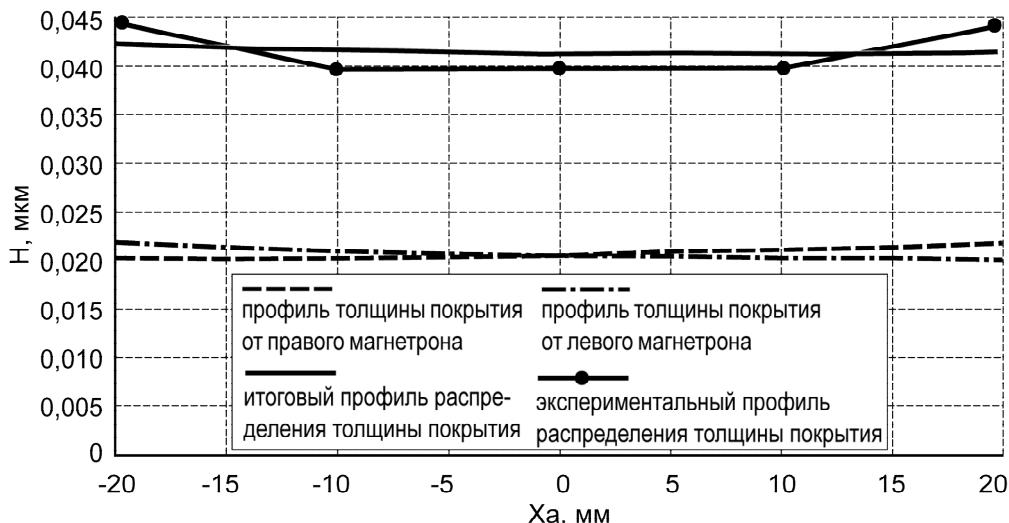


Рис. 4. Эпюры распределения толщины покрытия TiAl для кварцевой пластины

Проведены серии расчетов с перебором по углам наклона магнетронов в пределах $\theta = 0^\circ \dots 40^\circ$, а также соотношению частот n и относительных направлений вращения водила и сателлитов в пределах $-6 \leq n \leq 6$. Результаты этих расчетов, представленные на Рис. 5, позволили определить рациональные кинематические режимы напыления (Табл. 2).

Из рассмотрения приведенных в Таблице 2 результатов можно видеть, что имеется обеспечивающий минимум отклонения от равнотолщинности угол симметричного наклона магнетронов к фронтальной плоскости камеры при дуальной схеме напыления одного материала. Также имеются обеспечивающие минимум отклонения от равнотолщинности соотношения между частотами вращения напыляемых деталей гироприборов вокруг осей вращений сателлита и водила планетарного механизма карусели, как при дуальном напылении, так и при напылении от единичного бокового магнетрона.

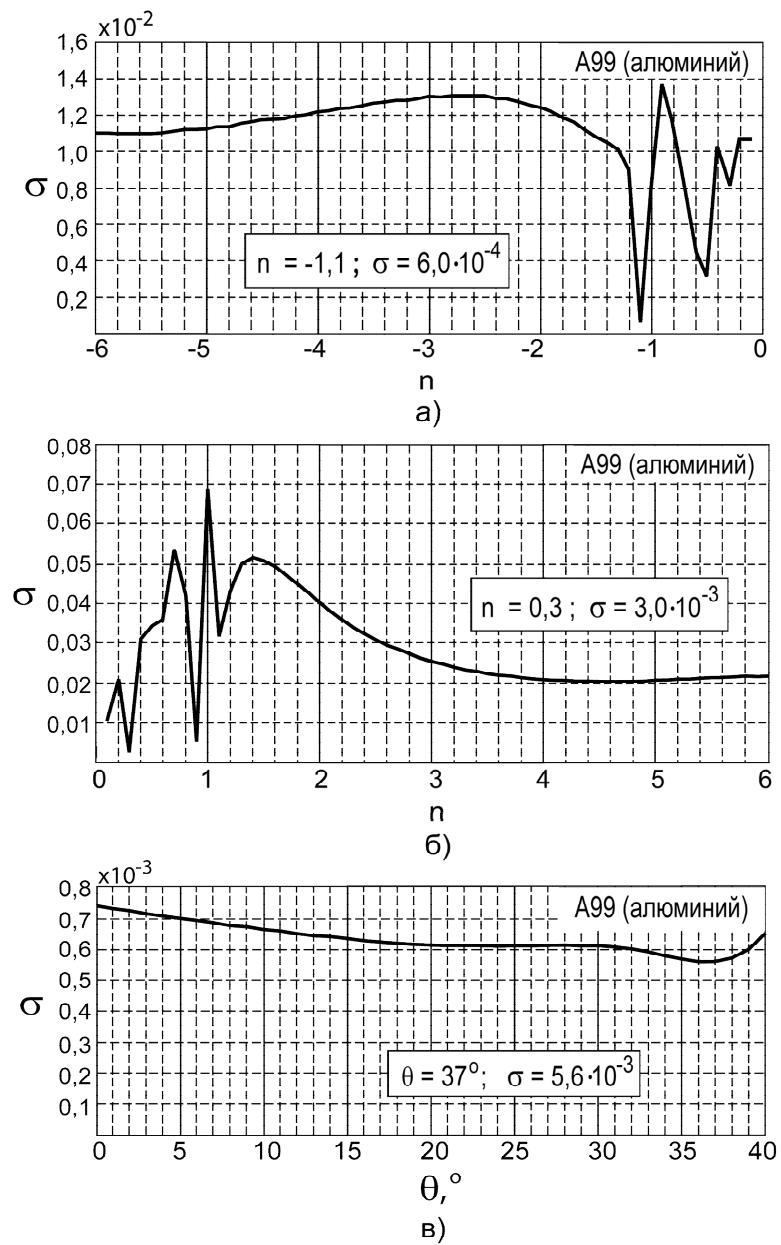


Рис. 5. Графики изменения параметра неравномерности покрытия σ в зависимости от изменения соотношения частот n (а, б) и угла наклона θ (в)

Таблица 2.

Рациональные кинематические режимы напыления

Материал покрытия	Схема напыления	Соотношение между частотами вращения сателлита и водила n	Угол наклона магнетрона $\theta, ^\circ$
Cr	Единичный боковой магнетрон	3,4	0
TiAl	Дуальное напыление	-1,1	$\theta_\text{Л} = 38$ $\theta_\text{П} = 40$
Al	Дуальное напыление	-1,1	38
Ti	Дуальное напыление	-1,1	37
$D = 300 \text{ мм}, R = 145 \text{ мм}, r = 37 \text{ мм}, \chi_{\Omega_1} = 101 \text{ мм}, \chi_{\Omega_2} = 138 \text{ мм.}$			

Разработанная методика позволяет на этапе технологической подготовки производства определять необходимые конструктивные параметры установки и технологической оснастки, а также кинематические режимы движения напыляемой детали.

В четвертой главе, в рамках решения четвертой задачи разработана инженерная методика построения операции магнетронного напыления покрытий на детали гироприборов, вариант модернизации серийных вакуумных установок, на основе полученных расчетных и экспериментальных результатов и описывается новая конструкция планетарного механизма карусели с рассмотрением примеров её использования, приводится анализ результатов экспериментальных исследований и внедрения.

Инженерная методика построения операции магнетронного напыления покрытий на детали гироприборов заключается в том, что, используя разработанный пакет прикладных программ, рассчитывают ожидаемое распределение толщины покрытия по напыляемой поверхности детали. Исходными данными при этом являются: расстояние L от центра планетарного механизма до плоскости магнетрона; конструктивные размеры магнетронов χ_Ω для каждого из источников напыляемого материала; радиусы водила R и расположения напыляемых деталей r , а также полученные эмпирически численные значения коэффициентов K и h_m , характеризующих соответственно напыляемый материал и режим напыления. Варьируемыми переменными являются: соотношение между частотами вращения водила и сателлита карусели n (с учетом знака); характер движения напыляемой детали – вращательное или возвратно-вращательное; схема напыления (от единичного или сдвоенного магнетронов); углы θ наклона магнетронов. Результатами расчетов являются эпюры распределения толщин покрытия, позволяющие выбрать вариант, соответствующий цели выполняемого перехода – минимальная разнотолщинность покрытия, выбор выпуклой или вогнутой формы или направленности распределения толщины в ту или иную сторону детали.

Для обеспечения возможности реализации выбранной кинематики напыления покрытий на изготавливаемые детали гироприборов даны решения по модернизации вакуумной установки UniCoat600, заключающиеся, в частности, в снабжении её усовершенствованным планетарным механизмом движения подложки (Рис. 6). Новая конструкция позволяет обеспечивать независимое регулирование частот вращения водила и внутреннего зубчатого колеса планетарного механизма. На устройство планетарного механизма и способ напыления подана заявка на изобретение.

Анализ результатов экспериментальных исследований в сочетании с имитационным компьютерным моделированием распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности подложки позволил внедрить в производство ряд конструкторско-технологических решений. В частности, разработана операция нанесения хромового покрытия на подложку из кварцевого стекла. Данное покрытие можно использовать как в качестве подслоя для нанесения золота на пластину МА, так и в качестве резистивного элемента электронагревателя ВОГ. Применение возвратно-вращательного движения при дуальной схеме напыле-

ния позволило создать качественное резистивное покрытие NiCr на керамике. При этом напыляется подслой хрома.

Негативные последствия излишней жесткости титанового покрытия можно исключить, напыляя Ti совместно с Al, создавая при этом композиционное покрытие TiAl толщиной 20 мкм и более. Сравнительные исследования хрома и композита TiAl в качестве материала маски для ПХТ кварцевого стекла показали, что, если селективность травления покрытия из хрома составляет около 19, то в тех же условиях покрытие TiAl обеспечивает селективность 26.

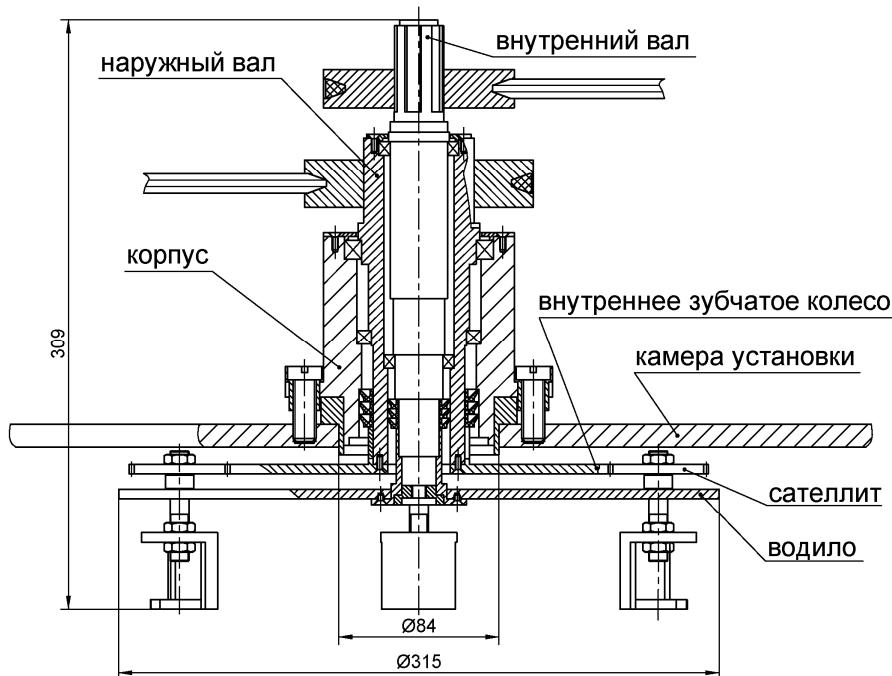


Рис. 6. Новая конструкция планетарного механизма

Напыление равномерного тонкого слоя покрытия из меди, осуществляющееся на режимах, подобранных для напыления подложек, конфигурация которых существенно отличается от плоской, позволяет применять пайку в технологических процессах сборки тонкостенных корпусных деталей гироприборов из алюминия.

Повышение качества наиболее тонких слоев цветных металлов высокой электропроводности позволяет применять их в качестве металлического покрытия в оптике для создания плазмонных эффектов.

Вышеописанные операции и ряд других технологических операций реализуются на новом участке элионных технологий на оборудовании, реализующем различные методы напыления. При выработке технических заданий на это оборудование были использованы результаты, полученные в рамках выполнения настоящей работы.

В заключение подведены итоги и сформулированы основные выводы.

Приложение включает документы о внедрении результатов работы и материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Анализ литературных источников, отраслевой конструкторско-

технологической документации показал, что эксплуатационные свойства гироскопических приборов во многом определяются качеством изготовления деталей с функциональными покрытиями. Анализ оборудования для нанесения тонкопленочных покрытий для деталей гироскопических приборов показал, что обеспечение отклонений от равнотолщинности менее 10% представляет собой технологическую проблему.

2. Разработана математическая модель, устанавливающая текущую скорость роста толщины тонкопленочного покрытия в рассматриваемой точке напыляемой поверхности детали при её планетарном движении в прямом и в обратном направлениях. Модель учитывает соотношение (с учетом знака) частот вращения сателлита и водила планетарного механизма, расстояния от поверхности распыления и углы направленности и падения, а также коэффициенты осаждения напыляемого материала и максимума диаграммы направленности, определенные экспериментально.

3. Экспериментально определены численные значения коэффициента осаждения K , отражающего влияние на скорость роста толщины покрытия напыляемого материала, и коэффициента максимума диаграммы направленности распыления h_m , отражающего влияние технологического режима магнетронного напыления, для материалов Cr, TiAl, Al, Ti. Это позволяет рассчитывать численные значения ожидаемого распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности деталей гироскопических приборов.

4. На основе анализа результатов математического моделирования предложена инженерная методика расчета углов наклона магнетронов и соотношений частот вращения планетарного механизма (с определением рациональных значений этих величин), обеспечивающая заданные в КД на детали гироприборов отклонения от равнотолщинности покрытий (неравномерность не превышает 1 %), а также получать необходимую форму распределения толщины покрытия (симметричную или асимметричную, выпуклую или вогнутую).

5. В частности, для деталей гироскопических приборов целесообразно предусмотреть возвратно-вращательный режим движения подложки, а операцию напыления осуществлять первоначально у единичного магнетрона, расположенного фронтально к плоскости подложки, обеспечивая выпуклую форму, а затем – у системы сдвоенных магнетронов, наклонно расположенных к фронтальной плоскости вакуумной камеры, характеризующейся созданием вогнутой формы.

6. Разработаны рекомендации по синтезу технологического оборудования и средств технологического оснащения для магнетронного напыления рассматриваемой группы деталей гироскопических приборов. В частности требуемая кинематика напыления может быть обеспечена приводом, в котором, например, за счёт добавления наружного полого вала, реализована независимая передача вращения на сателлиты и водило планетарного механизма, их одно- и разноправленное вращение, а также реверсируемость каждого из вращений.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Совершенствование технологического процесса изготовления пластины маятникового акселерометра / А.В. Шишлов [и др.] // Естественные и технические

ские науки. 2012. № 6. С. 369-376. (0,6 п.л./0,15 п.л.)

2. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Обеспечение равномерной толщины тонкопленочных покрытий при изготовлении пластины маятникового акселерометра // Научное обозрение. 2013. № 2. С. 71-75. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

3. Применение нанотехнологических методов для изготовления пластины маятникового акселерометра / А.В. Шишлов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 6 (18). URL <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/805.html>. (0,6 п.л./0,15 п.л.)

4. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Методика расчёта толщины покрытия маски при изготовлении пластины маятникового акселерометра // Всероссийская конференция молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора академика АН СССР В.И. Кузнецова: сборник докладов. Москва, 2013. С. 245-257. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

5. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Расчет неравномерности толщины слоя при магнетронном напылении // Естественные и технические науки. 2014. №8 (76). С. 83-85. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

6. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Оценка неравномерности скорости магнетронного напыления на установках с планетарным перемещением заготовки // Научное обозрение. 2014. №4. С. 54-59. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

7. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Анализ распределения толщины тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении на установках с планетарным перемещением подложки // Наука и образование. 2014. №11. С. 458-481. URL <http://technomag.bmstu.ru/doc/733662.html>. DOI 10.7463/1114.0733662.

8. Шишлов А.В., Сагателян Г. Р. Расчет скорости напыления в точках подложки при ее планетарном перемещении на установках со сдвоенными магнетронами // Техника машиностроения. 2014. Т. 21. Вып. 4 (92). С. 11-16: ил. 3. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

9. Шишлов А.В., Сагателян Г.Р. Методика расчета толщин покрытия в различных точках поверхности заготовки при напылении на магнетронных установках с планетарным механизмом // Приборы. 2015. №3. С. 37-45. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

10. Установка карусельного типа для магнетронного напыления многослойных покрытий и способ магнетронного напыления равнотолщинного нанопокрытия: заявка на изобретение 2015120001 РФ / С.Б. Одиноков [и др.]; заявл. 27.05.2015. (1,2 п.л./0,2 п.л.)

11. Сагателян Г.Р., Демидов П.С., Шишлов А.В. Расчет распределения толщины покрытия при магнетронном напылении // Естественные и технические науки. 2015. № 6 (84). С. 339-340. (0,2 п.л./0,07 п.л.)