



Минобрнауки России  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
111250, Россия, Москва,  
Красноказарменная ул., 14,  
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38  
E-mail: universe@mpei.ac.ru  
http://www.mpei.ru

№ 404/520  
«26» 03 2020 г.

В диссертационный совет Д 212.125.15  
на базе ФГБОУ ВО «Московский  
Авиационный Институт (национальный  
исследовательский университет)»  
125993, Москва, Волоколамское ш. д. 4

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор

В.К. Драгунов  
2020 г.



### О Т З Ы В

ведущей организации, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», на диссертационную работу Андриановой Натальи Николаевны «Физико-химические закономерности процессов высокодозного ионного модифицирования углеродных и композиционных материалов для обеспечения их функциональных свойств», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы

**Актуальность темы.** Углеродные и композиционные материалы на их основе используются при изготовлении элементов конструкций для аэрокосмической техники, атомной и химической промышленности, металлургии, энергетики, длительно работающих в условиях воздействия агрессивных сред, высоких температур и радиационных полей различной природы. Широкая область применения этих материалов обусловлена сочетанием таких их уникальных свойств, таких как эрозионная и радиационная стойкость, термостойкость, прочность и коррозионная стойкость, высокая удельная поверхность. Графиты и углерод-углеродные композиционные материалы являются одними из основных материалов ядерных реакторов и разрабатываемых термоядерных установок. В этой связи были и остаются актуальными исследования воздействия частиц и плазмы на углеродные материалы, разработки методов обеспечения функциональных свойств материалов и расширения спектра их применения. Диссертационная работа Андриановой Н.Н. находится в русле отмеченных актуальных научно-технических проблем и посвящена установлению физико-химических закономерностей процессов высокодозного ионного

С отзывом ознакомлена  
26.03.2020г. *[Signature]*

модифицирования углеродных и композиционных материалов для обеспечения их функциональных свойств.

**Общая характеристика работы.** Диссертация содержит семь тематически связанных разделов и логично начинается с анализа фундаментальных процессов при ионном облучении материалов, включающих эрозию поверхности, эмиссию электронов, динамику радиационных нарушений, и их особенностях для углеродных материалов с формулировкой цели и актуальных задач диссертационного исследования. Выбранные в диссертации оборудование ионной обработки, методики облучения, аппаратура и методы исследований, широкий набор углеродных и композиционных материалов для исследования в полной мере позволили выполнить задачи диссертационной работы.

Теоретически обоснованная методика определения порогового уровня радиационных нарушений, приводящих к аморфизации углеродных и композиционных материалов при ионном облучении, подтверждена ее апробацией для поликристаллических графитов, высокоориентированного пиролитического графита и углерод-углеродных композиционных материалов на основе полиакрилонитрильного и гидратцеллюлозного волокна. Особое внимание в исследовании модифицирующего действия ионов уделено таким углеродным материалам как высокоориентированный пиролитический графит и стеклоуглероды, которые могут рассматриваться в качестве модельных материалов при исследованиях и прогнозировании свойств углеродных волокнистых материалов. На основе экспериментально полученных результатов выявлены закономерности влияния высокодозного ионного облучения на изменение структуры поверхности высокоориентированного пиролитического и силицированного графита, стеклоуглерода, углерод-углеродных и углерод-керамических композиционных материалов, отраженные в заключении диссертационной работы.

Достоинством диссертационной работы Андриановой Н.Н. является то, что автором рассмотрены физико-химические закономерности процессов высокодозного ионного модифицирования широкого перечня углеродных и композиционных материалов, позволившие выявить эффекты глубокого модифицирования поверхности высокоориентированного пирографита, при котором изменение структуры происходит на глубину до 1000 нм, установить связь процесса ионно-лучевого гофрирования углеродных волокон при модифицировании ионами аргона, неона и азота с энергией 10 – 30 кэВ с радиационными размерными изменениями углеродных материалов при нейтронном облучении, предложить механизм процесса гофрирования и теоретически обосновать эффект гофрирования углеродных волокон на основе полиакрилонитрила при высокодозном облучении ионами гелия с энергией 1 – 3 кэВ.

**Научная новизна.** Наиболее научно значимыми и новыми результатами работы являются следующие.

1. Разработана теоретически обоснованная методика оценки радиационной стойкости углеродных материалов на основе анализа температурных и энергетических изменений коэффициента ионно-электронной эмиссии при высокодозном облучении ионами кэВ-ных энергий.

2. Установлены новые количественные и качественные характеристики высокодозного ионного распыления высокоориентированного пирографита, стеклоуглеродов, углеродных композитов и возможности компьютерного моделирования этих процессов.

3. Показано, что ионное облучение стеклоуглеродов может приводить к разупорядочению их наноглобулярной структуры, нанокристаллическому и полигранулярному состоянию поверхностного слоя в зависимости от температуры облучаемых образцов. Образование новых структурных состояний имеют пороги по уровню первичных радиационных нарушений.

4. Выявлена связь ионно-индуцированного гофрирования с размерными изменениями углеродных материалов при нейтронном облучении в ядерных реакторах. Предложена и экспериментально подтверждена модель ионно-индуцированного гофрирования на основе процессов релаксации ионно-индуцированных механических напряжений и пластической деформацией двойникованием.

5. Теоретически обоснован и экспериментально апробирован эффект ионно-плазменного гофрирования углеродных волокон на основе полиакрилонитрила потоком ионов гелия технологических плазменных ускорителей.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что установленные закономерности и механизмы высокодозного ионно-лучевого модифицирования поверхности углеродных и композиционных материалов расширяют технологические возможности при создании новых углеродных материалов с необходимыми функциональными свойствами, расширяют методы испытаний и определения радиационной стойкости углеродных материалов. Предложенные автором температурные и энергетические режимы ионного облучения позволяют получать как поверхности с наностеночными структурами у стеклоуглеродов и высокоориентированного пирографита, проявляющие низковольтные автоэмиссионные свойства, так и эффект ионно-лучевой полировки у оптических деталей из стеклокерамики, обеспечивающий шероховатость  $R_a = 0.5$  нм. Разработаны методики и определены условия высокодозного ионно-лучевого гофрирования поверхности высокомодульных углеродных волокнистых наполнителей композитов. Практическая значимость работы состоит также в использовании результатов в прикладных исследованиях в НИИЯФ МГУ и НИИГрафит.

**Достоверность полученных результатов.** Результаты, полученные в работе, являются достоверными и обеспечиваются систематическими

экспериментальными исследованиями структуры и свойств модифицированной поверхности углеродных и композиционных материалов с использованием современной аппаратуры, надежных и независимых методов исследования, включающих методы электронной и оптической микроскопии, рентгеновский структурный анализ и электронографию, спектрометрию Резерфордского и ядерного обратного рассеяния, спектроскопию комбинационного рассеяния, сравнением с результатами тестированных компьютерных программ моделирования взаимодействия атомных частиц с твердым телом (SRIM, TRIM.SP, OKSANA), сравнением и согласием экспериментальных результатов с литературными данными, полученными при сопоставимых условиях.

### ***Замечания по диссертационной работе***

1. В диссертационной работе и автореферате приведено много данных о распылении графитоподобных материалов, таких как высокоориентированный пиролитический графит, поликристаллические графиты, стеклоуглероды и углерод-углеродные композиты и нет измерений коэффициента распыления алмаза. С чем это связано? В литературе экспериментальные данные также отсутствуют.

2. Не совсем ясными из диссертации являются фундаментальные причины ступенчатого изменения ионно-электронной эмиссии при аморфизации углеродных материалов.

3. Недостаточно исследованными представляются причины эффектов глубокого модифицирования высокоориентированного пирографита.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

### ***Рекомендации по использованию результатов диссертации***

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при исследовании и разработке новых композиционных материалов, проводимых в ГНЦ ФГУП «ВИАМ», АО «НИИГрафит», АО «Композит», ООО «Лирсот»; в исследованиях в области авиационной и аэрокосмической техники, атомной и химической промышленности, металлургии, проводимых во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», ГНЦ ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского», в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт"; в фундаментальных и прикладных исследованиях проводимых в МЭИ, МАИ (НИУ), НИИЯФ МГУ, ГНЦ ФГУП «ЦЕНТР Келдыш», ИФХЭ РАН, а также в других промышленных предприятиях и научно-исследовательских центрах, связанных с разработкой и использованием углеродных и композиционных материалов.

### ***Заключение***

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченный научный труд, в котором изложены научно обоснованные технические и технологические решения по режимам ионного облучения стеклоуглеродов и


высокоориентированного пирографита для получения наностеночных структур с низковольтной автоэлектронной эмиссией, ионно-лучевой полировки оптических деталей, разработаны методики оценки пороговых уровней первичных радиационных нарушений, приводящих к аморфизации, к образованию новых поверхностных структур и предложены способы получения и ионно-лучевого модифицирования углеродных волокнистых материалов для армирования композитов с использованием высокопроизводительных плазменных ускорителей.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 62 научно-технических конференциях, опубликованы в 79 печатных работах, в том числе 40 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в WoS и Scopus. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Андрианова Наталья Николаевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Общей физики и ядерного синтеза», протокол № 5 от 19 февраля 2020 года. На заседании присутствовало 17 членов из 21. Результаты голосования: «за» – 17, против – нет, воздержавшихся -- нет.

Заведующий кафедрой «Общей физики и ядерного синтеза» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
доктор технических наук,  
доцент

 /Дедов Алексей Викторович/

Адрес организации: 111250, Россия, г. Москва,  
улица, дом 14

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Электронный адрес: universe@mpei.ac.ru

Телефон: +7 495 362-70-01