

## О т з ы в

на диссертацию Александра Анатольевича Семёнова "Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

В диссертационной работе А.А.Семёнова выполнены комплексное измерение и анализ эрозионных характеристик используемых в настоящее время и перспективных однокомпонентных и композитных керамик. Тема работы и подход автора к её выполнению представляются чрезвычайно актуальными, как с научной, так и с технической точек зрения, поскольку в настоящее время существует насущная потребность в углублении понимания процессов эрозии керамических материалов при ионном облучении и в создании широкой базы данных о закономерностях поведения керамик при их эксплуатации в условиях высокотемпературного ионно-плазменного облучения. Эти обстоятельства определяют чрезвычайную актуальность работы с научной и технической точек зрения.

Обзор литературы, составляющий содержание первой главы диссертации, достаточно полно освещающий историю вопроса и современное состояние проблемы, позволил автору правильно определить тему и направленность исследований.

Следующие четыре главы посвящены описанию экспериментальной установки и методики проведения экспериментов (глава 2) и изложению деталей экспериментальных исследований и их результатов (главы 3-5).

Материал второй главы свидетельствует о тщательной методической проработке экспериментов. Это относится к выявлению действительных, возможностей экспериментального оборудования, подготовке экспериментальных образцов, разработке планов экспериментов. Работа, выполненная на этом этапе исследования, явилась залогом высокой достоверности полученных результатов и их правильной интерпретации.

В процессе экспериментальных исследований были определены зависимости коэффициентов распыления керамических материалов от дозы облучения, энергии и угла падения ионов, от их состава и температуры.

Можно отметить целый ряд новых результатов, полученных в этих исследованиях. Прежде всего, следует отметить что комплекс,

перечисленных выше зависимостей впервые был измерен для ряда современных композитных и перспективных керамик. Эти результаты дают широкие возможности для понимания особенностей поведения однокомпонентных керамик в условиях композитов и, соответственно, для правильного выбора направления работ по разработке композитов.

Новыми и представляющими безусловный научный и практический интерес являются экспериментально определённые относительные зависимости распыления ряда керамических материалов от угла падения ионов на поверхность, угловые зависимости коэффициента распыления нитрида кремния при различных энергиях ионов, зависимость коэффициента распыления керамических композитов от концентрации нитрида бора и др.

В этой связи, необходимо отдельно указать на интересные результаты измерений и обсуждения зависимости коэффициентов распыления композитов, содержащих нитрид бора от температуры поверхности и зависимости коэффициентов распыления композита  $\text{BN-S}_3\text{N}_4$  от угла падения ионов при различных температурах.

В качестве положительной особенности работы следует отметить то, что автор много внимания уделяет сравнению своих результатов с результатами ранее выполненных работ и аккуратно подходит к определению того нового, что было выявлено в процессе экспериментов.

Вместе с тем, работа не лишена, на мой взгляд, некоторых недостатков.

Схема источника ионов, представленная на рисунке 7, не соответствует описанию источника, дающегося в соответствии с этим рисунком. В частности, магнитная система, устроенная так, как это показано на рисунке, создаёт в источнике ионов продольное магнитное поле, и не создаёт его поперечную составляющую, которая совместно с продольным электрическим полем, должны обеспечивать горение разряда источника.

При перечислении механизмов распыления (раздел 1.2, стр. 15) автор не упоминает ионно-стимулированную десорбцию. Этот механизм активен именно на диэлектрических поверхностях, и, по-видимому, мог играть значительную роль в распылении керамических материалов.

На этой же странице ошибочно упоминается вторичная электронная эмиссия вместо ионно-электронной эмиссии (ИЭЭ) в качестве процесса, сопровождающего ионную бомбардировку поверхности. ИЭЭ пренебрежимо мала при облучении ионами низких энергий диэлектриков, но при облучении большими дозами поверхности некоторых из исследованных керамик ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_{4,75}\text{Al}_{1,5}\text{O}_{1,75}\text{N}$ ) становятся проводящими, и ИЭЭ может давать вклад в измерении электрического заряда, пришедшего на образец.

Предположение о восстановлении состава нитрида бора при распылении  $\text{BN+Si}_3\text{N}_4$  не может объяснить резкое уменьшение его

распыления при концентрации BN выше примерно 20%, даже в предположении полного прекращения распыления. Результаты эксперимента могут объясняться уменьшением коэффициента распыления компонента с большей концентрацией, то есть  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . А это указывает на то, что именно атомы бора перенасылились на поверхность  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , приводя к формированию слоя BN на зёрнах  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , и, следовательно, к замедлению их распыления.

Суммируя всё вышесказанное, я хочу подчеркнуть, что, несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа в целом представляет собой законченное научное исследование, выполненное на достаточно высоком уровне. Работа вносит значительный вклад в понимание процессов на поверхности керамических материалов при ионном облучении, объясняет закономерности поведения керамик при их эксплуатации в условиях высокотемпературного ионно-плазменного облучения, в частности, при их использовании в электрореактивных двигателях и создаёт необходимую базу для дальнейших разработок керамических материалов.

Все основные результаты работы отражены в публикациях (4 работы, опубликованные в рецензируемых журналах).

О достоверности и значимости результатов диссертации говорят успешные результаты её обсуждения на многочисленных международных и отечественных конференциях и семинарах.

Автореферат написан хорошим языком и достаточно полно отражает большой объем исследований, выполненных по теме диссертационной работы.

По своей научной значимости и практической ценности представленная к защите диссертационная работа Александра Анатольевича Семёнова удовлетворяет требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор достоин присуждения степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Профессор  
кафедры Физики плазмы,  
НИЯУ МИФИ  
доктор. физ.-мат.наук.

*Беграмбеков*  
Беграмбеков Л.Б.  
21.09.2015

Подпись Беграмбекова Л.Б.

ЗАВЕРЯЮ



Подпись уполномоченного  
Заместитель начальника  
документационного отдела  
НИЯУ МИФИ

*Л.С. Шамкина*