

На правах рукописи

ВОРОБЬЕВ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

МЕТОД ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ
УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ И СКОРОСТИ ЭРОЗИИ
ПОВЕРХНОСТИ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергетические установки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва, 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Духопельников Дмитрий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Надирадзе Андрей Борисович**
доктор технических наук, профессор
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Твердохлебова Екатерина Михайловна
кандидат технических наук, заместитель
начальника центра автоматических
космических систем и комплексов
акционерного общества «Центральный
научно-исследовательский институт
машиностроения» (АО ЦНИИмаш)

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»)

Защита состоится «27» мая 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент



Егоров К.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ресурс электростатических ионных и холловских электроракетных двигателей ограничивается ионным распылением поверхностей их элементов. Эрозия, вызванная ионной бомбардировкой, изменяет профиль поверхности элементов ионно-оптической системы электростатических двигателей, что приводит к потере их механической прочности, а также к обратному потоку электронов из катода-нейтрализатора. Эрозия стенок ускорительного канала холловских двигателей приводит к изменению его геометрии и, как следствие, рабочих параметров двигателей.

Ресурс современных электроракетных двигателей достигает нескольких десятков тысяч часов, при скорости эрозии поверхности – 10 – 100 нм/ч (для ионных двигателей). Наиболее точные измерения профиля эрозии элементов электроракетных двигателей производятся при помощи профилометров, разрешение которых на практике не лучше 2 мкм. Поэтому для обеспечения высокой точности глубина эрозии должна составлять от нескольких десятков до сотен мкм, что требует проведения испытаний длительностью несколько сотен часов. Такие эксперименты являются очень трудоемкими и дорогими. Поэтому на начальных этапах разработки двигателей их проводить нецелесообразно. Существующие же оптические методики *in-situ* измерений скоростей эрозии имеют недостаточное пространственное разрешение, и, зачастую, позволяют измерить лишь их относительные значения.

Помимо электроракетных двигателей измерение профилей эрозии актуально в ионно-плазменных устройствах. Например, при разработке ионных источников для ионно-лучевого формообразования необходимо измерять профиль эрозии обрабатываемой ионным пучком поверхности. Применение профилометров затруднено большой площадью поверхности и сложностью маскирования отдельных ее элементов, а интерферометрические методы доступны не каждому коллективу разработчиков ионных источников. Кроме того, как и в случае электроракетных двигателей, затруднительно измерять эрозию поверхностей сложной формы.

Профиль и скорости эрозии под действием ионной бомбардировки можно измерять при помощи многослойных покрытий, нанесенных на исследуемую поверхность и состоящих из чередующихся слоев оптически контрастных материалов. При распылении покрытия неоднородным ионным пучком на поверхности проявится контрастная картина, состоящая из чередующихся разноцветных полос, по которым можно определить профиль эрозии. Регистрация изображений возможна при помощи простых оптических приборов. В тоже время, в литературе такому методу измерения эрозии уделяется очень мало внимания: не разработаны методы расчета количества и толщин слоев, определения порядка следования слоев в покрытии, оценки погрешностей измерений.

Таким образом, актуальность работы обусловлена следующим:

В настоящее время не существует полноценной методики измерений профиля износа поверхностей элементов электрических ракетных двигателей, не требующей проведения длительной стендовой наработки.

Разработка методики определения профиля и скорости эрозии элементов электроракетных двигателей при помощи многослойных покрытий позволит многократно сократить длительность их испытаний на начальных стадиях разработки.

Цель работы:

Разработка теоретической и методической базы ускоренных испытаний электроракетных двигателей для определения профиля эрозии их элементов при помощи многослойных покрытий, наносимых на всю площадь исследуемой поверхности.

Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются:

- разработка теоретической модели формирования контрастной картины при распылении многослойного покрытия неоднородными ионными потоками и критериев выбора параметров многослойных покрытий: материалов отдельных слоев, их толщин и количества;

- разработка и экспериментальная верификация метода построения профиля эрозии поверхности по контрастным картинам распыления многослойных покрытий, выработка критериев применимости метода и анализ погрешностей построения профиля.

- исследование влияния шероховатости поверхности на точность построения профиля эрозии;

- разработка методики определения порядка следования слоев по изображениям распыленного покрытия без применения средств разрушающего контроля;

- экспериментальное подтверждение применимости разработанной методики на примере исследования эрозии ускоряющего электрода ионного двигателя, полюсного наконечника двигателя с анодным слоем, а также поверхности, обработанной ионным пучком холловского ускорителя.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспечена использованием общеизвестных физических моделей и математических методик и подтверждена всесторонними экспериментальными исследованиями, проводимыми на каждом этапе работы. Достоверность экспериментальных исследований гарантируется применением современной и проверенной аппаратной базы, апробированных методик измерения, а также многократной проверкой полученных результатов с использованием различных способов и измерительных приборов.

Научная новизна работы:

- Разработана теоретическая модель формирования контрастной картины распыления многослойных покрытий неоднородными ионными потоками;

- разработаны и экспериментально обоснованы критерии и методика выбора оптически контрастных материалов и параметров многослойных покрытий для различных условий ионной бомбардировки;

- разработан новый метод определения порядка следования слоев в многослойном покрытии по изображениям распыленного покрытия без применения средств разрушающего контроля, или заранее внесенных маркеров;

- разработан способ определения координат границ полос по изображениям распыленных многослойных покрытий и метод построения профиля эрозии поверхности электроракетных двигателей при помощи многослойных покрытий;

- разработана методика оценки погрешности измерений, вносимой шероховатостью исходной поверхности образца.

Практическая значимость работы:

- Разработанная методика позволяет на этапе экспериментальной отработки новых моделей электроракетных двигателей сократить время эрозионных испытаний более чем в 20 раз без форсирования режима работы и изменения конструкции двигателя. Определение профиля эрозии производится в любом месте исследуемой поверхности;

- разработанная методика позволяет определять характер профиля эрозии поверхности элементов электроракетных двигателей на больших площадях невооруженным взглядом без применения каких-либо средств измерений;

- результаты работы были использованы при разработке «Методики диагностирования эрозии поверхностей с использованием многослойных покрытий».

Апробация работы. Результаты работы докладывались на двух конференциях: XIV Международной научно технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2019) и 68th International Astronautical Congress: Unlocking Imagination, Fostering Innovation and Strengthening Security, (Аделаида, 2017), а также представлены в двух научно-технических отчетах. По результатам работы разработана «Методика диагностирования эрозии поверхностей с использованием многослойных покрытий» в рамках НИР, проводимых по заказу Госкорпорации «Роскосмос».

Личное участие автора. Автор лично разработал теоретическую модель распыления многослойных покрытий и методику расчета их параметров. Автором лично проведены все экспериментальные исследования по определению влияния шероховатости и градиента плотности ионного тока на точность построения профиля эрозии. Автор разработал методику определения последовательности расположения слоев в многослойном покрытии по изображениям и методику построения профиля эрозии. Автором были вычислены параметры многослойного покрытия для проведения испытаний по исследованию эрозии ускоряющего электрода высокочастотного ионного двигателя и произведена обработка результатов

этих испытаний. Автором проведены эксперименты по исследованию эрозии внутреннего полюса магнитной системы двигателя с анодным слоем и эрозии поверхности под действием ионного пучка ускорителя с азимутальным дрейфом электронов.

Положения, выносимые на защиту:

- Теоретическая модель формирования контрастной картины при распылении многослойного покрытия неоднородными ионными пучками;
- критерии и методика выбора параметров многослойного покрытия для проведения испытаний по исследованию эрозии элементов электроракетных двигателей и метод построения профиля эрозии поверхности по картинам распыления многослойного покрытия;
- методика определения порядка следования слоев в многослойном покрытии по контрастным картинам распыления;
- результаты оценки влияния шероховатости исследуемой поверхности на точность получения профилей эрозии;
- результаты экспериментов, демонстрирующих применение разработанного метода для исследования эрозии поверхности ускоряющего электрода ионно-оптической системы ионного двигателя, полюсов магнитной системы холловского двигателя, а также эрозии поверхности под действием ионного пучка технологического ионного источника.

Соответствие паспорту специальности

Соответствие диссертации формуле специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов» (технические науки): диссертационная работа посвящена разработке метода испытаний для ускоренного определения профиля и скорости эрозии поверхностей рабочих элементов электрических ракетных двигателей под воздействием ионной бомбардировки. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.07.05.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 172 страницах, содержит 101 иллюстрацию и 10 таблиц. Библиография включает 163 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ литературных данных посвященных исследованиям ресурса электроракетных двигателей и измерению профилей износа поверхностей их элементов. Приводится анализ основных механизмов выхода из строя электростатических ионных и холловских электроракетных двигателей. Проанализированы методы ускорения ресурсных испытаний двигателей, существующие методы и

оборудование для измерения профиля эрозии поверхности элементов электроракетных двигателей, существующие работы, посвященные использованию многослойных покрытий для диагностики распыления.

Из проведенного анализа сделаны выводы:

1. Основной причиной выхода из строя электростатических двигателей является эрозия внешней стенки ускоряющего электрода под действием бомбардировки ионами перезарядки. В холловских двигателях выход из строя также вызывается ионным распылением стенок ускорительного канала.

2. Длительность стендовой наработки при проведении ускоренных ресурсных испытаний зависит от возможности применяемых измерительных приборов измерять малые значения глубины эрозии исследуемых элементов.

3. Наиболее точные измерения профилей эрозии элементов электроракетных двигателей производятся при помощи оптических профилометров. В условиях экспериментов по испытанию электроракетных двигателей они обеспечивают вертикальное разрешение не лучше 2 мкм.

4. Работы, посвященные применению многослойных покрытий для диагностики эрозии элементов электроракетных двигателей, в литературе встречаются очень редко. В существующих работах не уделяется внимание вопросам расчета параметров покрытий, точности определения профиля эрозии, подготовке поверхности, а также используются слишком сложные способы определения порядка следования слоев в покрытии, требующие его полного разрушения.

5. Параметры работы электростатических ионных двигателей и двигателей с анодным слоем практически не зависят от материала электродов, что позволяет применять многослойные покрытия для диагностики их эрозии.

6. При использовании многослойных покрытий вертикальное разрешение определения профиля эрозии равно толщине отдельных слоев, входящих в состав покрытия. При толщине слоев, равной 60 нм, многослойные покрытия обеспечивают минимум 30-кратное снижение времени эксперимента.

7. Особенно актуально проведение испытаний с применением многослойных покрытий на начальных этапах разработки новых моделей электроракетных двигателей и при переходе на альтернативные рабочие вещества, когда требуется быстрая оценка влияния параметров работы двигателя на эрозионные характеристики.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование методики измерения эрозии поверхности под действием ионных пучков при помощи многослойных покрытий, сформулированы критерии выбора параметров многослойных покрытий и материалов слоев, а также критерий применимости метода для количественного определения профиля и скорости эрозии поверхности элементов электроракетных двигателей.

Процесс распыления многослойных покрытий характеризуется эффективным коэффициентом распыления – коэффициентом распыления поверхности эквивалентным моноэнергетическим пучком с энергией ионов

$\varepsilon_{i \text{эфф}}$, при которой удельная скорость распыления равна удельной скорости распыления исследуемым немонотонным пучком:

$$S_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} f(\varepsilon_i) S(\varepsilon_i) d\varepsilon_i = S(\varepsilon_{i \text{эфф}}) = k \cdot S(\langle \varepsilon_i \rangle)$$

где $f(\varepsilon_i)$ – функция распределения ионов по энергиям; $S(\varepsilon_i)$ – коэффициент распыления материала ионами с энергией ε_i ; k – численный коэффициент; $S(\langle \varepsilon_i \rangle)$ – коэффициент распыления при энергии равной средней энергии ионов в пучке; $\langle \varepsilon_i \rangle$ – средняя энергия ионов в пучке.

Углы выработки поверхности α_i под воздействием неоднородных ионных пучков и ширины видимых полос b_i , образованных при распылении многослойного покрытия такими пучками (Рисунок 1) определяются выражениями:

$$\text{tg}(\alpha_i) = K_i t \cdot \frac{dj}{dx}, \quad b_i = \frac{\delta_i}{K_i t \cdot \frac{dj}{dx}}, \quad K_i = \frac{M_i S_{i \text{эфф}}}{q \rho_i}$$

где t – полное время распыления многослойного покрытия; $\frac{dj}{dx}$ – градиент плотности ионного тока; δ_i – толщина отдельного слоя многослойного покрытия; K_i – удельная скорость распыления; M_i и ρ_i – масса атома и плотность материала слоя; q – заряд иона.

Показано, что эти выражения справедливы для многослойных покрытий любой структуры и состава.

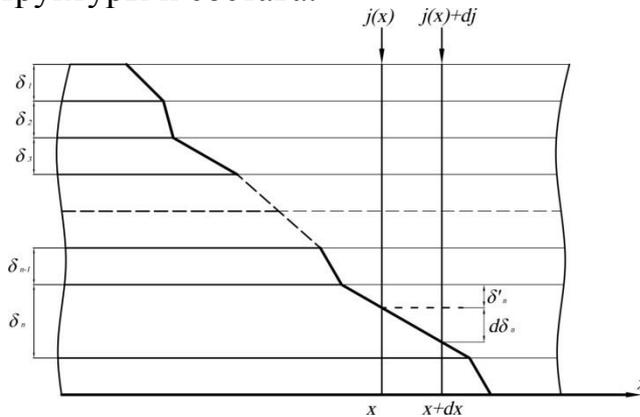


Рисунок 1. Распыление диагностических многослойных покрытий

По известному профилю эрозии многослойного покрытия могут быть определены плотности ионного тока на исследуемой поверхности:

$$j(x, y) = \frac{1}{t_{\text{СКВ}}} \sum_{i=1}^m \frac{n_i(x, y) \delta_i}{K_i} \quad (1)$$

где (x, y) – координаты рассматриваемой точки, лежащей на границе полосы; $n_i(x, y)$ – количество слоев i -го материала, распыленных в данной точке за время сквозного травления многослойного покрытия $t_{\text{СКВ}}$.

Сформулирован критерий выбора количества и толщин слоев диагностического многослойного покрытия, обеспечивающего наибольшее разрешение:

Параметры покрытия выбираются таким образом, чтобы при заданном времени эксперимента $t_{\text{СКВ}}$ и разрешении оптической системы r была обеспечена возможность измерения ширины наиболее узкой полосы на изображении контрастной картины эрозии.

При использовании двух материалов для отдельных слоев параметры многослойного покрытия, удовлетворяющие этому критерию, определяются выражениями:

$$n = \frac{j_{\max}}{2b_{\min} \cdot \left(\frac{dj}{dx}\right)_{\max}} \quad (2)$$

$$\delta_1 = b_{\min} \cdot K_1 \cdot t_{\text{СКВ}} \cdot \left(\frac{dj}{dx}\right)_{\max}$$

$$\delta_2 = b_{\min} \cdot K_2 \cdot t_{\text{СКВ}} \cdot \left(\frac{dj}{dx}\right)_{\max}$$

где n – количество пар слоев в многослойном покрытии; δ_1 и δ_2 – толщины отдельных слоев; $b_{\min} = Z \cdot r$ – минимальная ширина слоя, которую возможно точно измерить при помощи оптической системы; j_{\max} , $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{\max}$ – максимальные значения плотности и градиента плотности ионного тока в пучке. Последние два параметра оцениваются из предварительных экспериментов, или рассчитываются теоретически.

Материалы, применяемые для нанесения слоев многослойного покрытия должны иметь высокую контрастность по отношению друг к другу и материалу исследуемого элемента электроракетных двигателей, высокие значения удельной скорости распыления, высокую адгезию к подложке и между собой, хорошо известные значения коэффициентов распыления в диапазоне энергий исследуемого ионного потока, а также высокую технологичность. В качестве одного из материалов должна выступать медь, имеющая высокую контрастность по отношению ко всем остальным металлам и высокую скорость распыления. При исследовании эрозии титанового ускоряющего электрода ионного двигателя наиболее подходящим вторым материалом является хром.

Вводится понятие эквивалентного профиля эрозии – это профиль поверхности элемента электроракетных двигателей, изготовленного из массивного материала, который сформируется в результате ионной бомбардировки при тех же условиях и в течение того же времени, что и при распылении поверхности с многослойным покрытием. Эквивалентный профиль определяется с помощью выражений:

$$\delta_{\text{эл}}(x) = \frac{\sum \delta_1(x)}{L_1} + \frac{\sum \delta_2(x)}{L_2}, L_1 = \frac{K_1}{K_{\text{эл}}}, L_2 = \frac{K_2}{K_{\text{эл}}} \quad (3)$$

где x – латеральная координата; $\delta_{\text{эл}}(x)$ – эквивалентный профиль эрозии; $\sum \delta_1(x)$ и $\sum \delta_2(x)$ – суммарные толщины слоев, полностью распыленных в точке x ; L_1 , L_2 – коэффициенты ускорения испытаний.

Для того чтобы форма профиля эрозии поверхности многослойного покрытия совпадала с формой эквивалентного профиля эрозии элемента электроракетных двигателей необходимо, чтобы на всей площади исследуемой поверхности выполнялось условие

$$\frac{\sum \delta_1(x) + \sum \delta_2(x)}{\delta_{эл}(x)} = const.$$

Для этого необходимо выполнение хотя бы одного из условий: 1) функция распределения ионов по энергиям была одинакова на всей исследуемой поверхности; 2) отношения коэффициентов распыления материалов слоев и электрода должны быть постоянны во всем диапазоне энергий ионов в пучке. Последнее выполняется, если энергия ионов превышает 400 – 500 эВ.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что наиболее подходящим объектом для исследования эрозии при помощи многослойных покрытий является ускоряющий электрод ионно-оптической системы ионных двигателей, так как функция распределения бомбардирующих его внешнюю поверхность ионов перезарядки неизменна по всей поверхности, а энергия ионов известна и равна потенциалу электрода. Метод может применяться и для исследования эрозии стенок разрядной камеры двигателей с анодным слоем, так как в этом случае функция распределения бомбардирующих ионов по энергиям слабо зависит от координат точек поверхности. В технологических ионных источниках, работающих при напряжениях разряда 2 – 3 кВ, выполняется вторая часть представленного критерия – постоянство отношений коэффициентов распыления, что позволяет применять многослойные покрытия для исследования профиля эрозии поверхностей, обработанных ионным пучком таких источников.

В третьей главе приводится описание экспериментальных стендов, электрических ракетных двигателей и ионных источников, а также аналитического оборудования, которые использовались в работе. Описываются методы подготовки поверхности образцов и нанесения многослойных покрытий.

Для проведения экспериментальной отработки метода в работе использовались высокочастотный ионный двигатель ВЧИД ММ, разработанный в НИИ ПМЭ МАИ, лабораторный образец двигателя с анодным слоем ДАС-40, а также ионные источники с анодным слоем ИИ-100 и ИИ-100К. При начальной отработке методики использовались цилиндрические модельные образцы, изготовленные из нержавеющей стали.

Перед нанесением покрытий поверхность образцов шлифовалась и полировалась при помощи станка *Struers Tegramin-25* до достижения параметра *Ra* шероховатости значений 0,0008, 0,026, 0,088 и 0,189 мкм. Поверхность ускоряющего электрода ВЧИД ММ перед нанесением полировалась вручную до шероховатости *Ra*=0,01 мкм.

Нанесение покрытий осуществлялось на промышленной напылительной установке методом магнетронного распыления. Покрытия состояли из чередующихся пар слоев из двух материалов, одним из которых всегда являлась медь, а другим – хром, титан, алюминий, или цирконий.

Перед нанесением покрытия производилась ионная очистка подложек. Для обеспечения равномерности толщины покрытий образцы размещались на вращающемся подложкодержателе, а нанесение осуществлялось через выравнивающие маски. В результате неравномерность наносимых покрытий на всей поверхности образцов не превышала 2%.

Прямые измерения профиля эрозии производились при помощи профилометра *KLA-Tencor Alpha-Step D-600*. Исследование поверхности распыленных многослойных покрытий осуществлялось при помощи микроскопа *CarlZeiss AxioImager Z2m* с разрешением от 2,58 мкм (объектив 5x) до 0,26 мкм (объектив 100x). Освещение поверхности производилось по методу светлого поля. Фоторегистрация поверхности ускоряющего электрода ВЧИД ММ на стенде производилась при помощи фотоаппарата *Canon EOS 7D*. Обработка полученных изображений для построения профилей эрозии по распределению яркостных каналов производилась при помощи штатного программного обеспечения микроскопа.

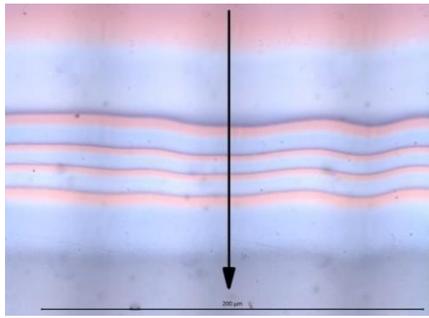
В четвертой главе приводится описание последовательности построения профиля эрозии по изображению распыленного многослойного покрытия, методики определения границ полос на изображении и порядка расположения слоев в покрытии. Производится оценка погрешностей определения профиля и определяется максимальная шероховатость поверхности, при которой возможны измерения. Приводятся критерии выбора минимальной толщины слоев покрытий. Производится верификация результатов измерения профиля эрозии. Приводится последовательность проведения испытания электроракетного двигателя для определения профиля эрозии поверхности с использованием многослойных покрытий.

Для построения профиля поверхности выбирается начало координат и направление. В качестве начала координат выбирается точка с известной глубиной эрозии. Она должна лежать либо в области, не подвергавшейся распылению, либо там, где покрытие распылено насквозь. Построение профиля производится по границам полос на изображении:

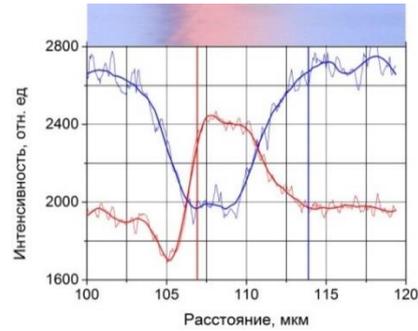
$$h(x_{i+1}) = h(x_i) \pm \delta_j$$

где δ_j – толщина слоя; $j = 1, 2$ в зависимости от материала слоя; x_i – латеральные координаты границ между полосами разного цвета; знак в правой части выбирается в зависимости от порядка расположения слоев. Границы полос на изображении определяются по графикам распределения интенсивности синего, или красного канала на цветном RGB изображении вдоль выбранного направления (Рисунок 2).

На основе анализа зависимостей коэффициентов отражения покрытий из различных материалов от толщины сделан вывод, что если границе двух полос на изображении присутствует темная область, то в медный слой находится ниже, чем слой из другого материала (Рисунок 3). Таким образом, можно однозначно по изображению распыленного многослойного покрытия определить порядок расположения слоев.

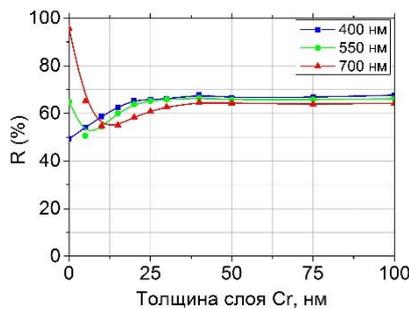


а

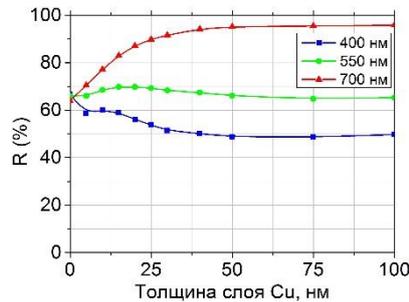


б

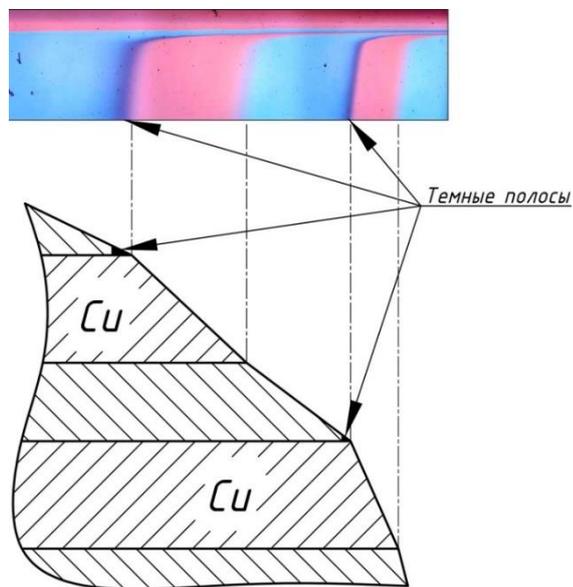
Рисунок 2. Определение координат границ полос на изображении а – фотография распыленной поверхности; б – распределение интенсивности красного и синего канала на увеличенном участке изображения



а



б



в

Рисунок 3. Определение порядка следования слоев по изображению а – зависимости коэффициента отражения слоев Cr на медной подложке от толщины; б – зависимости коэффициента отражения слоев Cu на хромовой подложке от толщины; в – темные области на изображении

Погрешность определения профиля эрозии покрытия складывается из двух составляющих – горизонтальной и вертикальной. Горизонтальная погрешность определяется разрешением оптической системы (от 0,26 до 2,58 мкм, не более 10% для самых узких полос) и шероховатостью поверхности. В вертикальную погрешность дополнительно вносят вклад неравномерность толщины покрытия ($\approx 2\%$), погрешность определения скорости нанесения ($\approx 1\%$), дискретность процесса нанесения (не более 1,7% для слоев толщиной 60 нм, снижается при увеличении толщины слоя).

Наибольшее влияние на погрешность оказывает шероховатость поверхности, которая приводит к появлению разброса значений

интенсивности $\frac{\Delta \tilde{I}_{ш}}{\tilde{I}_0}$ цветовых каналов, по которым определяются координаты границ полос. Зависимости значения $\frac{\Delta \tilde{I}_{ш}}{\tilde{I}_0}$ от параметра Ra , экспериментально определенные по изображениям распыленных покрытий, полученных при различных увеличениях оптической системы, приведены на Рисунок 4. Для применения предложенного метода определения границ полос шероховатость поверхности должна обеспечивать выполнение критерия:

$$\frac{\Delta \tilde{I}_{ш}}{\tilde{I}_0} < 1 - \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

где R_1 и R_2 ($R_1 > R_2$) – максимальные значения коэффициентов отражения слоев в покрытии (Рисунок 3). В Таблице 1 приведены максимальные значения шероховатости для различных пар материалов и увеличений оптической системы. Для полированной поверхности ($Ra=0,0008$) максимальная погрешность, вызванная шероховатостью, составляет 4,3% (для слоев толщиной 60 нм, снижается при увеличении толщины слоя).

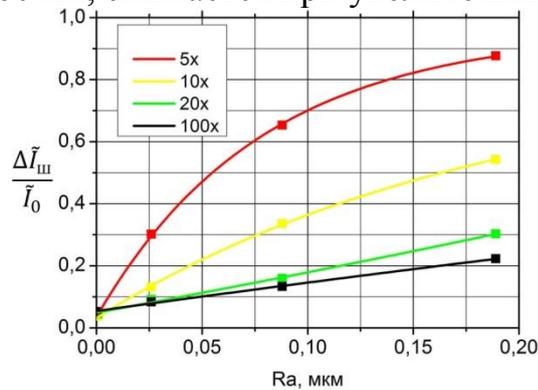


Рисунок 4. Зависимость значений $\frac{\Delta \tilde{I}_{ш}}{\tilde{I}_0}$ от параметра шероховатости

Таблица 1.

Максимальные значения шероховатости для различных пар материалов слоев

Пара	Параметр шероховатости Ra , мкм			
	5x	10x	20x	100x
<i>Cu-Al</i>	0,045	0,14	0,29	0,49
<i>Cu-Cr</i>	0,03	0,084	0,2	0,31
<i>Cu-Ti</i>	0,04	0,12	0,25	0,42

Для минимизации влияния шероховатости и обеспечения максимальной контрастности изображения минимальная толщина отдельных слоев должна обеспечивать их полную непрозрачность (например, для *Cu* – 65 нм, для *Cr* – 40 нм, для *Ti* – 70 нм, для *Al* – 35 нм).

Для верификации методики профиль эрозии многослойного покрытия, полученный по изображениям, сопоставлялся с профилем, измеренным контактным профилометром вдоль одного направления (Рисунок 5, а). Также сопоставлялись нормированные профили эрозии многослойного покрытия и стекла, распыленных в одинаковых условиях ионным пучком ускорителя

ИИ-100 (Рисунок 5, б). Результаты демонстрируют отличное сходство, что свидетельствует о применимости разработанной методики.

Последовательность проведения эрозионных испытаний электроракетных двигателей включает: 1 – вычисление параметров многослойных покрытий по формулам (2) с проверкой толщины слоев на непрозрачность, значения j_{max} и $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{max}$ определяются из коротких предварительных экспериментов либо теоретически; 2 – подготовки поверхности к нанесению покрытия для обеспечения соблюдения критерия (4); 3 – проведения испытания двигателя; 4 – построение профиля эрозии покрытия; 5 – построение эквивалентного профиля эрозии поверхности по выражению (3); 6 – вычисление значений плотности ионного тока (1).

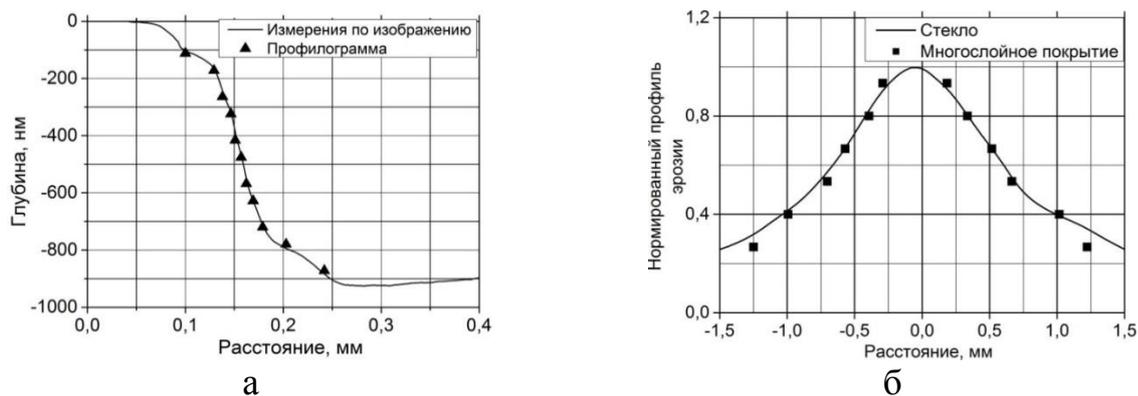


Рисунок 5. Верификация метода

а – профили эрозии покрытия, полученные по изображению и профилометром; б – нормированные профили эрозии покрытия и стекла

В пятой главе приводятся результаты эксперимента, демонстрирующего применимость метода для определения профиля эрозии поверхности ускоряющего электрода ионного двигателя ВЧИД ММ. Производится определение параметров многослойного покрытия для испытания ВЧИД ММ. Также приводятся результаты экспериментов, иллюстрирующих применение метода для исследования эрозии поверхности полюсов двигателя с анодным слоем и поверхности, обработанной ионным пучком технологического ускорителя с анодным слоем.

Вычисление параметров покрытия для испытаний ВЧИД ММ производилось для эксперимента длительностью 20 ч. Разрешение оптической системы (цифрового фотоаппарата) составляло около 10 мкм. Оценочные значения j_{max} и $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{max}$ определялись по опубликованным результатам длительных ресурсных испытаний двигателя NSTAR и составляли $1,1 \text{ А/м}^2$ и 437 А/м^3 . Параметры многослойного покрытия приведены в таблице 2.

Испытание ВЧИД ММ производилось в НИИ ПМЭ МАИ Ахметжановым Р.В. Напряжение на ускоряющем электроде составляло 500 В. Структура эрозии поверхности ускоряющего электрода проявилась уже после 3 часов работы двигателя. Эксперимент проводился до сквозного

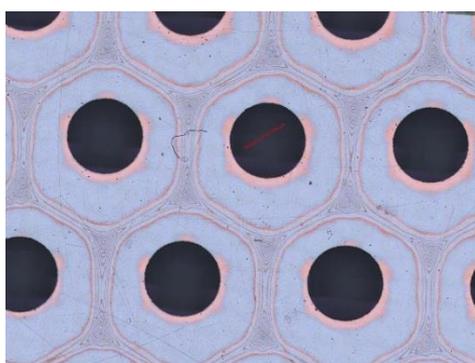
распыления покрытия и был завершен через 14 часов после начала работы. После окончания эксперимента поверхность исследовалась под микроскопом (Рисунок 6, а).

Таблица 2.

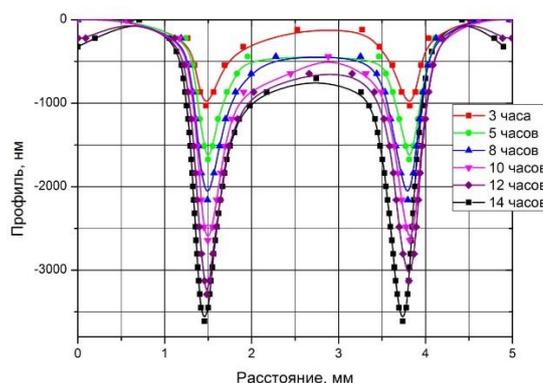
Параметры многослойных покрытий

	ВЧИД ММ	ДАС-40	ИИ-100К
Количество слоев	25	12	8
Материалы слоев	Cr, Cu	Cu, Al	Cu, Al
Нижний слой	Cr	Al	Al
Толщины слоев	Cr: 118 нм Cu: 205 нм	100 нм	100 нм
Общая толщина	3994 нм	1200 нм	800

Профили поверхности, построенные по контрастным картинам распыления многослойного покрытия, имеют характерную для электростатических ионных двигателей структуру ямок и канавок (Рисунок 6, б). Максимальная плотность ионного тока на поверхности электрода составила $0,52 \text{ А/м}^2$ (Рисунок 7). Расчетное моделирование распыления поверхности электрода, проведенное Ахметжановым Р.В., показало сходимость с результатами этого эксперимента в пределах 3%.



а



б

Рисунок 6. Эрозия поверхности ускоряющего электрода ВЧИД
а – фотография поверхности; б – профили эрозии на разных стадиях эксперимента

Эксперимент по исследованию эрозии полюсов магнитной системы двигателя с анодным слоем производился на лабораторной модели двигателя ДАС-40. Многослойное покрытие (Таблица 2) наносилась на поверхность внутреннего полюса, обращенную к аноду. Длительность эксперимента составила 210 с. После демонтажа полюса на его поверхности была отчетливо видна контрастная картина распыления, позволяющая построить профиль эрозии поверхности (Рисунок 8). По полученным данным была оценена максимальная плотность ионного тока – 269 А/м^2 .

Оценка эрозии поверхности под действием ионной бомбардировки важна и в технологических устройствах. При разработке систем ионно-лучевого формообразования для настройки формы ионного пучка

ускорителей необходим инструмент, позволяющий быстро оценить профиль эрозии поверхности (Рисунок 9).

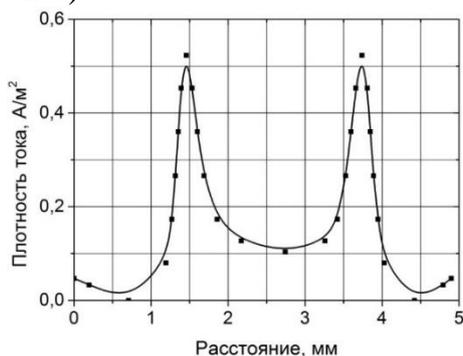
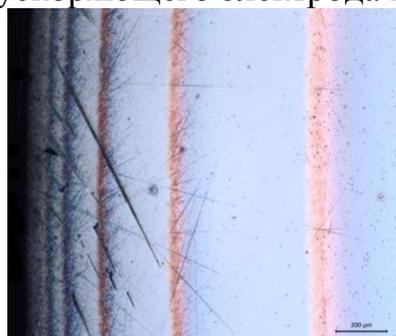


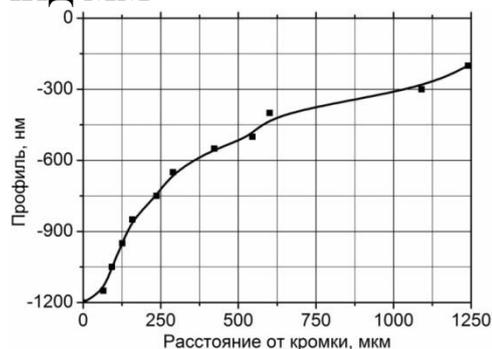
Рисунок 7. Распределение плотности ионного тока на поверхности ускоряющего электрода ВЧИД ММ



а

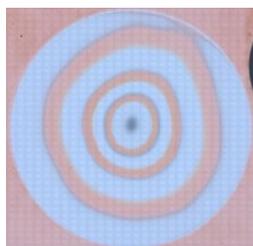


б

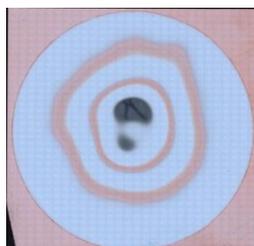


в

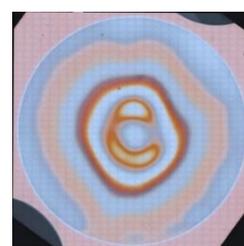
Рисунок 8. Эрозия поверхности внутреннего полюса ДАС-40
а – фотография полюса после эксперимента; б – микрофотография картины эрозии кромки полюса; в – профиль распыленной поверхности покрытия



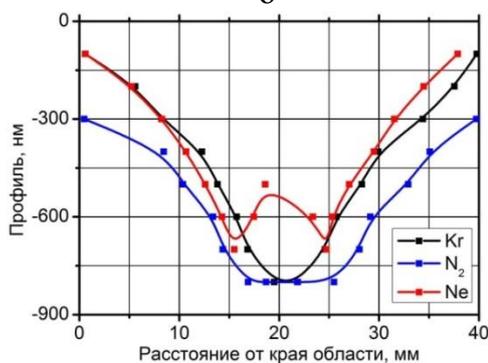
а



б



в



г

Рисунок 9. Эрозия поверхностей с многослойным покрытием, распыленных ионным пучком ускорителя ИИ-100К при работе на различных газах
а – Kr; б – N₂; в – Ne; г – профили эрозии

На поверхности образцов с многослойным покрытием, распыленных при помощи ускорителя с анодным слоем ИИ-100К с фокусированным ионным пучком при работе на различных газах отчетливо видны контрастные картины распыления (Рисунок 9, а, б, в). По изображениям были построены профили эрозии поверхности (Рисунок 9, г). Приведенные результаты полностью соответствуют теоретическим данным о процессе фокусировки ионных пучков в технологических ускорителях с анодным слоем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод определения профиля эрозии поверхности элементов электрических ракетных двигателей, основанный на анализе контрастной картины распыления многослойных покрытий, предварительно нанесенных на всю площадь исследуемой поверхности. Разработана методика расчета параметров многослойных покрытий. Метод позволяет сократить время эрозионных испытаний электроракетных двигателей в 20 – 30 раз.

2. Разработана теоретическая модель формирования контрастной картины при распылении многослойных покрытий неоднородными ионными потоками, основанная на вычислении зависимости углов выработки различных слоев покрытия от градиента плотности ионного тока. Сформулированы критерии и методика выбора параметров многослойных покрытий для исследования профиля эрозии элементов электроракетных двигателей на основе значения разрешения оптической системы, используемой для фоторегистрации изображений. Выбрана предпочтительная пара материалов для исследования эрозии холловских и ионных двигателей – *Cu* и *Cr*, которые обеспечивают высокие значения скоростей распыления, хорошую контрастность изображений и технологичность нанесения.

3. Разработан и экспериментально подтвержден метод построения профиля эрозии поверхности по контрастным картинам распыления многослойных покрытий основанный на анализе распределения интенсивности цветочных каналов цветного изображения картин эрозии и последующем вычислении координат поверхности. Разработаны рекомендации по применению метода для исследования скорости эрозии поверхности электроракетных двигателей с учетом функции распределения ионов по энергиям на исследуемой поверхности. Наиболее точные результаты метод обеспечивает для моноэнергетического ионного потока, характерного для ускоряющего электрода ионных двигателей.

4. Определено влияние шероховатости поверхности на точность построения профиля эрозии. Показано, что для каждой пары материалов и увеличения оптической системы существует предельное значение шероховатости, при которых точные измерения становятся невозможными. Для пары *Cr-Cu* пороговые значения параметра *Ra* составляют от 0,03 мкм для увеличения 5х до 0,31 мкм для увеличения 100х. Для получения наиболее

точных результатов толщина отдельных слоев покрытия должна обеспечивать их непрозрачность (например, для Cu – 65 нм, для Cr – 40 нм, для Ti – 70 нм, для Al – 35 нм).

5. Разработана методика определения порядка следования слоев в многослойном покрытии с использованием изображения распыленной поверхности без применения средств разрушающего контроля. Методика основана на идентификации локального снижения коэффициента отражения многослойного покрытия в выбранном спектральном диапазоне на границе полос.

6. Экспериментально подтверждена применимость разработанного метода для исследования эрозии поверхности ускоряющего электрода ионных двигателей и полюсов магнитной системы холловских двигателей. Разработаны рекомендации по использованию метода и областям его применения, показано, что разработанный метод особенно полезен на начальных этапах разработки новых образцов электроракетных двигателей, а также при переходе на альтернативные формы электродов и рабочие вещества, когда необходимо производить быструю оценку влияния параметров работы двигателя на эрозионные характеристики.

Основные результаты, представленные в диссертации опубликованы в 4 научных статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 из которых проиндексированы в базах Scopus и Web of Science.

1. Technique for the Visualization and Determination of the Surface Erosion Profile Caused by Ion Bombardment / Vorobyev E. V. [at al] // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 10–14. DOI <https://doi.org/10.1134/S1027451016010110>. (0,31 п.л. / 0,21 п.л.).

2. Procedure of Predicting the Lifetime of the Accelerating Electrode of an Ion-Extraction System of a Gas-Discharge Ion Source / Vorobyev E. V. [at al] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13, No. 6. P. 1217–1224. DOI <https://doi.org/10.1134/S1027451019060041>. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

3. Two-Electrode Ion-Extraction System of a Radio-Frequency Ion Source: Numerical and Experimental Studies of Erosion of the Accelerating Electrode / Vorobyev E. V. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13, No. 6. P. 1061–1066. DOI <https://doi.org/10.1134/S1027451019060235>. (0,38 п.л. / 0,15 п.л.).

4. Воробьев Е.В., Духопельников Д.В.. Обоснование методики определения профиля эрозии ускоряющего электрода газоразрядного источника ионов // Вестник московского авиационного института. 2019. №1. С. 152-157. (0,38 п.л. / 0,25 п.л.).