

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 диссертации. Постоянное повышение требований к надежности и долговечности изделий электронной аппаратуры как для наземного, так и для космического применения обуславливает необходимость повышения износостойкости электрических соединителей при сохранении их высоких электрических свойств. На ресурс работы скользящих контактов могут оказывать влияние различные факторы, такие, как эрозия под действием электрической дуги, усталостное, абразивное, адгезионное изнашивание. Последнее – наиболее острая проблема для слаботочных узлов, эксплуатирующихся в условиях инертной атмосферы или, в предельном случае, в условиях вакуума космического пространства.

Диссертационная работа Жаркова С.Ю. посвящена решению задачи повышения износостойкости слаботочного токоъемника спутника дистанционного зондирования Земли ионно-плазменными методами и исследованию физических механизмов ее увеличения на примере трения меди в атмосфере инертного газа, что определяет её актуальность.

Анализ содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка литературы, включающего 159 наименований, и трех приложений. Всего 174 страниц машинописного текста, в том числе 67 рисунков и 10 таблиц.

Во *введении* приведено обоснование темы диссертации, актуальности, научной новизны, практической и теоретической значимости исследования. Сформулированы цель и задачи диссертации, положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов и выводов, отмечен личный вклад соискателя и приведены сведения по апробации работы.

В *первом разделе* представлен литературный обзор об основах трибологии и механизмах изнашивания меди и медных сплавов в условиях сухого скольжения.

ИФПМ СО РАН	
«	09 АПР 2019 г.
вх. №	17
индекс	

Здесь же описаны имеющиеся на сегодня методы повышения износостойкости цветных металлов. На основании представленного литературного обзора поставлены цель и задачи исследования.

Во *втором разделе*, в соответствии с целями и задачами диссертации, содержится описание объектов и методов экспериментального исследования, условий проведения процесса ионной имплантации и осаждения покрытий. Показаны методы и условия испытаний на износостойкость, применяемые методики и оборудование для исследования структуры и фазового состава, а также механических и электрических свойств исследуемых материалов. Кратко рассмотрены применяемые в работе современные методики, такие, как наноиндентирование, четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления, масс-спектрометрия вторичных ионов, микрорентгено-спектральный и рентгеноструктурный анализ, просвечивающая дифракционная и растровая электронная микроскопия.

Третий и четвертый разделы диссертации содержат результаты исследования и их обсуждение.

В *третьем разделе* изложены результаты экспериментальных исследований влияния ионной имплантации азота на износостойкость меди при трении в условиях инертной среды. Установлена нелинейная зависимость износостойкости и микротвердости меди от флюенса ионов азота. Износостойкость меди повышается с увеличением флюенса ионов до максимальных значений при значении флюенса 9×10^{17} ион/см² и снижается при его дальнейшем повышении. Показано, что увеличение износостойкости носит комплексный характер и связано с такими факторами, как твердорастворное упрочнение, измельчение размеров зерен меди, повышение плотности дислокаций в поверхностном слое и дисперсное упрочнение наночастицами нитридов меди. Сделано заключение о том, что микротвердость и износостойкость при значениях флюенсах, превышающих 9×10^{17} ион/см², снижаются за счет повышения пористости поверхностного слоя, обусловленного внедрением большого количества ионов азота.

В *четвертом разделе* приведены результаты структурных, трибологических и электрофизических исследований покрытий Cu–Mo–S, осажденных при помощи магнетронного распыления оригинального катода, имеющего в своем составе медь

и дисульфид молибдена. Осаждаемые покрытия имеют многоуровневую структуру (на микро- и наномасштабных уровнях). Проведенные исследования в инертной среде показали, что покрытие системы Cu–Mo–S многократно повышает износостойкость меди. В этом же разделе приводятся результаты измерений электрических свойств покрытий и трибологических испытаний с пропусканием электрического тока через контакт образца с покрытием и контртела.

В *пятом разделе* описаны перспективы практического использования результатов выполненной работы.

В общих *выводах* представлены основные результаты по итогам выполненной работы, которые полностью отражают цель работы.

В *Приложениях* представлены справки о полезности результатов работы от ведущих предприятий Госкорпорации Роскосмос.

Достоверность полученных научных результатов, обоснованность выводов и выносимых на защиту положений обеспечены применением современного научно-исследовательского оборудования и методов исследования, подтверждаются большим объемом экспериментальных данных и статистическими методами их обработки, корректностью постановки задач исследования и формулировки выводов, апробацией материалов диссертации на научных конференциях различного уровня. Основные результаты диссертации представлены в 7 рецензируемых журналах.

К безусловно **новым научным результатам** работы можно отнести:

- условия и режимы формирования электропроводящих антифрикционных покрытий Cu–Mo–S при магнетронном распылении композиционной мишени Cu/MoS₂,
- микро- и наноструктурные уровни, фазовый состав и морфологию покрытий на основе системы Cu–Mo–S,
- механизмы изнашивания покрытий Cu–Mo–S при трении в условиях инертной среды.

Научная значимость диссертации заключается в выявлении механизмов повышения износостойкости меди после ионно-пучковой поверхностной обработки и осаждения методом магнетронного распыления покрытия на основе системы Cu–Mo–S.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что ее результаты и выводы могут послужить как фундаментальной основой, так и практическими рекомендациями при конструировании триботехнических узлов космической техники.

Замечания по диссертационной работе

1. Не обоснован выбор имплантируемого в медь элемента (азот).

2. В работе показано, что микротвердость и износостойкость меди, имплантированной азотом, снижаются вследствие увеличения среднего размера пор поверхностного слоя. Следовало бы пояснить, как при этом изменяется количество пор в материале.

3. В диссертационной работе на стр. 71 сказано о теоретических расчетах, выполненных при разработке композиционной мишени для магнетрона. Следовало бы пояснить суть расчетов и где они опубликованы.

4. На стр. 105-106 (рис. 3.6-рис. 3.8) представлены результаты анализа зеренной структуры и фазового состава меди, имплантированной азотом, свидетельствующие о формировании субзеренной структуры с размером субзерен 37 нм и частиц нитрида меди с размером 20 нм. Следовало бы пояснить, каким образом проводилось идентификация субзерен и частиц при их близких размерах.

5. На стр. 110 приведены результаты исследования дислокационной субструктуры меди, имплантированной азотом. Следовало бы пояснить, как изменяется дислокационная субструктура при удалении от поверхности образца.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку основных результатов работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния (технические науки), пункт 3 «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ, фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния».

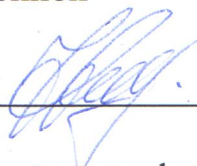
Заключение. Диссертационная работа Жаркова С.Ю. «Повышение износостойкости меди при трении в атмосфере инертного газа методами ионной имплантации и нанесения покрытий» является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему на высоком методическом уровне, является научно-квалификационной работой, в которой содержится

решение задачи физики конденсированного состояния, а именно исследование физических механизмов повышения износостойкости слаботочного токосъемника спутника дистанционного зондирования Земли ионно-плазменными методами на примере трения меди в атмосфере инертного газа. Основные результаты работы опубликованы в научных журналах и обсуждались на конференциях различного уровня. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

По уровню решаемых задач, научной новизне, практической значимости, объему полученных результатов диссертационная работа «Повышение износостойкости меди при трении в атмосфере инертного газа методами ионной имплантации и нанесения покрытий» удовлетворяет требованиям ВАК РФ раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Жарков Станислав Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник
лаборатории плазменной эмиссионной
электроники ИСЭ СО РАН



/ Юрий Фёдорович Иванов

Сведения об оппоненте:

Иванов Юрий Фёдорович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3, тел. 8(3822) 491713, e-mail: yufi55@mail.ru, www.hcei.tsc.ru

Подпись Иванова Ю.Ф. удостоверяю:

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН
д.ф.-м.н.




/ Игорь Валерьевич Пегель