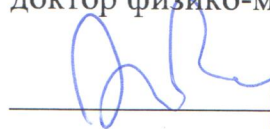


УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор



А. Б. Ворожцов

« 08 » апреля 2019 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Жаркова Станислава Юрьевича «Повышение износостойкости меди при трении в атмосфере инертного газа методами ионной имплантации и нанесения покрытий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

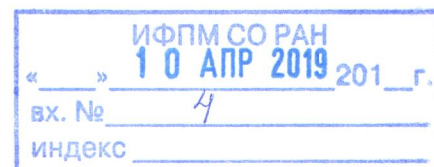
#### Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность диссертационного исследования Жаркова С. Ю. состоит, прежде всего, в том, что в нем решается имеющая важное техническое значение задача создания материала, обеспечивающего многократное повышение ресурса работы подвижных деталей и узлов космических аппаратов, работающих в условиях электронной пары трения. В частности, разработанные диссертантом материалы – нанокompозитные покрытия системы Cu–Mo–S перспективны при создании токоъемников в спутниках дистанционного зондирования Земли, электрических контактов приводов ориентации солнечных батарей и др.

До сих пор в качестве таких материалов используются полученные методом порошковой металлургии легированные дисульфидом молибдена и углеродом сплавы на основе меди и серебра.

Диссертантом для решения поставленной задачи использован слабо разработанный метод ионно-плазменного нанесения покрытий системы Cu–Mo–S и ионного легирования меди азотом методом ионной имплантации.

Как показано в диссертации, указанные покрытия имеют многоуровневую нанокompозитную структуру. В этой связи, диссертантом на современном научном уровне выполнены актуальные, имеющие общетеоретическое значение исследования фазово-структурного состояния покрытий, механизма изменения адгезионного износа на усталостный при циклическом переносе наночастиц покрытия Cu–Mo–S на контртело и других вопросов, активно изучаемых во многих мировых исследовательских центрах.



Фактически диссертантом на примере ионного легирования меди азотом с использованием технологии ионной имплантации показано, что ее использование для существенного повышения ресурса работы токосъемников в условиях космоса оказывается бесперспективным ввиду малой толщины ионно-легированного слоя и невозможности исключения адгезионного механизма износа электроконтактной пары трения.

Таким образом, диссертационное исследование Жаркова С. Ю. безусловно актуально и имеет важное научно-техническое значение.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа изложена на 174 страницах и состоит из введения, пяти разделов, выводов, трех приложений и списка литературы, который включает 159 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены методология и методы исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации результатов работы, публикациях по теме диссертации, а также представлена структура диссертации.

В *первом разделе* диссертации представлен литературный обзор, посвященный теоретическим основам трибологии. Проведен анализ литературных данных об особенностях изнашивания меди и медных сплавов в условиях сухого скольжения и приложении электрического тока в процессе сухого скольжения. Проанализированы работы, посвященные известным способам повышения механических и триботехнических характеристик меди. На основе анализа литературных данных о достигнутых результатах и имеющихся проблемах сформулированы цель и задачи исследования.

Во *втором разделе* описаны материалы исследования, режимы и условия имплантации ионов азота, режимы и условия осаждения покрытий на основе системы Cu-Mo-S, методы триботехнических и механических испытаний и методы исследования структурно-фазового состояния, использованные в работе. Отметим, что в работе использован современный приборный комплекс исследования элементного и структурно-фазового состояния исследуемых материалов и покрытий, обеспечивающих достоверность и оригинальность полученных результатов.

*Третий раздел* посвящен изучению триботехнических и механических свойств имплантированной ионами азота меди, работающей в паре с медным контртелом в атмосфере аргона. Представлены результаты структурно-фазового состояния ионно-имплантированной меди, на основании которых сделаны выводы о механизме повышения триботехнических и механических свойств меди после высокофлюенсной имплантации ионов азота. Показано, что

износостойкость меди в условиях адгезионного изнашивания в атмосфере инертного газа нелинейно повышается с увеличением флюенса ионов азота с максимумом, наблюдаемым при значении флюенса  $\sim 9 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Повышение износостойкости обусловлено твердорастворным упрочнением, измельчением зерен меди, повышением плотности дислокаций и дисперсным упрочнением частицами  $\text{CuN}_3$ . Снижение износостойкости при имплантации с ростом флюенса ионов азота, превышающих значение  $\sim 9 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, связано с укрупнением образующихся в результате имплантации пор в поверхностном слое меди. Как следовало ожидать, результаты ионного легирования поверхности с использованием метода ионной имплантации не позволяют обеспечить необходимое повышение ресурса работы и износостойкости исследуемой пары трения ионной легированной меди и медного контртела.

В четвертом разделе диссертации представлены наиболее интересные результаты, позволяющие решить поставленную задачу создания износостойкого материала с металлической проводимостью и ресурсом работы электро-контактной пары трения, более чем на два порядка превышающим контактную пару «медь – медь».

В качестве такого материала диссертантом предложены и впервые получены покрытия системы  $\text{Cu-MoS}_2$ , разработан метод их нанесения на медный субстрат с использованием магнетронного распыления. Решающее значение при этом имело создание диссертантом оригинальной композиционной мишени, позволяющей получить однородные покрытия с высоким содержанием сульфида молибдена. Последнее не является простой задачей ввиду его высокого вторичного распыления.

Безусловный интерес представляют результаты элементного и фазово-структурного состояния полученных наноконпозиционных покрытий.

С применением современных методов структурного анализа (рентгенографический и рентгенофазовый анализ, растровая и трансмиссионная электронная микроскопия, энергоэмиссионная спектроскопия, масс-спектрометрия вторичных ионов) выполнен послойный анализ электронного и фазово-структурного состава покрытий. Показано, что его сопряженный с субстратом слой толщины 6 мкм на мезоуровне имеет глобульную структуру, тогда как на микроуровне – смесь наноразмерного зерна меди размером около 60 нм и наночастиц фазы  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$  размером 9 нм. Элементный состав этого слоя составляет 99,1 ат.% Cu + 0,12 ат.% Mo + 0,73 ат.% S.

Последующий слой 54 мкм также имеет двухуровневую структуру и представляет волокна поперечного размера 3 мкм фазы  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$  с размером нанокристаллов около 9 нм. Поскольку общая оптимальная толщина покрытий достигает 60 нм, в них не должно быть высоких внутренних напряжений и следует ожидать наличие частиц дисульфида. Картина микродифракции (рис. 53 автореферата) этого не исключает. К сожалению, в диссертации эти вопросы не обсуждаются. С нашей точки зрения, обнаруженные волокна

сложной формы обычно наблюдаемой столбчатой структуры заслуживают более подробного исследования. Высокая квалификация диссертанта позволяет в дальнейшем это выполнить.

Одним из важнейших результатов диссертационного исследования является экспериментальное обоснование изменения механизма износа от адгезионного к усталостному в результате переноса материала покрытия на контртело с формированием так называемого «третьего тела», в качестве которого оказывается пленка наноразмерной фазы  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ . Об этом убедительно свидетельствуют изучение морфологии поверхности износа и анализ его элементного состава методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

Показано, что ресурс работы контактной пары с покрытием оптимальной толщины составляет около 210 часов и превышает в 330 раз скорость износа пары трения без покрытия.

Перенос материала покрытия на контртело приводит также к двукратному снижению коэффициента трения.

Диссертантом вполне обоснованно делается вывод, что полученное нанокompозитное покрытие является твердой смазкой.

Таким образом, найденные закономерности формирования микроструктуры, особенностей фазово-структурных состояний износостойкости в имитируемых условиях службы изделий позволяют рассматривать нанокompозиты типа «Металл –  $\text{MoS}_2$ » перспективными для использования при трении с токосяемом.

Это подтверждается представленными в приложении диссертации справками о возможном использовании полученных в ней результатов в АО «Российские космические системы», РКК «Энергия», КБ «Салют», АО ГКНТЦ им. М. В. Хруничева.

### **Научная новизна результатов**

1. Предложена оригинальная конструкция композиционных мишеней, с применением которой разработан метод получения высокоизносостойких нанокompозитных покрытий системы « $\text{CuMoS}_2$ » с металлической проводимостью.

2. Исследованы характерные особенности фазово-структурного состояния полученных покрытий с микронными размерами ее элементов на мезоуровне с формированием в них наноразмерной фазы  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$  на микроуровне.

3. Показано, что в результате переноса материала покрытия с формированием твердой смазки с наноразмерной структурой в электроконтактной паре трения в аргоне происходит изменение адгезионного механизма износа на усталостный с повышением ресурса работы в 330 раз. Практическое значение результатов диссертационного исследования состоит в возможности их использования при изготовлении деталей космической техники, что подтверждено справками от ведущих предприятий Госкорпорации «Роскосмос».

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечивается применением современных методов изучения структуры и состава полученных материалов (покрытий системы «Cu-MoS<sub>2</sub>»), взаимным дополнением и непротиворечивостью полученных различными методами экспериментальных данных, их статистической обработкой и согласованностью с результатами исследований в смежных направлениях.

Основное содержание работы представлено в 2 статьях в журналах из списка ВАК и 5 статьях в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science; прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

По объектам исследования, методам проведения испытаний и содержанию работа соответствует п. 1 паспорта специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления».

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации, основные положения и выводы.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Полученные покрытия имеют толщину до 60 мкм с ресурсом работы более 200 часов, что, на наш взгляд, дает основание предполагать отсутствие в них внутренних напряжений. В этой связи необходимы количественные данные механических свойств, например, твердости покрытия в целом и его глобульного слоя. К сожалению, такие данные отсутствуют.

2. В работе вместо обычно наблюдаемой столбчатой структуры обнаружены волокна сложной формы. Следовало бы более подробно обсудить возможность существования полостей, включения других фаз, в частности MoS<sub>2</sub>, в том числе в аморфном состоянии, и их роль в формировании волокнистой структуры покрытий.

3. В диссертации отсутствует Рис. 4.7, на основании которого на стр. 121–124 обсуждаются схема и стадийность формирования глобульного слоя покрытий, также отсутствует Рис. 4.13.

4. Недостаточно полно обсужден вопрос о формировании твердой смазки – связано ли это со сложной структурой фазы Cu<sub>2</sub>Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> (см. например, Рис. 4.6) или ее наноразмерностью?

Представленные замечания не затрагивают основного содержания диссертации и не снижают ее высокой оценки.

### Заключение

Диссертационная работа Жаркова С. Ю. является завершенной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с последними изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Жарков Станислав Юрьевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв о диссертации Жаркова С. Ю. обсужден и одобрен на заседании лаборатории физики структурных превращений Сибирского физико-технического института им. акад. В. Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета от 06 марта 2019 г., протокол № 46.

Директор Сибирского физико-технического института  
имени акад. В. Д. Кузнецова Национального исследовательского  
Томского государственного университета,  
доктор физико-математических наук  
(01.04.07 – Физика конденсированного состояния),  
профессор



Потекаев Александр Иванович

05 апреля 2019 г.

Сведения об организации:

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
государственный университет»

Телефон: (3822) 52-98-52

Адрес электронной почты: rector@tsu.ru

Официальный сайт: www.tsu.ru