

Председателю диссертационного совета  
Д 218.010.02 при ФГБОУ ВО РГУПС  
д-ру техн. наук, профессору, академику РАН  
Колесникову Владимиру Ивановичу

### **Отзыв**

официального оппонента д-ра техн. наук., профессора  
Бурлаковой Виктории Эдуардовны  
на диссертационную работу Новикова Евгения Сергеевича  
на тему: «Установление закономерностей изменения структурно-фрикционных  
свойств тяжело нагруженных металлополимерных и металлических  
трибосистем и разработка методов повышения их износостойкости»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах

### **Актуальность выполненных диссертантом исследований**

Ресурс и безотказность тяжело нагруженных и скоростных машин в подавляющем большинстве случаев зависит от надежной работы различных трибосистем. Основы качества узлов трения определяются износом материала поверхностного слоя. Сегодня становится очевидным и актуальным, что решение проблемы повышения износостойкости невозможно без создания на поверхностях трибоконтакта саморегулирующихся структур, полученных путем модифицирования материала поверхностного слоя или создания на поверхностях многокомпонентных функциональных слоев. Диссертантом на основе квантово-химических расчетов энергии межатомного взаимодействия с использованием современных экспериментальных методов исследований и в первую очередь спектроскопии получены принципиально новые методы и технологии улучшения трибологических характеристик узлов трения.

Об актуальности проведенных исследований свидетельствует то факт, что они были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-08-12087, проект 12-08-00972, проект 13-08-00-672, проект 13-08-00732), Российского научного фонда (проект РНФ № 14-29-00116, проект РНФ № 16-19-10467), Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 14.607.21.0203 от 26.11.2018 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60718X0203)).

### **Научная новизна и достоверность результатов работы, а также соответствие диссертации паспорту научной специальности**

В результате проведенных исследований автором был получен ряд принципиально новых выводов и к наиболее значимым научным результатам можно отнести следующие:

- разработана методика оценки значений энергии химической связи с железом элементов, способствующих упрочнению связи между зёрнами;

- предложен способ доставки упрочняющих металлическое контртело элементов путем введения их в полимерный композит и последующей транспортировки их в поверхностные слои металлического контртела;

– предложен способ применения алмазоподобных (DLC) покрытий для повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем, в частности получения градиентного распределения электронных конфигураций углерода  $sp^3$  и  $sp^2$  по сечению покрытия.

Автором разработана методика изучения сегрегационных процессов, происходящих в зоне металлополимерного трибосопряжения с использованием квантово-химических расчетов. Результатом оценки энергии межатомного взаимодействия продуктов деструкции полимеров с металлическим контртелом явилось установление возможности упрочнения-разупрочнения поверхностей металлического контртела в зависимости от природы вводимого элемента.

Для вакуумного ионно-плазменного покрытия установлено, что на величину адгезии DLC-покрытия оказывают влияние ионная имплантация (легирование) подложки Nb и/или Hf, а также нанесение промежуточных слоев в покрытие, например, тонкого нитридного слоя CrAlSiN.

Для выполнения поставленных в диссертации задач автором использовались современные методы исследования, такие как квантово-химические расчеты сегрегационных явлений, сканирующая электронная микроскопия высокого разрешения (СЭМ), динамическое наноиндентирование, рентгеновская фотоэлектронная и оже-электронная спектроскопия (РФЭС и ОЭС), а также широкий спектр испытательного трибологического оборудования.

**Достоверность научных результатов** подтверждается полной корреляцией полученных теоретических и экспериментальных данных. Практическая проверка проводилась на разработанных автором стендах – для диффузионно-сегрегационного насыщения металлических образцов в металлополимерной трибосистеме атомами упрочняющих элементов с помощью трения – машина торцевого трения; стенде, обеспечивающего условия, максимально приближенные к условиям эксплуатации шлицевых соединений, для испытаний алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхностях трибоконтакта трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26.

Основные результаты работы были представлены на международных научно-практических конференциях и опубликованы в 31 печатной работе, из них 10 – в рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 9 – в изданиях, включенных в международные базы данных. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования.

В работе представлены результаты теоретических подходов и экспериментальных исследований, обладающих научной новизной в соответствии с паспортом специальности 05.02.04 – «Трение и износ в

машинах». Содержание диссертационной работы отвечает следующим пунктам: п.1, п.3, п.7.

### **Значимость выводов и рекомендаций для науки и практики**

Полученные автором в работе научные результаты позволили:

- сформулировать критерии выбора наполнителей в композиционные полимерные материалы для металлополимерных трибосопряжений;
- разработать способ аттестации элементов трибосистемы, способствующих упрочнению контактирующих сопряжений, а также технологию трибоупрочнения;
- установить закономерности образования высокопрочных и антифрикционных поверхностных слоев тяжело нагруженных трибосопряжений, позволившие выбрать класс легирующих элементов и режимы алмазоподобных (DLC) покрытий, способствующие повышению износостойкости;
- разработать технологию формирования алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхностях трибоконтакта трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26, позволившую значительно увеличить износостойкость данной трибосистемы, а также тормозной системы «колесо – тормозная колодка».

На основе выявленных закономерностей в работе предложена принципиально новая методология создания новых полимерных материалов фрикционного назначения путем модификации их упрочняющими элементами. В технологическом исполнении разработаны способы модификации наполнителей из упрочняющих элементов в матрицу полимерного материала и последующей транспортировкой их в металлическое контртело. Полученные автором результаты исследований модифицированных износостойких композиционных материалов прошли проверку на реальном стенде «колесо – тормозная колодка» и получили рекомендации по их использованию на Северо-Кавказской железной дороге.

Результаты работы по разработке технологии формирования алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхности трибоконтакта были апробированы в рамках проведения стендовых испытаний натуральных экспериментальных образцов трансмиссионного шлицевого соединения вертолета МИ-26 с модифицированным покрытием контактирующих поверхностей и получили положительные рекомендации по повышению износостойкости данного реального сопряжения на заводе ПАО «Роствертол».

Достигнутые автором результаты работы могут быть тиражированы на модификацию широкого класса узлов трения машин и механизмов, а также при создании нового класса композиционных износостойких материалов.

### **Структура, содержание, завершенность работы**

Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста и включает в состав введение, четыре главы, заключение, общие выводы, акты

стендовых испытаний, библиографический список из 188 наименований, 10 таблиц и 39 рисунков. Структура работы сформирована логично. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации.

Все главы диссертации представляют целостную и завершенную структуру, в которой проведены исследования для тяжело-нагруженных узлов трения. Поставленные автором цели работы для металлополимерных и металлических трибосистем последовательно реализуются на протяжении всей работы.

В первой главе приводится анализ современного состояния проблемы, современных аспектов фрикционного взаимодействия металлополимерных трибосистем с учетом диффузионных и сегрегационных процессов, также дан обзор перспективных технологий и материалов для повышения износостойкости металлических нагруженных трибосопряжений. Во второй главе описано исследование диффузионно-сегрегационного насыщения металлических образцов в металлополимерной трибосистеме атомами упрочняющих элементов. Особого внимания заслуживает разработанная автором методика оценки значений энергий химической связи с железом элементов, способствующих упрочнению с использованием квантово-химических расчетов. А разработанная автором технология доставки этих упрочняющих элементов в поверхностные слои стали путем трения позволила констатировать, что процесс трения возможно реализовать не как разрушительный; а как созидательный. В третьей главе исследована возможность управления показателями качества контактных поверхностей трибосопряжения путем формирования алмазоподобных DLC-покрытий. Исследование алмазоподобных покрытий методом РФЭС позволили установить диссертанту принципиально новые результаты и показать, что по мере приближения к подложке, на которую наносится покрытие, происходит аморфизация структуры покрытия и доля графитоподобной составляющей возрастает, о чем свидетельствует распределение электронных конфигураций углерода  $sp^2$  в этой области. Увеличение доли  $sp^3$ -орбиталей у поверхности свидетельствует о ее алмазоподобном строении. Такие результаты необходимо учитывать при разработке технологии нанесения покрытия. Для практики весьма важным является результат, установленный автором, что тип подложки оказывает влияние на свойства алмазоподобных (DLC) покрытий. Так, сила адгезии углеродной основы с покрытием выше, чем у азотированной подложки. На основе выявленной закономерности автором установлено, что положительное действие на адгезию оказывает ионная имплантация подложки Nb и Hf, а также нанесение промежуточных слоев покрытий из CrAlSiN. Четвертая глава диссертации посвящена стендовым испытаниям алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхностях трибоконтакта трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26. На основе проведенных испытаний, максимально приближенным к эксплуатации заводских муфт и муфт с покрытиями CrAlSiN+алмазоподобные (DLC)

покрытия, а также покрытия Nb-Hf+ алмазоподобные (DLC) покрытия, установлено, что покрытие системы (CrAlSiN+ DLC) способствует снижению износа в 4 раза.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Среди разработанных и предложенных автором технологий повышения износостойкости как металлополимерных, так и металлических трибосистем нет оценки их влияния на экологическую безопасность;

2. Желательно бы иметь в работе информацию по пределам контактных давлений, а также интервале рабочих температур в пределах которых работают установленные закономерности по повышению износостойкости трибосистем;

3. Целесообразно было бы в работе отразить возможность более широкого применения разработанных технологий по повышению износостойких материалов;

4. Для большей наглядности полученные экспериментальные данные (физико-механические характеристики, трибологические характеристики) можно было бы представить в виде столбчатых диаграмм;

5. В работе использованы современные экспериментальные методы исследования, однако не отражены точности их измерений.

### **Заключение в целом о работе Новикова Е.С. и о ее соответствии положению о порядке присуждения ученых степеней**

Отмеченные замечания в работе Новикова Е.С. не снижают ценности рассматриваемой диссертации, выполненной на достаточно высоком научно-техническом уровне.

Диссертационная работа Новикова Е.С. «Установление закономерностей изменения структурно-фрикционных свойств тяжело нагруженных металлополимерных и металлических трибосистем и разработка методов повышения их износостойкости» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком уровне, в которой содержатся новые научные результаты и технологические решения в области установления теоретических закономерностей и инновационных экспериментальных методов повышения износостойкости как металлополимерных, так и металлических трибосистем. Использование полученных автором результатов вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в транспортном комплексе Российской Федерации.

Анализ содержания диссертации и публикаций по ее теме позволяет сделать вывод, что диссертация Новикова Евгения Сергеевича по актуальности избранной темы, характеру рассматриваемых вопросов, поставленной цели, достигнутых результатов решения задач, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, значению

для теории и практики соответствует требованиям ВАК, регламентируемым пунктом 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах», а ее автор – Новиков Евгения Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

**Официальный оппонент:**

Бурлакова Виктория Эдуардовна, гражданка РФ, заведующая кафедрой «Химия» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет», доктор технических наук по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах, профессор.



Бурлакова Виктория Эдуардовна

«02» февраля 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1  
Тел. моб. +7-903-407-70-87,  
E-mail: [vburlakova@donstu.ru](mailto:vburlakova@donstu.ru)

Подпись д-ра техн. наук, проф. Бурлаковой Виктории Эдуардовны ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь Ученого совета ДГТУ



В. Н. Анисимов