Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 621.892

ТВЕРДОСМАЗОЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ С НАНО- И МИКРОДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.150

Аннотация: Разработаны основы технологии получения твердосмазочных композиционных керамических покрытий с антифрикционными наполнителями. Проведены физико-механические и триботехнические испытания полученных материалов и даны рекомендации по их практическому применению.

Ключевые слова: композиционные керамические покрытия, твердосмазочные материалы, антифрикционные наполнители, нанодисперсные частицы, трение, износ.

1. Введение

Интенсивное развитие космической, военной техники, химической и электронной промышленности, а также текстильного и ткацкого производства, диктует необходимость создания антифрикционных материалов для трибоузлов сухого трения с существенно более высокими свойствами. Перспективными конструкционными материалами для технически более совершенных трибосопряжений являются керамические материалы на основе оксида алюминия, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) [1, 2].

Согласно технологии, керамическое покрытие, состоящее из нескольких модификаций оксида алюминия, формируется на поверхности детали из вентильного металла, в плазме микродугового разряда [3, 4]. Такие покрытия обладают комплексом высоких механических свойств, хорошей адгезией к подложке, термостойкостью, но они не могут работать в узлах трения без смазки и интенсивного охлаждения. Расширить диапазон реализуемых физико-механических и антифрикционных свойств традиционных МДО-покрытий можно за счет включения в керамическую матрицу микро- и наноразмерных частиц антифрикционного наполнителя для получения твердосмазочных керамических покрытий [5, 6].

Подобный подход, в частности, позволил создать уникальные алмазосодержащие керамические покрытия для абразивного инструмента [7, 8] и для деталей узлов трения, работающих с перспективными смазочными магнитными маслами на основе наножидкостей [9, 10].

Цель исследования заключалась в разработке основ технологии получения методом МДО на алюминиевом сплаве твердосмазочных композиционных керамических покрытий с различными антифрикционными наполнителями, и проведения их сравнительных триботехнических испытаний.

2. Методические вопросы выполнения экспериментальных исследований

В качестве конструкционного материала и основы для формирования покрытия был выбран сплав на основе алюминия Д1, широко применяемый в технике. Формирование композиционных покрытий с антифрикционными наполнителями проводилось в электролитах, содержащих дисперсные материалы, которые при оксидировании модифицировали структуру упрочненного поверхностного слоя. В качестве дисперсной фазы керамического покрытия были выбраны магнетит, графит и дисульфид молибдена.

Предполагается, что магнетит, должен повысить механические свойства покрытия и снизить трение в результате уменьшения адгезионных связей между контактирующими поверхностями. Высокодисперсный магнетит получали методом химического осаждения [11], который предполагает нейтрализацию солей двух- и трёхвалентного железа избытком водного раствора аммиака при постоянном перемешивании. Образующийся в процессе реакции хлорид аммония отделяли из осадка многократной промывкой дистиллированной водой, что предотвращало коагуляцию частиц магнетита и обеспечивало в дальнейшем адсорбцию молекул ПАВ-стабилизатора с поверхностью частиц магнетита. В процессе химической реакции осаживаются частицы магнетита размером 2–20 нм, большинство имеет размер около 7 нм. Поверхность частиц магнетита обладала хорошей адсорбционной способностью, что было необходимо для их коллоидной стабилизации. С целью защиты частиц высокодисперсного магнетита от окисления и предотвращения их коагуляции, проводился процесс пептизации в растворе силиката натрия для создания электрического заряда на поверхности частиц. Таким образом, агрегативная устойчивость коллоида достигалась по ионному механизму.

Выбранные в качестве наполнителей мелкодисперсные порошки графита и дисульфида молибдена (размер частиц 2–10 мкм), традиционно обладают высокими антифрикционными свойствами.

При оксидировании дополнительные дисперсные компоненты, находящиеся в электролите, транспортируются к поверхности обрабатываемого сплава неоднородным электрическим полем и, попадая в зону горения искрового разряда, включаются в состав покрытия. Для нанесения антифрикционных композиционных покрытий лабораторная электрохимическая установка была усовершенствована: в конструкцию включена система активного перемешивания электролита, для создания в зоне поверхности покрываемого образца повышенной концентрации частиц дисперсной фазы.

Триботехнические испытания композиционных покрытий с керамической матрицей и различными наполнителями в области средних давлений проводились на машине трения МТП [12], реализуемая схема трения: диск – палец. Величина линейного износа регистрировалась непрерывно индикатором индукционного типа. Конструкция установки предусматривает возможность создания магнитного поля в зоне трения. Обеспечиваемая напряжённость магнитного поля от 0 до 80 кА/м. Для исследования фрикционных свойств покрытий при высоких контактных давлениях была использована трёхшариковая машина трения МТШ [12]. Антифрикционные свойства материалов трения оценивались по диаметру пятна износа на поверхности шаров. В некоторых опытах преобладающим являлся износ плоской поверхности, в этом случае регистрировались размеры сечения дорожки трения с помощью профилографа.

Рабочие параметры установок представлены в Таблице 1. Базовые режимы сравнительных триботехнических испытаний приведены в Таблице 2.

Таблица 1. Параметры работоспособности используемых машин трения

Параметры трения	Установка МТП	Установка МТШ
Скорость скольжения, м/с	0,15 – 0,95	0,3 – 1,5 м/с
Диаметр образцов, мм	6	8
Давление на контакте, МПа	0,5 – 15	до 1300
Относительная погрешность измерения износа	до 2%	до 17%
Относительная погрешность измерения момента трения	до 0,4 %	до 10%
Возможность использования смазочного материала	Традиционные и магнитные масла, без смазки	Традиционные и магнитные масла, без смазки

Таблица 2. Режимы фрикционных испытаний исследуемых материалов

Машина трения	Условия испытаний		
	Линейная скорость скольжения, м/с	Давление, МПа	Наличие дополнительного смазочного материала
МТП	0,24	4,2	Нет
МТШ	0,32	1200 (начальное)	Нет

3. Технологические основы получения покрытий

За основу технологии получения антифрикционных композиционных покрытий была взята уже существующая технология

микродугового синтеза оксидного керамического покрытия на алюминиевом сплаве. Получаемое по известной технологии покрытие имеет достаточную толщину (см. Таблицу 3), высокие: адгезию с материалом подложки, твердость и коэффициент сухого трения, с большой вероятностью вызывающий заедание пары трения и быстрое усталостное разрушение контактирующих поверхностей.

Снижение величины сухого трения керамического покрытия достигалось путем электрофоретического внедрения частиц твердосмазочного материала в керамическую матрицу покрытия. Включение электрического тока ведет к росту барьерного оксидного слоя на поверхности покрываемого алюминиевого образца, который формирует тугоплавкую керамическую матрицу. Одновременно из раствора электролита осаждаются и удерживаются электромагнитными силами на поверхности образца мелкодисперсные частицы твердой смазки, которые постепенно встраиваются в матрицу. Однако различные физические свойства материалов твердосмазочных наполнителей вызывали особенности процесса формирования покрытия.

Таблица 3. Свойства анодного покрытия на алюминиевом сплаве Д1, условия формирования

Толщина покрытия, мм	Коэффициент сухого трения	Интенсивность линейного износа	Микро-твердость, ГПа	Состав электролита
0,1 – 0,3	0,28 – 0,35	$13 \cdot 10^{-9}$	11 – 12	<i>NaOH</i> , дистиллированная вода

Включение частиц графита в покрытие осложняется его хорошими электропроводными свойствами. При подключении электрического тока частицы графита осаживаются на поверхности покрываемой детали, и вызывают ее коррозию. Происходит нарушение пассивного слоя поверхности и тем самым создаются очаги безразрядного прохождения тока. Для решения данной проблемы были использованы два подхода к формированию покрытия. Согласно первому способу электрохимический процесс получения покрытия разделяется на два этапа. На первом этапе на поверхности покрываемого образца формируется тонкое (5–10 мкм) технологическое защитное покрытие в электролите, не содержащем частицы графита. На втором этапе образец с керамическим покрытием помещался в электролит, содержащий повышенную концентрацию силиката натрия и мелкодисперсного (2–10 мкм) порошка графита. При заданных режимах процесс продолжался до формирования покрытия заданной толщины. В полученном по данному способу керамическом покрытии имеется градиент концентрации дисперсного графитового

наполнителя, и он полностью отсутствует в граничном с алюминием слое.

При втором способе формирования покрытия применяется глицерин в качестве диэлектрической пленки, адсорбируемой на поверхности частиц графита и приводящей к снижению его электропроводности. В данном случае получают покрытия с равномерной концентрацией частиц графита по всей толщине покрытия. Выбор глицерина обусловлен его неионогенными свойствами.

Вторым материалом дисперсной фазы был выбран дисульфид молибдена, имеющий хорошие смазочные свойства и являющийся, в отличие от графита, диэлектриком. Существенным недостатком дисульфида молибдена, является его относительно высокая химическая активность: в процессе формирования покрытия под действием высокой температуры и окислительной среды он может переходить в двуокись MoO_2 и трехокись MoO_3 , которые существенно снижают антифрикционные свойства получаемого покрытия. Для предотвращения окисления дисульфида молибдена также были использованы защитные свойства глицерина.

Включение в покрытие частиц высокодисперсного магнетита из коллоидного электролита не вызывало существенных изменений в процессе формирования покрытия.

Отработанный в результате экспериментов оптимальный состав электролитов, включающий дисперсные фазы различных наполнителей приведен в Таблице 4.

Таблица 4. Состав электролитов для получения керамических покрытий, содержащих антифрикционные наполнители

Составляющие элементы электролита	Концентрации элементов в электролите, масс. %		
	Покрытие с частицами графита	Покрытие с частицами дисульфида молибдена	Покрытие с частицами магнетита
Щелочь $NaOH$	0,1	0,1	0,1
Жидкое стекло	1,5	1,1	1,5
Частицы дисперсной фазы	3	4,5	4÷6
Поверхностноактивное вещество – глицерин	2	3	-
Остальное – дистиллированная вода.			

4. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Триботехнические исследования подтвердили эффективность применения дисперсных твердых смазочных материалов при синтезе

керамических покрытий, эксплуатируемых в узлах сухого трения. Результаты испытаний полученных покрытий указаны в Таблице 5.

Таблица 5. Результаты триботехнических испытаний фрикционных свойств композиционных покрытий с различными наполнителями

Материал наполнителя	Толщина покрытия, мм	Коэффициент трения	Интенсивность линейного износа	Микротвердость, ГПа
MoS_2	0,1 – 0,50	0,07 – 0,11	$5 \cdot 10^{-9}$	10 – 12
Графит	0,1 – 0,45	0,10 – 0,16	$7 \cdot 10^{-9}$	12 – 14
Fe_3O_4	0,1 – 0,30	0,15 – 0,26	$9 \cdot 10^{-9}$	14 – 17
Без наполнителя	0,1 – 0,40	0,11 – 0,25	$15 \cdot 10^{-9}$	12 – 14

В исследованном интервале рабочих давлений наиболее высокие антифрикционные характеристики показало керамическое покрытие с наполнителем MoS_2 . Высокая концентрация MoS_2 в электролите – около 45 г/л, определена как оптимальная, что обеспечивает около 25 об. %. концентрации MoS_2 в сформированном покрытии, обеспечивает снижение коэффициента трения, и линейного износа. У композиционного покрытия с частицами графита в составе интенсивность линейного износа в 1,5–2 раза выше, чем у покрытия модифицированного дисульфидом молибдена, что объясняется изначально более низкими антифрикционными свойствами самого графита и его более низкой оптимальной концентрацией в материале покрытия – 30 г/л в электролите и соответственно около 20 об. % в композиционном материале покрытия. Проведенные испытания показали целесообразность применения ПАВ – глицерина для получения покрытий. Установлено, что значения коэффициента трения для керамического покрытия, содержащего частицы дисульфида молибдена, но не обработанного в глицерине, находятся в интервале 0,25–0,5, характерном для покрытий без наполнителя. Из приведенных в Таблице 5 данных видно, что включение в состав покрытия нанодисперсных частиц магнетита привело к увеличению микротвердости покрытия, по-видимому, из-за того, что покрытие стало менее рыхлым в результате уменьшения пористости почти в два раза. Фрикционные свойства покрытий с магнетитом при трении без смазки несколько улучшились, но общий уровень их ниже, чем у покрытий с твердыми смазками.

В ходе выполнения исследований контролировалась интенсивность линейного износа контртела. Было установлено незначительное превышение значения интенсивности износа контртела по сравнению с этой характеристикой для керамического покрытия. Это является несомненным преимуществом созданных композиционных покрытий по

сравнению с традиционными покрытиями на алюминии, которые существенно изнашивают контртело в условиях «сухого» трения.

5. Заключение

Предложен новый подход к получению твердосмазочных композиционных керамических покрытий на алюминии и его сплавах методом микродугового оксидирования, согласно которому в электролит вводятся модифицированные поверхностно-активным веществом мелкодисперсные порошки дисульфида молибдена, графита или чистого магнетита.

Проведены сравнительные триботехнические испытания полученных твердосмазочных композиционных материалов. В отличие от традиционных оксидных керамических материалов, они обладают более высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, что позволяет применять их в экстремальных условиях без дополнительной смазки жидкими или консистентными материалами. Например, предлагаемые композиционные покрытия целесообразно применять для узлов «сухого» трения, установленных в современных и очень перспективных опорах, работающих с газовой смазкой, поскольку позволяют повысить надежность и долговечность опор за счет увеличения числа циклов «пуск-останов» и более продолжительного сохранения допустимых размеров рабочих микрозазоров. Отметим, что газодинамические опоры способствуют существенному повышению качества таких технически прогрессивных изделий как гироскопы, сверхпрецизионные гироприборы, суперцентрифуги, лазерные измерительные приборы, турбомашины для атомной промышленности, прецизионное металлообрабатывающее оборудование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-48-690826, № 18-48-690001).

Библиографический список:

1. **Суминов, И.В.** Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
2. **Малышев, В.Н.** Структура и триботехнические характеристики износостойких композиционных материалов и покрытий / В.Н. Малышев, М.В. Голуб // Долговечность трущихся деталей. – М.: Машиностроение, 1990. – Вып. 4. – С. 119-130.
3. **Белеванцев, В.И.** Микроплазменные электрохимические процессы / В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева, Г.А. Марков и др. // Защита металлов. – 1998. – Т. 34. – № 5. – С. 471-486.
4. **Гордиенко, П.С.** Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов, А.В. Ефименко. – Владивосток: ДВФУ, 2013. – 522 с.

5. **Борисов, А.М.** Микродуговое оксидирование в электролитах-суспензиях / А.М. Борисов, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, Н.В. Морозова, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд // *Электронная обработка материалов*. – 2016. – № 1. – С. 50-77.
6. **Руднев, В.С.** Получение плазменно-электролитическим оксидированием политетрафторэтилен или графитсодержащих оксидных слоев на алюминии и титане и их строение / В.С. Руднев, А.Ю. Устинов, А.А. Ваганов-Вилькинс и др. // *Журнал физической химии*. – 2013. – Т. 87. – № 6. – С. 1031-1036.
7. **Эпельфельд, А.В.** Исследование покрытий на алюминиевом сплаве, полученных микродуговым оксидированием в силикатно-щелочном электролите с добавками ультрадисперсного алмаза / А.В. Эпельфельд, А.В. Желтухин, С.В. Савушкина // *Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии. НМТ-2010»*, 16-18 ноября 2010, Москва: материалы конференции. – Т. 2. – М.: ИЦ МАТИ, 2010. – С. 115.
8. **Болотов, А.Н.** Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // *Трение и износ*. – 2005. – Т. 26. – № 3. – С. 279-284.
9. **Болотов, А.Н.** Разработка модифицированной технологии получения наноструктурного магнитного масла / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2016. – Вып. 8. – С. 69-75.
10. **Болотов, А.Н.** Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2009. – Вып. 1. – С. 5-9.
11. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 184 с.
12. **Болотов, А.Н.** Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // *Трение и износ*. – 2017. – Т. 38. – № 2. – С. 107-113.

References:

1. **Suminov, I.V.** Mikrodogovoe oksidirovanie (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie) / I.V. Suminov, A.V. Epel'fel'd. – М.: ЕКОМЕТ, 2005. – 368 p.
2. **Malyshev, V.N.** Struktura i tribotekhnicheskie harakteristiki iznosostojkih kompozicionnyh materialov i pokrytij / V.N. Malyshev, M.V. Golub // *Dolgovechnost' trushchihsya detalej*. – М.: Mashinostroenie, 1990. – I. 4. – P. 119-130.
3. **Belevancev, V.I.** Mikroplazmennye elektrohimicheskie processy / V.I. Belevancev, O.P. Terleeva, G.A. Markov i dr. // *Zashchita metallov*. – 1998. – V. 34. – no. 5. – P. 471-486.
4. **Gordienko, P.S.** Mikrodogovoe oksidirovanie metallov i splavov / P.S. Gordienko, V.A. Dostovalov, A.V. Efimenko. – Vladivostok: DVFU, 2013. – 522 p.
5. **Borisov, A.M.** Mikrodogovoe oksidirovanie v elektrolitah-suspenziyah / A.M. Borisov, B.L. Krit, V.B. Lyudin, N.V. Morozova, I.V. Suminov, A.V. Epel'fel'd // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2016. – no. 1. – P. 50-77.
6. **Rudnev, V.S.** Poluchenie plazmenno-elektroliticheskim oksidirovaniem politetraftoretillen ili grafitsoedzhashchih oksidnyh sloev na alyuminii i titane i ih stroenie / V.S. Rudnev, A.Yu. Ustinov, A.A. Vaganov-Vil'kins i dr. // *Zhurnal fizicheskoy himii*. – 2013. – V. 87. – no. 6. – P. 1031-1036.

7. **Epel'fel'd, A.V.** Issledovanie pokrytij na alyuminievom splave, poluchennyh mikrodugovym oksidirovaniem v silikatno-shchelochnom elektrolite s dobavkami ul'tradispersnogo almaza / A.V. Epel'fel'd, A.V. Zheltuhin, S.V. Savushkina // Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Novye materialy i tekhnologii. NMT-2010», 16-18 noyabrya 2010, Moskva: materialy konferencii. – V. 2. – M.: IC MATI, 2010. – P. 115.
8. **Bolotov, A.N.** Analiz raboty tribosopryazhenij na osnove keramicheskikh almazosoderzhashchih materialov / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Trenie i iznos.* – 2005. – V. 26. – I. 3. – P. 279-284.
9. **Bolotov, A.N.** Razrabotka modifitsirovannoj tekhnologii polucheniya nanostrukturnogo magnitnogo masla / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov.* – 2016. – I. 8. – P. 69-75.
10. **Bolotov, A.N.** Magnitnye masla tribotekhnicheskogo naznacheniya / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov.* – 2009. – I. 1. – P. 5-9.
11. **Fertman, V.E.** Magnitnye zhidkosti: spravochnoe posobie / V.E. Fertman. – Minsk: Vyshejschaya shkola, 1988. – 184 p.
12. **Bolotov, A.N.** Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv nanostrukturnykh magnitnykh smazochnykh masel s razlichnymi dispersionnymi sredami / A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Novikov // *Trenie i iznos.* – 2017. – V. 38. – no. 2. – P. 107-113.

HARD LUBRICANT CERAMIC COATINGS WITH NANO- AND MICRODISPERSED FILLER

A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova
Tver State Technical University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.150

Abstract: A basis was developed for a technology of the solid lubricant ceramic coatings with antifriction filler. We have made physical, mechanical and tribotechnical tests of the received materials and gave a recommendation for their practical application.

Keywords: *composite ceramic coatings, hard lubricant materials, antifriction fillers, nanodispersed particles, friction, wear.*

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новиков Владислав Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Academic Secretary of the Academic Council, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Vladislav V. Novikov – Ph. D., Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University