

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Семенова Александра Анатольевича «Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Диссертационная работа А.А. Семенова посвящена исследованию распыления простых керамик и керамических композитов инертными ионами низких энергий. Выбор распыляемых образцов и энергии ионов обусловлен применением керамических материалов в различных ионных и плазменных устройствах, в том числе в электроракетных двигателях.

В процессе работы стенки разрядной камеры подвергаются облучению ионами плазмы с энергией 50-400 эВ. Это приводит к эрозии поверхности за счет ионного распыления. При этом следует учитывать, что температура покрытий может быть достаточно высокой.

Несмотря на то, что распыление твердых тел изучается более 100 лет, и получен огромный экспериментальный и теоретический материал, данных по распылению диэлектрических многокомпонентных керамик крайне мало. Поэтому актуальность темы диссертации А.А. Семенова, в которой экспериментально исследовано распыление при изменении таких параметров, как энергия и угол падения ионов, состав и температура образцов - различных керамических материалов, в том числе используемых в электрореактивных двигателях, не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 103 страницы, включая 42 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы включает 128 наименований. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 14 научных трудах, из них 6 – в рецензируемых научных журналах.

Во введении обоснованы актуальность, научная новизна работы, достоверность представленных в диссертации результатов, отражен личный вклад автора, а также сформулированы пять защищаемых положений.

В первой главе представлен обзор литературных данных по теме диссертационной работы. Рассмотрено применение различных керамик в стационарных плазменных двигателях. Показано, что одной из причин уменьшения ресурса двигателей является деградация стенок разрядной камеры вследствие ионного распыления. Подробно описаны механизмы распыления материалов, параметры, влияющие на коэффициент распыления. Отмечается, что экспериментальные работы по измерению коэффициентов распыления и их зависимостей в большей степени проводились для проводниковых и полупроводниковых материалов, в то время как имеется лишь небольшое количество статей, посвященных изучению распыления керамических материалов. По литературным данным проведено сравнение экспериментальных методик измерения коэффициентов распыления. Проведенный анализ имеющихся работ позволил автору сформулировать задачи данного исследования: измерить интегральные характеристики распыления керамик и их композитов в зависимости от энергии и угла падения ионов, температуры образцов, химического состава поверхности облучаемых мишеней.

Во второй главе достаточно подробно описываются экспериментальная установка и методики проведения экспериментов. Коэффициенты распыления измерялись весовым методом. Это наиболее точный способ определения интегрального коэффициента распыления, требующий больших доз облучения и, соответственно

времени эксперименты. Следует отметить высокий уровень автора, как экспериментатора. Перед проведением измерений зависимостей коэффициента распыления от различных параметров были выполнены дополнительные эксперименты по изучению состава остаточной атмосферы в вакуумной камере, подобраны плотности ионного тока, необходимые для поддержания состояния поверхности свободной от адсорбированных молекул. Это очень важно с точки зрения достоверности полученных результатов, поскольку откачка рабочей камеры производится масляными насосами. При измерении коэффициентов распыления важную роль играет топография поверхности, особенно для керамик, имеющих исходно пористую структуру. В работе предварительно получены зависимости коэффициентов распыления от дозы облучения для всех используемых образцов. Определено, что с увеличением дозы облучения коэффициент распыления уменьшается и при определенных значениях доз для каждого вида керамики достигает стабильного значения. Исходя из полученных данных, автором были выбраны дозы облучения, обеспечивающие стационарный режим распыления.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования зависимостей коэффициентов распыления от энергии и угла падения первичных ионов. Получены данные по распылению простых керамических материалов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , BN, SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и керамических композитов ( $\text{AlN}+\text{BN}$ ,  $\text{Si}_{4.5}\text{Al}_{1.5}\text{O}_{1.5}\text{N}$  (сиалон),  $\text{SiO}_2+\text{BN}$  и др.) ионами Хе с энергией 100 -400 эВ. Получены новые количественные данные о распылении керамических композитов. Практическую ценность представляет база данных по коэффициентам распыления исследованных керамических материалов облучаемых ионами низких энергий. Достоверность представленных результатов подтверждается сравнением и хорошим совпадением с данными других авторов для достаточно хорошо изученного нитрида бора. С научной точки зрения интересным является обнаруженный эффект смещения максимумов угловой зависимости коэффициента распыления при увеличении энергии падающих ионов.

Четвертая глава посвящена исследованию зависимости коэффициентов распыления керамических композитов различного состава от концентрации компонент. В качестве образцов использовались композиты  $\text{SiO}_2+\text{BN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{BN}$  и сиалон с добавками нитрида бора. Концентрация нитрида бора в композите изменялась от 0 до 1. Получены энергические зависимости коэффициентов распыления композитов с различным содержанием нитрида бора, которые для всех образцов близки к линейным. Установлено, что коэффициент распыления композитов уменьшается с увеличением концентрации BN. Наиболее интересным представляется эффект, представленный на рис. 36 (стр. 77). Он заключается в значительном превышении коэффициента распыления композита  $\text{SiO}_2+\text{BN}$  почти в два раза по сравнению с распылением  $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{BN}$  в области концентраций нитрида бора от 0.3 до 0.7.

Результаты по температурной зависимости коэффициентов керамических композитов, представленные в пятой главе, почти все являются новыми и достаточно неожиданными. Известно, что коэффициент распыления большинства материалов практически не зависит от температуры образца вплоть до температур близких к температуре плавления, Исключение, может быть, составляет поведение температурных зависимостей распыления в области фазовых переходов. Полученные данные представляют большой практический интерес: при выборе материала стенок разрядных камер плазменных двигателей следует отдавать предпочтение керамическим композитам, не содержащим диоксид кремния.

В Заключении приводятся основные выводы и результаты диссертационной работы.

Оценивая в целом работу, следует отметить, что получен большой объем

экспериментальных результатов, обладающих научной новизной и практической ценностью. Надежность и достоверность основных полученных автором результатов не вызывает сомнений, что подтверждается тщательной подготовкой проведения экспериментов, применением современных методик исследования распыления твердых тел, сравнением полученных результатов с теоретическими моделями распыления и имеющимися литературными данными.

К числу важных и новых результатов, представленных автором, можно отнести следующие:

1. Экспериментально полученные данные по распылению диэлектрических материалов: простых и композитных керамик ионами низких энергий. Установлены присущие этому классу материалов особенности угловых зависимостей коэффициентов распыления.

2. Впервые измерены коэффициенты распыления композитных керамик с различным содержанием в них нитрида бора. Обнаружен эффект зависимости коэффициента распыления композитной керамики от сопутствующей нитриду бора компоненты.

3. Впервые обнаружено увеличение коэффициента распыления материалов (керамических композитов) при температурах, значительно ниже температуры плавления образцов.

Имеется ряд замечаний по работе.

1. В работе исследуется распыление диэлектрических материалов, однако, эффекты, связанные с зарядкой поверхности не обсуждаются.
2. Поскольку представленные результаты являются экспериментальными, хотелось бы видеть погрешности измерений, которые присутствуют только на рис. 36 на стр. 77 в диссертации и на рис.13 на стр. 16 в автореферате. В тексте работы обсуждаются и даже измеряются возможные источники погрешностей (с. 84-86), однако никаких оценок не приведено.
3. Из текста диссертации не понятно, каким образом измерены концентрации элементов на поверхности композитов (рис.37, стр. 80). Получены эти данные автором или приведены из литературных источников.
4. На мой взгляд, автор не совсем корректен в некоторых терминах. Например, плазмообразующий газ в ионном источнике называется рабочим телом. Однокомпонентный материал является материалом, состоящим из одной компоненты, в то время как в тексте диссертации и автореферате такими называются керамики нитрид бора, диоксид и нитрид кремния и другие двухкомпонентные вещества.
5. Не совсем убедительными представляются предложенные автором объяснения ряда впервые обнаруженных эффектов. В частности, значительного различия коэффициентов распыления композитных керамик, содержащих нитрид бора и диоксид и нитрид кремния (рис. 36). Однако, интерпретация таких результатов прерогатива скорее физиков. Выяснение причин проявления таких эффектов требует дополнительных исследований с привлечением большого числа методов анализа поверхности и может стать, темой новой отдельной исследовательской работы. .

Сделанные замечания не снижают ценности представленной диссертационной работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, докладывались на международных конференциях и известны научной общественности.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В соответствии с Паспортом специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» диссертация включает в себя экспериментальное исследование распыления керамик и керамических композитов, применяемых в качестве защитных покрытий в узлах электрореактивных и плазменных двигателях, ионами низких энергий. Полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности. 1. «Теория и рабочий процесс тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, а также энергетических установок, узлов и систем, включая элементы силовой установки, сопряженные с двигателем». 9. «Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателя, их защита». . 15. «Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации, интенсивность деградации характеристик элементов, узлов и подсистем электрореактивных двигателей и энергетических установок»

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Полученные в диссертационной работе научные материалы по их новизне, объему и практической значимости удовлетворяют требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Семенов Александр Анатольевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,

Ярославский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ),

профессор кафедры «Высшая и прикладная математика»

 Бачурин В.И

Ярославский Филиал ФГБОУ ВПО

«Московский государственный университет путей сообщения»

(ЯФ МИИТ)

150030, г. Ярославль, Суздальское ш., 13

тел./факс (4852) 52-56-72

(4852) 52-56-70

Адрес: 150064 Ярославль, пр. Моторостроителей, д. 2, кв. 84

Телефон: 8-910-970-46-97

Электронная почта: [vibachurin@mail.ru](mailto:vibachurin@mail.ru)

Подпись профессора кафедры «Высшая и прикладная математика» Ярославского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», доктора физико-математических наук, доцента БАЧУРИНА В.И. удостоверяю

И.О. Директора Ярославского филиала МИИТ



 Сайфуллин А.Х