

## Международная кооперация кафедры МБИ в области технологии биосовместимых и инструментальных материалов началась благодаря молодым ученым

Молодые ученые кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» (МБИ), начиная с 2012 года и по настоящее время, имеют существенный опыт международной кооперации с представителями научной общественности стран дальнего зарубежья, в частности Чехии, Венгрии, Латвии, Франции, Италии, Испании, Португалии, Израиля и Германии. Знаковыми мероприятиями стали зарубежные (международные и европейские) конференции и семинары, выставки различного уровня, длительные стажировки в зарубежных вузах и крупных производственных компаниях металлообрабатывающей и автомобильной промышленности, а также опубликование англоязычных рукописей в высокорейтинговых зарубежных изданиях – журналах Q1 (1-ой квартили).

Основное направление исследований касается индукционного нагрева и термообработки металлических изделий, в том числе малогабаритных титановых конструкций (имплантатов) и металлообрабатывающего инструмента (сменных режущих пластин, вытяжных и разделительных штампов). Активно разрабатываются и совершенствуются комбинированные процессы с использованием электроплазменного напыления, вакуумно-конденсационного распыления, электроискрового легирования, точечной контактной сварки, модификации коллоидными наночастицами биоактивной керамики (гидроксиапатита), импульсной лазерной обработки и микродугового оксидирования.

Начало международного сотрудничества было положено молодым ученым – доцентом кафедры «Материаловедения и высокоэффективных процессов обработки» **Александром Фоминым**. Результаты своей кандидатской диссертации (2008 г.), связанной с получением высокопрочных биоактивных покрытий на титановых изделиях, он опубликовал в ведущем журнале из перечня ВАК РФ «Упрочняющие технологии и покрытия» (2011 г.) [1,2]. Данное исследование заинтересовало коллег из Московского института стали и сплавов (МИСиС). После чего ему поступило официальное приглашение от представителей Минобрнауки РФ для участия в отчетном (зарубежном) мероприятии, посвященном наиболее ярким результатам по итогам выполнения Федеральных целевых программ (ФЦП) [3]. Стоит отметить, что сотрудник СГТУ имени Гагарина Ю.А. стал единственным представителем молодых ученых из других городов в составе делегации ведущих российских вузов (МИСиС, РХТУ, МИЭТ, Сколтех и др.), организаций РАН (ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова) и представителей Минобрнауки РФ. На выставке-конференции «*New Nanostructured Biocompatible Materials*», проходившей в Праге (Чехия) с 10 по 14 сентября 2012 г., он выступил с двумя пленарными докладами: «*Plasma-Induction Spraying Technology of Nanostructured Hydroxyapatite Coatings on Intrabone Implants*» (Технология плазменно-индукционного напыления наноструктурированных гидроксиапатитовых покрытий внутрикостных имплантатов); «*Induction Heating Nanostructuring Modification Technology of Intrabone Implants by Metal-Oxide Films and Coatings*» (Технология индукционно-термической наноструктурной модификации внутрикостных имплантатов металлоксидными пленками и покрытиями) (Ил.1).



**Ил.1.** Пленарный доклад **Александра Фомина** в Центре науки и культуры в Праге (2012 г.); модератором секции выступил член-корреспондент РАН, профессор, доктор химических наук **Юртов Е.В.**

В рамках обмена опытом состоялись рабочие встречи с представителями чешских вузов и компаний (Ил.2). По итогам данных встреч российская делегация ознакомилась с основными образовательными программами, передовыми научными разработками в области биомедицины, образовательными технологиями, программами международного сотрудничества и особенностями выполнения научных исследований в Чешском техническом университете. Укрепились также внутривоспитательские связи, в том числе с представителями (молодыми учеными) профильных подразделений других вузов, например Институтом биомедицинских систем, Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (Зеленоград).



**Ил.2.** Посещение факультета биомедицинской инженерии Чешского технического университета (г. Кладно, 2012 г.) и одной из современных лабораторий, в которой выполняются работы по исследованию поверхности материалов и вакуумно-конденсационным методам нанесения тонких пленок и покрытий.

В Саратовском государственном техническом университете ежегодно проводятся конкурсы для прохождения зарубежных стажировок и участия в крупных зарубежных конференциях в рамках Программы развития университета. Данная долгосрочная программа нацелена на поддержку молодых ученых (кандидатов наук до 35 лет), в том числе обучающихся в докторантуре. Молодой докторант **Александр Фомин**, на тот момент доцент кафедры «Технология машиностроения», был направлен руководством вуза для участия в профильной [международной конференции «4th International Colloids Conference: Surface Design & Engineering»](#), проходившей в Мадриде (Испания) с 15 по 18 июня 2014 г. (Ил.3). Организатором данной конференции стало издательство «Elsevier», специализирующееся на издании научной литературы (справочников) и рецензируемых публикаций (статей, обзоров и кратких сообщений) в журналах высокого уровня.



**Ил.3.** Докторант **Александр Фомин** – участник международной конференции по изучению коллоидных систем и инженерии поверхности в Мадриде (2014 г.).

Основным направлением конференции являлись передовые исследования коллоидных систем и инженерии поверхности, в частности, наноразмерных материалов, самоорганизующихся систем, сенсоров, технологии получения наночастиц, пленок и покрытий. Масштабность конференции определялась и географией участников – помимо Испании и ближайших стран, Франции, Италии, Португалии, были представители Великобритании, Германии, Швейцарии, Швеции, Норвегии, Голландии, Ирландии, Чехии, Болгарии, Турции, Израиля, Финляндии, Греции, Польши, Словении, Бельгии, Марокко, Кипра, Венгрии, Румынии, Литвы, США, Канады, Бразилии, Аргентины, Мексики, Чили, Колумбии, Пуэрто-Рико, Венесуэлы, Эквадора, Японии, Китая, Индии, Индонезии, Таиланда, Малайзии, Алжира, Египта, Саудовской Аравии, Республики Корея, Австралии, Новой Зеландии, а также России, Казахстана и Армении. Всего в мероприятии приняло участие свыше 350 участников.

Научной общественности была представлена разработка (стендовый доклад): «Oxide and Oxide-Bioceramic Coatings Obtained on Titanium by the Induction Heat Treatment and Modified with Colloidal Hydroxyapatite Nanoparticles» (Оксидные и оксидно-биокерамические покрытия, полученные на титане индукционно-термической обработкой и модифицированные коллоидными наночастицами гидроксиапатита). Продемонстрированные результаты, включая образцы титановых имплантатов с оксидно-биокерамическими покрытиями, отражали плодотворную работу по гранту Российского фонда фундаментальных исследований [РФФИ 13-03-00898 «а»](#) и стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов [СП-1051.2012.4](#) (руководитель проектов **Александр Фомин**). Результаты данной научной работы были также представлены на [международном симпозиуме «12th Russia/ CIS/ Baltic/ Japan Symposium on Ferroelectricity and 9th International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies»](#), проходившем в Риге (Латвия) с 29 сентября по 2 октября 2014 г. Представленный доклад «Induction Heat Treatment and Technique of Nano-Bioceramic Coatings Production on Titanium» был опубликован в сборнике трудов конференции, а полная версия доклада (статья) была опубликована в журнале британского издательства «IOP» (Institute of Physics) [4]. Особенности разработки нового типа индукционных нагревательных установок для модификации и упрочнения титановых конструкций были представлены на [международной конференции «55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University»](#) в Риге (Латвия), проходившей 14 октября 2014 г. Труды конференции были опубликованы в виде полнотекстовых статей рецензируемого сборника в издательстве «IEEE» (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [5].

В начале мая 2015 года вышел в свет [справочник «Handbook of Nanoceramic and Nanocomposite Coatings and Materials»](#) по нанокерамическим и композиционным материалам и покрытиям. Инициатива исходила от представителей издательства «Oxford, Butterworth-Heinemann» (imprint of Elsevier), последующая работа была выполнена при поддержке высококвалифицированных редакторов **Prof. Dr. habil. Dieter Scharnweber** и **Prof. Abdel S. H. Makhlouf** (Ил.4).

Составителями данного справочника стали авторские коллективы из более 20 стран мира, включая Германию, Китай, США. Со стороны России были рекомендованы и прошли многоступенчатое (пятикратное) рецензирование материалы научных разработок ученых СГТУ. Две главы данного справочника посвящены передовым достижениям в области получения наноструктурированных биокерамических и оксидно-керамических пленок и покрытий, формируемых на изделиях из технического титана и конструкционных титановых сплавов. Полные тексты глав доступны для ознакомления на платформе «ScienceDirect»:

«Chapter 13 – Plasma-Induction Spraying of Nanocrystalline Hydroxyapatite Coatings Obtained on Titanium Intraosseous Implants» (Глава 13 – Плазменно-индукционное напыление нанокристаллических покрытий гидроксиапатита на титановые внутрикостные имплантаты) [6].

«Chapter 19 – Chemical Composition, Structure and Properties of the Surface of Titanium VT1-00 and Its Alloy VT16 after Induction Heat Treatment» (Глава 19 – Химический состав, структура и свойства поверхности титана VT1-00 и его сплава VT16, подвергнутого индукционно-термической обработке) [7].



**Ил.4.** Справочник «Нанокерамические и нанокпозиционные покрытия и материалы» (издательство «ВН – Elsevier», 2015 г.)

Докторант **Александр Фомин** принял участие в [международной конференции «SPIE. Microtechnologies 2015»](#) по нано- и микротехнологиям, проходившей в Барселоне (Испания) с 4 по 6 мая 2015 г. Участие в данном мероприятии было поддержано в рамках вузовского конкурса, ориентированного на международные стажировки и конференции аспирантов и молодых научно-педагогических работников СГТУ имени Гагарина Ю.А. Конференция проводилась по 5 направлениям: датчики и микроэлектромеханические системы; киберфизические системы; медицинские микроустройства; нанотехнологии; интегральная фотоника: материалы, устройства и применение. Пленарный доклад на тему «Oxide-Bioceramic Coatings Obtained on Titanium Items by the Induction Heat Treatment and Modified with Hydroxyapatite Nanoparticles» (Оксидно-биокерамические покрытия, полученные на титановых изделиях индукционно-термической обработкой и модифицированные гидроксиапатитовыми наночастицами) вызвал большой интерес у зарубежных коллег ([Ил.5](#)).



**Ил.5.** Молодой ученый, докторант **Александр Фомин** на месте проведения международной конференции по нано-/микротехнологиям и во время выступления с секционным докладом (Барселона, май 2015 г.).

В работе конференции приняли участие именитые ученые из Великобритании, Австралии, Швеции, Индии, Испании, Франции и других стран мира. Представленный доклад в виде полнотекстовой статьи был включен в сборник трудов конференции издательства «SPIE» (The International Society for Optical Engineering) [8]. По итогам конференции была достигнута договоренность о прохождении долгосрочной стажировки в Магдебургском университете (Германии) и выполнении совместных исследований международным коллективом.

Молодые ученые СГТУ приняли участие в [европейской конференции «23rd European Dental Materials Conference: Ceramics-CAD/CAM-Composites»](#), проходившей в Нюрнберге (Германия) с 27 по 28 августа 2015 г. ([Ил.6](#)). В работе конференции, посвященной изучению керамических и композиционных материалов, а также аддитивным технологиям, приняли участие ученые из европейских стран (Германии, Швейцарии, Великобритании, Франции и др.), а также из Австралии, США, Китая. Стендовый доклад на тему «Superhard Bioceramic Coatings Produced on Dental Implants by the Induction Heat Treatment and Surface Modification» (Сверхтвердые биокерамические покрытия, полученные на дентальных имплантатах индукционно-термической обработкой и поверхностной модификацией) был представлен в профильной секции по керамическим материалам и их применению в восстановительной медицине. Материалы конференции опубликованы в специальном выпуске журнала «[European Journal of Prosthodontics & Restorative Dentistry](#)», индексируемого в базе «PubMed (MEDLINE) / WofS» [[9](#)].



**Ил.6.** Открытие европейской конференции по композитам, керамике и CAD/CAM технологиям в Нюрнберге (август 2015 г.).

Молодые ученые СГТУ приняли участие в [европейской конференции «5th European Conference on Crystal Growth»](#), проходившей в Болонье (Италия) с 9 по 11 сентября 2015 г. В работе данной конференции приняли участие ученые из европейских стран (Италии, Испании, Германии, Франции, Венгрии и др.), а также приглашенные докладчики из США и Китая ([Ил.7](#)). В рамках секции «Наноструктуры и нанопористые кристаллы» был представлен стендовый доклад «Bioceramic Coatings Produced on Commercially Pure Titanium by the Induction Heat Treatment and Nanostructure Surface Modification» (Биокерамические покрытия, полученные на техническом титане индукционно-термической обработкой, и наноструктурная модификация поверхности).

**Выставка-семинар «Нано- и биоматериалы российских вузов для медицины»**, проходившая в Будапеште (Венгрия) 5-6 ноября 2015 г., собрала в Российском центре науки и культуры делегацию российских и венгерских ученых. Обмен знаниями и опытом в данном формате уже стал стабильной составляющей двухстороннего сотрудничества в научно-технической сфере. С российской стороны в семинаре приняли участие представители Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского государственного университета, Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт (государственный университет)», Московского института стали и сплавов, Тверского государственного технического университета, Томского государственного университета, Петрозаводского государственного университета, а также Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. Докторант **Александр Фомин** представил пленарный доклад по разработкам, выполненным в рамках успешно завершенной ФЦП и завершающегося проекта РФФИ ([Ил.8](#)).



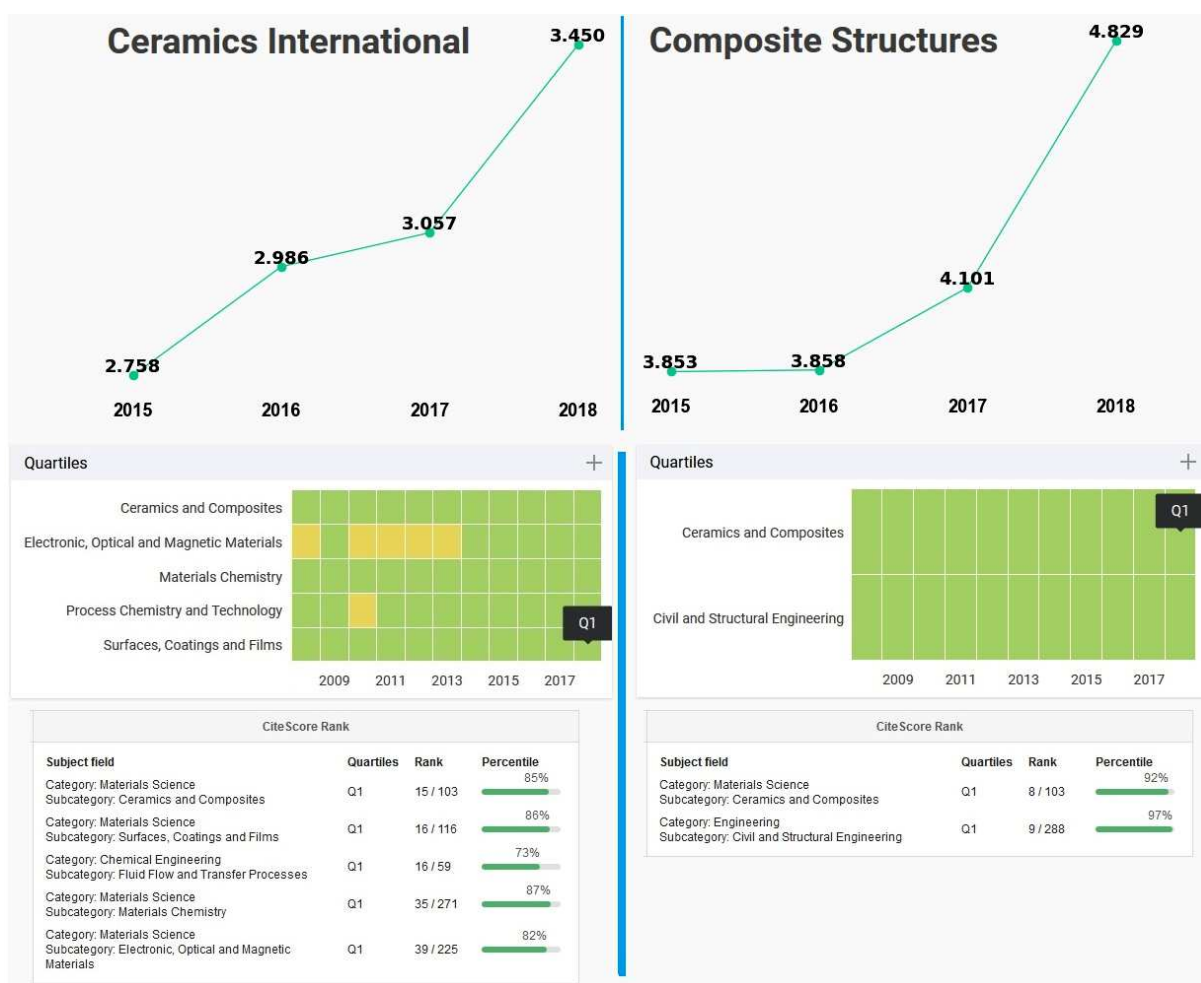
**Ил.7.** Открытие 5-ой европейской конференции по изучению роста кристаллов и работа стендовой секции (Болонья, 2015 г.).

С венгерской стороны с докладами выступили специалисты Медицинского университета им. Семмелвейса, Будапештского технического университета, Института биофизики в Сегеде исследовательского центра ВАН, Центра прикладных исследований им. Баи Золтана и компании «Ateknea Solutions». В ходе встречи состоялся обмен информацией о новых разработках в сфере биомедицинских технологий и материалов, а также приоритетных направлений на ближайшую перспективу. Возможности взаимодействия между специалистами обеих стран были обсуждены также в ходе посещения российской делегацией лабораторий в Будапештском техническом университете.



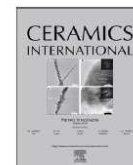
**Ил.8.** Докторант Александр Фомин на выступлении с пленарным докладом на выставке-семинаре в Будапеште (ноябрь 2015 г.).

В ходе выполнения научных исследований по масштабному исследованию оксидных и оксидно-керамических покрытий для малогабаритных титановых конструкций, докторант **Александр Фомин** при участии молодых коллег к.т.н., доцента **Владимира Кошуру** и сотрудников Саратовского государственного университета к.ф.-м.н., заведующего лабораторией «Диагностики наноматериалов и структур» **Андрея Захаревича** и к.ф.-м.н., начальника «Отдела наномеханики» **Александра Скапцова**, подготовил рукопись статьи для высокорейтингового журнала «**Ceramics International**» (Ил.9). Это стало знаковым событием, так как данный журнал индексируется в основных наукометрических базах «Web of Science» (WofS) и «Scopus» и за 2015 г. имел импакт-фактор равный 2,986. Рубрикатор издания по Scopus включает 5 областей исследования: Ceramics and Composites; Electronic, Optical and Magnetic Materials; Materials Chemistry; Process Chemistry and Technology; Surfaces, Coatings and Films, по каждой из которых действует наивысшая рейтинговая оценка качества опубликованных материалов Q1 (1-ая квартиль).



**Ил.9.** Наукометрические показатели (импакт-фактор, квартиль и область исследований) двух наиболее профильных изданий «**Ceramics International**» и «**Composite Structures**», в которых с 2016 г. молодые ученые публикуют результаты своих исследований.

Данная статья «Composition, Structure and Mechanical Properties of the Titanium Surface after Induction Heat Treatment Followed by Modification with Hydroxyapatite Nanoparticles» (Состав, структура и механические свойства поверхности титана, подвергнутого индукционно-термической обработке с последующей модификацией наночастицами гидроксиапатита) была подготовлена в рамках выполнения завершающей части экспериментальных исследований по докторской диссертации **Александра Фомина** и международной программы «**Михаил Ломоносов**» в 2016 г. (Ил.10) [10]. Данная публикация, согласно данным базы «Scopus», на данный момент имеет наибольшее цитирование из числа научных работ профессорско-преподавательского состава кафедры МБИ.



## Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles

Aleksandr Fomin<sup>a,\*</sup>, Sergey Dorozhkin<sup>b</sup>, Marina Fomina<sup>a</sup>, Vladimir Koshuro<sup>a</sup>, Igor Rodionov<sup>a</sup>, Andrey Zakharevich<sup>c</sup>, Natalia Petrova<sup>c</sup>, Aleksandr Skaptsov<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politehnicheskaya Street, Saratov 410054, Russia

<sup>b</sup> Kudrinskaja Square 1-155, Moscow 123242, Russia

<sup>c</sup> Saratov State University, Institute of Nanostructures and Biosystems, 83 Astrakhanskaya Street, Saratov 410012, Russia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 March 2016

Received in revised form

26 March 2016

Accepted 28 March 2016

Available online 31 March 2016

#### Keywords:

Titania

Hydroxyapatite

Coatings

Induction heat treatment

### ABSTRACT

Coatings of titania (TiO<sub>2</sub>) and "titania-hydroxyapatite" were prepared by oxidation of commercially pure titanium VT1-00 using induction heat treatment (IHT), followed by modification with colloidal hydroxyapatite (HAp) nanoparticles. The IHT treatment was performed at temperatures within 600–1200 °C for 300 s. According to the results of scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), energy dispersive X-ray fluorescent analysis (EDX), nanoindentation and *in vitro* testing, titania coatings of high morphological heterogeneity, and high mechanical properties and biocompatibility were formed on the titanium surface after IHT. The coatings were found to consist of nano- and submicron crystals of oval, needle-like, plate and prismatic shapes. A subsequent modification with HAp nanoparticles of the coated titanium substrate leads to accelerated formation of mechanically strong oxidebioceramic composite coatings. It was established that the porous oxide coatings modified with nanoparticles of HAp that were formed at temperatures from 800 to 1000 °C and holding for at least 30 s had a high biocompatibility.

© 2016 Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. All rights reserved.

**Ил.10.** Титульная страница первой статьи молодых ученых кафедры МБИ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Ceramics International](#)» (2016 г.) [10].

По результатам отборочной процедуры комиссия, состоящая из российских и немецких профессоров, положительно оценила заявку докторанта **Александра Фомина** для выполнения государственного задания (проект № 11.687.2016/ДААД от 11.01.2016 г.) в рамках Совместной программы «Михаил Ломоносов» Министерства образования и науки РФ и Немецкой службы академических обменов (DAAD): научно-исследовательские стипендии и научные стажировки. Проектная тема «Изменения фазово-структурных характеристик и физико-механических свойств биосовместимых металлических материалов при обработке низкотемпературной плазмой и модифицировании токами высокой частоты» успешно завершена в 2016 году на базе Университета прикладных наук (Бранденбург-на-Хафеле) и Магдебургского университета имени Отто фон Герике (Магдебург) [11]. Данный проект дает возможность российским аспирантам, докторантам и преподавателям (до 45 лет) технических и естественных наук пройти стажировку в университетах и внеуниверситетских научных центрах Германии с целью проведения исследований в рамках разрабатываемой диссертации или иного научного проекта (Ил.11). Уникальность такого международного сотрудничества связана с тем, что у молодых исследователей появляется реальная возможность использовать высокотехнологичное оборудование «чистых комнат», в частности электронные микроскопы, рентгеновские дифрактометры, инфракрасные спектрометры, конфокальные микроскопы, высокоточные электронно-измерительные приборы, установки вакуумно-конденсационного распыления и нанесения тонких пленок и покрытий, фотолитографических и химических участков. Зарубежные ученые (приглашающие профессора) в случае плодотворной работы предлагают расширить международную кооперацию в рамках двухсторонних и интернациональных исследовательских проектов различного уровня.



**Ил.11.** Докторант **Александр Фомин** выполняет электронно-микроскопический анализ материалов и химическое травление поверхности титана в «чистой комнате» Магдебургского университета имени Отто фон Герике (сентябрь–декабрь 2016 г.).

Интерес к такой деятельности также связан с ознакомлением с современной техникой и аппаратурой для выполнения научных исследований, а также проведением занятий и изучением библиотечных фондов современной научно-технической литературы, включая статьи, справочники, стандарты (ISO) и прочие нормы (**Ил.12**).



**Ил.12.** Лекционная аудитория (вверху, слева), библиотека (вверху, справа), производственный участок лазерной вырезки стальных фильтрующих изделий для автомобильной промышленности (внизу, слева) и высокотехнологичные образцы металлополимерных и керамических конструкций для электронной техники.

Запланированным итогом научных исследований является опубликование серии статей в рецензируемых отечественных и высокорейтинговых зарубежных журналах, специализирующихся на освещении передовых достижений науки и техники. Прохождение стажировки не исключает, а наоборот, способствует расширению международных связей с вузами других стран. Так, представитель СГТУ принял участие в отчетном семинаре Университета прикладных наук Бранденбурга-на-Хафеле (**Ил.13**) и международной конференции «57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University» в Риге (Латвия) 13-14 октября 2016 г. [**12**].



**Ил.13.** Докторант Александр Фомин выступает с докладом в рамках отчетного семинара DAAD в Университете прикладных наук Бранденбурга-на-Хафеле (ноябрь 2016 г.).

Помимо академической части исследований, в рамках стажировки имелась возможность принять участие в крупнейшей отраслевой выставке оборудования и технологии обработки листового металла «EuroBLECH» в Ганновере (**Ил.14**).



**Ил.14.** Выставка «EuroBLECH 2016» в Ганновере и некоторые ее экспонаты: роботы-манипуляторы большой грузоподъемности (вверху, справа), установка для гидроабразивной резки металлов и керамики (внизу, справа), защитные маски для сварки (внизу, справа).

В октябре 2016 г. «EuroBLECH 2016» представил участникам и посетителям полный обзор преобладающих тенденций в индустрии обработки листового металла. В восьми залах около 1550 участников из 40 стран продемонстрировали впечатляющий ассортимент оборудования, инструментов и систем. Тематика выставки охватила весь спектр технологий металлообработки: листовой металл, трубы, профили (черные и цветные металлы); готовые изделия, компоненты, сборка; механизмы и технологии для перемещения и транспортировки; технологии и оборудование для резки, штамповки, формовки и гибки листа; обработка труб и профилей; компоненты оборудования; сборка, сварка и крепеж; обработка поверхности листового металла; инструменты и штампы; измерительная аппаратура и приборы контроля; система управления качеством; CAD/CAM, технологии обработки данных; оборудование для складов и хранения; защита окружающей среды, вторичная переработка; безопасность на рабочем месте; исследования и разработки. Образцы титановых конструкций с покрытиями и системы контроля структуры металлоизделий были представлены в рамках секции «Измерительная аппаратура и приборы контроля».

По мере развития исследовательской деятельности и повышения эффективности выполнения научных проектов становится важным повысить качество достигнутых результатов за счет независимой сторонней оценки полученных результатов, например при их опубликовании в рецензируемых и высокорейтинговых изданиях. Молодые ученые кафедры МБИ продолжили работу в данном направлении и в 2017 году представили вторую рукопись в журнал «[Ceramics International](#)» с названием «Structure and Mechanical Properties of Hydroxyapatite Coatings Produced on Titanium Using Plasma Spraying with Induction Preheating» (Структура и механические свойства гидроксиапатитовых покрытий, полученных на титане с применением плазменного напыления с индукционным подогревом основы) (Ил.15) [13].



**Ил.15.** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Ceramics International](#)» (2017 г.) [13].

Данная статья явилась завершающей публикацией перед защитой докторской диссертации на тему «Научные основы термических процессов получения оксидных покрытий на титановых медицинских изделиях с применением токов высокой частоты», которую **Александр Фомин** представил и защитил в ноябре 2017 г. [14]. Стоит отметить, что один из отзывов на автореферат диссертации был направлен от зарубежного коллеги **Dr. S. Aman**, старшего научного сотрудника Магдебургского университета имени Отто фон Герике. В 2017 года молодой ученый кафедры МБИ также принял участие в международной конференции по композитам «[20th International Conference on Composite Structure](#)» в Париже (Франция) с 4 по 7 сентября 2017 (Ил.16).



**Ил.16.** Открытие конференции по композитам в Национальной консерватории искусств и ремесел (Париж, сентябрь 2017 г.).

Участниками данного мероприятия стали более 650 ученых со всего мира. Молодой коллектив кафедры представил исследования по созданию функциональных покрытий на тантале и цирконии за счет индукционно-термической обработки: «Composite System Ti-Ta-(Ti,Ta)<sub>x</sub>O<sub>y</sub> Obtained by Spark Alloying and Thermally Stimulated Modification» (Композиционная структура Ti-Ta-(Ti,Ta)<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, полученная электроискровым легированием и термической модификацией); «Surface Morphology of Zirconium after Treatment with High-Frequency Currents» (Морфология поверхности циркония, подвергнутого обработке токами высокой частоты). Оба доклада вызвали большой интерес у организационного комитета и были рекомендованы для опубликования в высокорейтинговом журнале «[Composite Structures](#)» (импакт-фактор 3,858 за 2017 г.). Велась сложная и планомерная работа по подготовке данных рукописей и еще более сложная работа по работе с рецензентами, в итоге в 2018 году молодые ученые кафедры опубликовали четыре статьи в изданиях 1-ой четверти (Q1) [15–18] (Ил.17(1–4)).

Composite Structures 196 (2018) 1–7



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

**Composite Structures**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/compstruct](http://www.elsevier.com/locate/compstruct)



---

**Metal oxide (Ti,Ta)-(TiO<sub>2</sub>,TaO) coatings produced on titanium using electrospray alloying and modified by induction heat treatment**

Vladimir Koshuro, Marina Fomina, Aleksandr Fomin\*, Igor Rodionov

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya str., Saratov 410054, Russia*

---

**ARTICLE INFO**

**Keywords:**  
Electrospray alloying  
Induction heat treatment  
Tantalum  
Tantalum oxide  
Metal oxide coating

**ABSTRACT**

Metal oxide coatings (Ti,Ta)-(TiO<sub>2</sub>,TaO) on VT1-00 cp-titanium and VT16 titanium alloy (Ti-3Al-4.5 V-5.0Mo) were formed by electrospray alloying (ESA) at an operating current from 1 to 2.5 A and subsequent induction heat treatment (IHT) with the duration from 30 to 300 s at the temperature of 800 °C. ESA at a high operating current  $I = 2.5$  A and subsequent IHT with a long exposure time  $t = 300$  s ensured the formation of coatings with a high content of tantalum (about 4.5–5%) and tantalum oxide TaO (about 7–8%). The resulting coatings were characterized by high hardness of 9.5–15 GPa and elastic modulus  $E$  of 450–700 GPa.

**Ил.17(1).** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Composite Structures](#)» (2018 г.) [15].



## Surface morphology of zirconium after treatment with high-frequency currents

Vladimir Koshuro<sup>a</sup>, Marina Fomina<sup>a</sup>, Aleksey Voyko<sup>a</sup>, Igor Rodionov<sup>a</sup>, Andrey Zakharevich<sup>b</sup>, Aleksandr Skaptsov<sup>b</sup>, Aleksandr Fomin<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

<sup>b</sup>Saratov State University, Institute of Nanostructures and Biosystems, 83 Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia

### ARTICLE INFO ABSTRACT

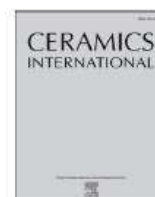
#### Keywords:

Zirconium  
Zirconia coatings  
Induction heat treatment  
Surface morphology

Coatings of zirconia were prepared by oxidation of zirconium grade E110 using induction heat treatment (IHT) with high-frequency currents. The IHT was performed at temperatures within 600–1200 °C for 30–300 s. According to the results of scanning electron microscopy, X-ray diffraction, energy dispersive analysis, and nanoindentation, zirconia coatings with high hardness (about  $17 \pm 0.4$  GPa) and elastic modulus (about 270–320 GPa) were formed on zirconium surface after semi-rough turning followed by IHT at 1000 °C for 30 s. The coatings consisted of nanocrystals with an average size of  $37 \pm 2$  nm. Zirconia coatings with high morphological heterogeneity (nanocrystals with an average size of  $45 \pm 2$  nm), moderate hardness (about 4.5–5.5 GPa) and high elastic modulus (about 272–285 GPa) were formed on zirconium surface after abrasive blasting followed by IHT at 1000 °C for 30 s.

**Ил.17(2).** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Composite Structures](#)» (2018 г.) [16].

Одна из статей была посвящена новому направлению кафедры – инструментальной тематике, а именно созданию сменных режущих пластин с твердыми и износостойкими покрытиями системы (Ti/TiO<sub>2</sub>) на поверхности хромистой инструментальной стали [18]. Данное направление сейчас развивается аспирантами кафедры **Иваном Егоровым**, **Андреем Щелкуновым**, **Алексеем Войко** и **Максимом Федосеевым** под научным руководством д.т.н., заведующего кафедрой **Александра Фомина**.



## Composition, structure and mechanical properties of metal oxide coatings produced on titanium using plasma spraying and modified by micro-arc oxidation

Vladimir Koshuro, Aleksandr Fomin<sup>\*</sup>, Igor Rodionov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya str., Saratov 410054, Russia

### ARTICLE INFO ABSTRACT

#### Keywords:

Alumina  
Plasma spraying  
Titanium  
Micro-arc oxidation

Metal oxide coatings on VT6 titanium alloy were formed by plasma spraying of aluminum oxide powder and subsequent microarc oxidation at a current density from 1 to 3 kA/m<sup>2</sup>. As a result of combined treatment, metal oxide coatings consisting of a mixture of aluminum and titanium oxides were obtained on the surface of titanium samples. The most pronounced changes in the morphology of the plasma-sprayed coating were observed at the highest current density of 3 kA/m<sup>2</sup>. The open porosity decreased from 56% to 38% due to the modification by micro-arc discharges, whereas the microhardness increased from  $1013 \pm 150$  HV to  $1639 \pm 31$  HV.

**Ил.17(3).** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Ceramics International](#)» (2018 г.) [17].



## Composite “1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>” structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment

Aleksandr Fomin<sup>\*</sup>, Ivan Egorov, Andrey Shchelkunov, Marina Fomina, Vladimir Koshuro, Igor Rodionov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya str., Saratov 410054, Russia

### ARTICLE INFO ABSTRACT

#### Keywords:

Titanium  
Tool steel  
Titania coatings  
Resistance welding  
Induction heat treatment

The composite “1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>” structure was prepared by resistance welding (RW) with subsequent induction heat treatment (IHT). RW of tool steel with titanium was performed at an electric power in the range of 3.5–4 kW with the pulse duration of 0.25–1.0 s. IHT was performed at the temperatures in the range of 950–1600 °C for 5–60 s for titanium inserts, and the temperature of the steel substrate did not exceed the melting point (about 1370 °C). At the electric power of 3.5 kW with the pulse duration not more than 0.5 s, Fe–Ti transition area of the weld joint with the moderate hardness about  $4.0 \pm 0.5$  GPa ( $410 \pm 50$  HV<sub>0.05</sub>) was formed. According to the results of scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray analysis (EDX) and Vickers hardness test, titania coatings with high hardness about  $2500 \pm 250$  HV<sub>0.05</sub> and  $950 \pm 50$  HV<sub>0.05</sub> were formed on titanium surface after IHT at  $1500 \pm 50$  °C for  $30 \pm 10$  s. Preliminary results on the cuttability tests of the experimental replaceable cutting inserts were obtained, according to which the composite “1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>” structure enabled the fine turning of X40Cr13 steel (43 HRC or 415 HV).

**Ил.17(4).** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Composite Structures](#)» (2018 г.) [18].

Также к коллективу соавторов присоединился **Вячеслав Папшев (Dr. V. Papchev)**, в прошлом выпускник кафедры «МВПО» (СГТУ) и на тот момент уже научный сотрудник зарубежной компании «TAV Dental» (специализация на изготовлении имплантатов из циркония и диоксида циркония). Совместная публикация была посвящена разработке эффективного алгоритма использования специализированного программного обеспечения для морфологического анализа пористо-кристаллической структуры металлических (танталовых) покрытий на титане, получаемых электроискровым легированием (**Ил.18**) [19].



### Data Article



## Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying

Marina Fomina<sup>a</sup>, Vladimir Koshuro<sup>a</sup>, Vyacheslav Papshev<sup>a,b</sup>, Igor Rodionov<sup>a</sup>, Aleksandr Fomin<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054 Saratov, Russia

<sup>b</sup> TAV Dental, 2283202 Shlomi, Israel

### ARTICLE INFO ABSTRACT

#### Article history:

Received 12 March 2018  
Received in revised form  
24 July 2018  
Accepted 10 September 2018  
Available online 14 September 2018

The article presents the data of scanning electron microscopy of the surface morphology of tantalum coatings produced by electrospark alloying. To perform the statistical analysis of open porosity and morphological parameters of the coatings, raw digital images of the structure were studied. In this case, “AGPM” software for the analysis of geometric parameters of microobjects was used. When processing digital images of the surface morphology, open porosity, total quantity, average size and dispersion of the structural elements (particles and pores) were determined, and typical distribution patterns of structural elements were obtained from linear dimensions.

© 2018 The Authors. Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Ил.18.** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в зарубежном издании «[Data in Brief](#)» (2018 г.) [19].

Молодой доктор наук, профессор **Александр Фомин** представил результаты коллективного научного исследования на крупной международной конференции по механике композитов «4th International Conference on Mechanics of Composites» (MechComp2018), проходившей с 9 по 12 июля 2018 г. в Мадридском университете имени Карлоса III (Испания) (Ил.19). В рамках секции «Functionally Graded Materials and Structures», модератором которой выступил саратовский ученый, был представлен доклад на тему: «Composite Structure "Steel 1.2361 – Ti – TiO<sub>2</sub>" and Its Production by Contact Welding with Subsequent Induction-Heat Treatment» (Композиционная структура "Сталь 1.2361 – Ti – TiO<sub>2</sub>" и ее получение контактной сваркой с последующей индукционно-термической обработкой) (Ил.17(4)) [18]. Ученому сообществу были представлены результаты исследования нового типа композиционной структуры «сталь – титан / рутил» с экстремально высокой твердостью. Данные образцы композиционных структур имеют высокий потенциал для использования в металлообрабатывающей отрасли, в частности при изготовлении сменных режущих пластин резцов.

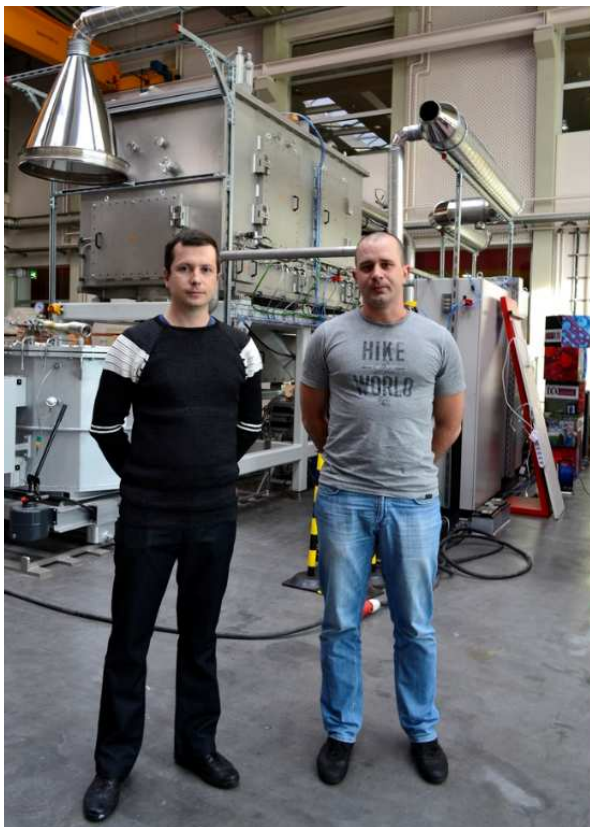


**Ил.19.** Профессор **Александр Фомин** и председатель конференции «MechComp2018» **Prof. Antonio Ferreira** (Мадридский университет имени Карлоса III, 2018 г.); дискуссия после секционного доклада.

Молодые ученые д.т.н., профессор **Александр Фомин** и к.т.н., доцент **Владимир Кошуро** стали победителями конкурса, проводившегося в рамках [совместной российско-германской программы «Михаил Ломоносов»](#) Министерства образования и науки Российской Федерации и Германской службы академических обменов (DAAD). В рамках данной программы в 2018 году ученые прошли трехмесячную научную стажировку в Германии, где ими были выполнены два проекта по госзаданию:

1. «Исследование состава, структуры и механических свойств металлических материалов и покрытий, подвергнутых высокотемпературной обработке токами высокой частоты» [20];
2. «Исследование структуры и механических свойств инструментальной стали, подвергнутой электроискровому легированию TiC и TiC-WC керамикой и финишной обработке» [21].

В ходе стажировки были усовершенствованы высокотемпературные процессы индукционной термообработки тугоплавких металлов (титана, циркония, тантала), электроискрового и финишного формообразования покрытий из высокопрочных твердосплавных материалов на стальных изделиях. Данное направление работ является продолжением двустороннего сотрудничества между СГТУ имени Гагарина Ю.А., немецкими вузами и производственными компаниями (Ил.20).



**Ил.20.** Молодые ученые кафедры МБИ прошли научную стажировку в Германии (слева – экспериментальная фабрика / литейное производство прецизионных алюминиевых сплавов) и приняли участие в работе крупнейшей выставки по обработке листового металла «EuroBLECH 2018» в Ганновере (2018 г.).

Помимо публикационной активности, молодые ученые кафедры уделяют большое внимание повышению качества рукописных материалов. Профессор **Александр Фомин** с 2018 г. стал рецензентом ряда профильных материаловедческих журналов издательства «Elsevier» и за многократное и высококачественное рассмотрение рукописей был удостоен **сертификата Почетного рецензента «Outstanding Contribution in Reviewing»** для журнала «Ceramics International» (октябрь, 2018 г.) (**Ил.21**).



**Ил.21.** Сертификат почетного рецензента (2018 г.).

В 2019 году исследовательская работа по ряду проектов, в частности Российского научного фонда (проект РНФ 18-79-10040) и Гранта Президента РФ (проект МД-157.2019.8) для молодых докторов наук, была отражена в моноавторских статьях, изданных в высокорейтинговых журналах «Ceramics International» и «Composite Structures» (Ил.22(1–2)) [22,23]. Последние разработки касаются исследования сверхтвердых материалов (с твердостью  $> 40$  ГПа) в виде тонких покрытий и функционально-градиентных структур, формируемых на титане, цирконии и тантале за счет индукционно-термической обработки.

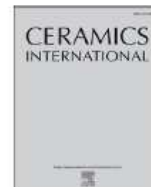
Ceramics International 45 (2019) 8258–8264



Contents lists available at ScienceDirect

Ceramics International

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ceramint](http://www.elsevier.com/locate/ceramint)



## Superhard titania coatings produced on titanium using induction heat treatment

Aleksandr Fomin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politehnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia



### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Superhard materials  
Titania coatings  
Induction heat treatment  
Crystal structure  
Titanium

### ABSTRACT

Superhard titania coatings were prepared by high-temperature oxidation of commercially pure (cp) titanium using induction heat treatment (IHT). IHT was performed at the temperatures in the range of 850–1300 °C for 1–300 s in air atmosphere. According to the results of energy dispersive X-ray analysis (EDX), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), micro- and nanoindentation tests, titania coatings with submicron crystals characterized by high hardness  $H = 52$ –65 GPa, plasticity index  $H/E = 0.1$ –0.13, and brittle fracture resistance  $H^3/E^2 = 0.55$ –1.09 GPa were formed on cp-Ti due to IHT at  $T = 1200$ –1250 °C and exposure duration  $t = 3$ –5 s. The resulting  $\text{TiO}_2$  coatings indicate that there is a possibility for creating superhard materials using high-temperature conditions for the growth of crystals at the atmospheric pressure of air.

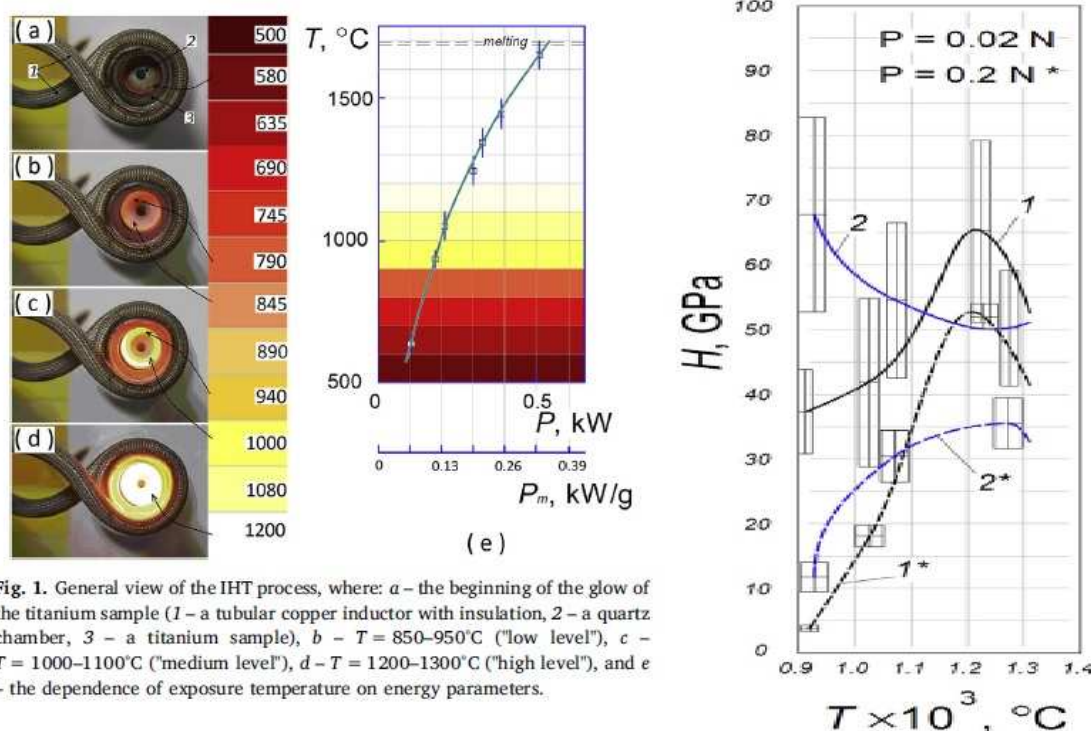


Fig. 1. General view of the IHT process, where: a – the beginning of the glow of the titanium sample (1 – a tubular copper inductor with insulation, 2 – a quartz chamber, 3 – a titanium sample), b –  $T = 850$ – $950$  °C ("low level"), c –  $T = 1000$ – $1100$  °C ("medium level"), d –  $T = 1200$ – $1300$  °C ("high level"), and e – the dependence of exposure temperature on energy parameters.

Ил.22(1). Титульная страница и графический материал статьи молодого ученого СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «Ceramics International» (2019 г.) [22].



## Functionally graded zirconium oxide coatings produced on zirconium using induction heat treatment

Aleksandr Fomin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia



### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Functionally graded coatings  
Zirconium oxide  
Zirconium  
Induction heat treatment  
Superhard materials

### ABSTRACT

Zirconium oxide coatings were produced by induction heat treatment (IHT) of E110 zirconium. The IHT was performed at temperatures within 600–1200 °C for 30–300 s. According to the results of scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive analysis (EDX), X-ray diffraction (XRD), and nanoindentation, zirconium oxide coatings with high hardness of  $44.56 \pm 7.40$  GPa (at load of 10 mN),  $25.76 \pm 2.78$  GPa (at load of 200 mN), and elastic modulus of  $387 \pm 55$  GPa (at load of 10 mN),  $372 \pm 20$  GPa (at load of 200 mN) were formed on zirconium by IHT at 800–850 °C for 300 s. The functionally graded oxide coatings consisted of a mixture of  $\alpha$ -ZrO<sub>2</sub> (baddeleyite) and  $\gamma$ -ZrO<sub>2</sub> (cubic zirconia), the oxygen concentration on the surface reached a maximum of  $69.52 \pm 3.16$  at% and the thickness of the oxygen-rich layer was about 8–10  $\mu$ m.

**Ил.22(2).** Титульная страница статьи молодого ученого СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «Composite Structures» (2019 г.) [23].

Завершены исследования по упрочняющей индукционно-термической обработке конструкций из нержавеющей хромоникелевой стали, результаты которой были опубликованы в коллективной статье журнала «Composite Structures» (декабрь, 2019 г.) (Ил.23). Установлено, что тонкие оксиды хрома образуют рутилоподобную структуру, которая имеет высокую прочность, твердость и биосовместимость (выполнены *in vitro* тесты) [24].



## Composite metal oxide coatings on chromium-nickel stainless steel produced by induction heat treatment

Aleksandr Fomin\*, Marina Fomina, Vladimir Koshuro, Igor Rodionov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Institute of Electronic Technology and Engineering, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia



### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Metal oxide coatings  
Stainless steel  
Induction heat treatment  
Surface morphology  
Hardness  
Biocompatibility

### ABSTRACT

Metal oxide coatings were formed by induction heat treatment (IHT) on the surface of 12Cr18Ni10T stainless steel. The phase composition of these coatings comprised oxides of alloying elements, such as CrO<sub>2</sub> (rutile-type phase), NiO, and slight amount of other oxides (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Nanosized morphology parameters were determined on the surface of steel samples with coatings subjected to low temperature IHT at  $T = 800$ – $850$  °C. The average size of nanograins was about 30–80 nm at an exposure within  $t = 30$  s. The equivalent hardness value (Vickers scale, HV) of the near-surface layer was  $445 \pm 10$  HV, which was slightly lower than the initial hardness value of untreated 12Cr18Ni10T steel. Hardness of the metal oxide coatings themselves  $H = 10.86 \pm 4.47$  GPa determined by the nanoindentation method was almost 4 times higher than the initial hardness of the steel surface. *In vitro* testing for biocompatibility of the metal oxide coatings confirmed that high morphological heterogeneity of the surface ensured excellent adhesion of cells.

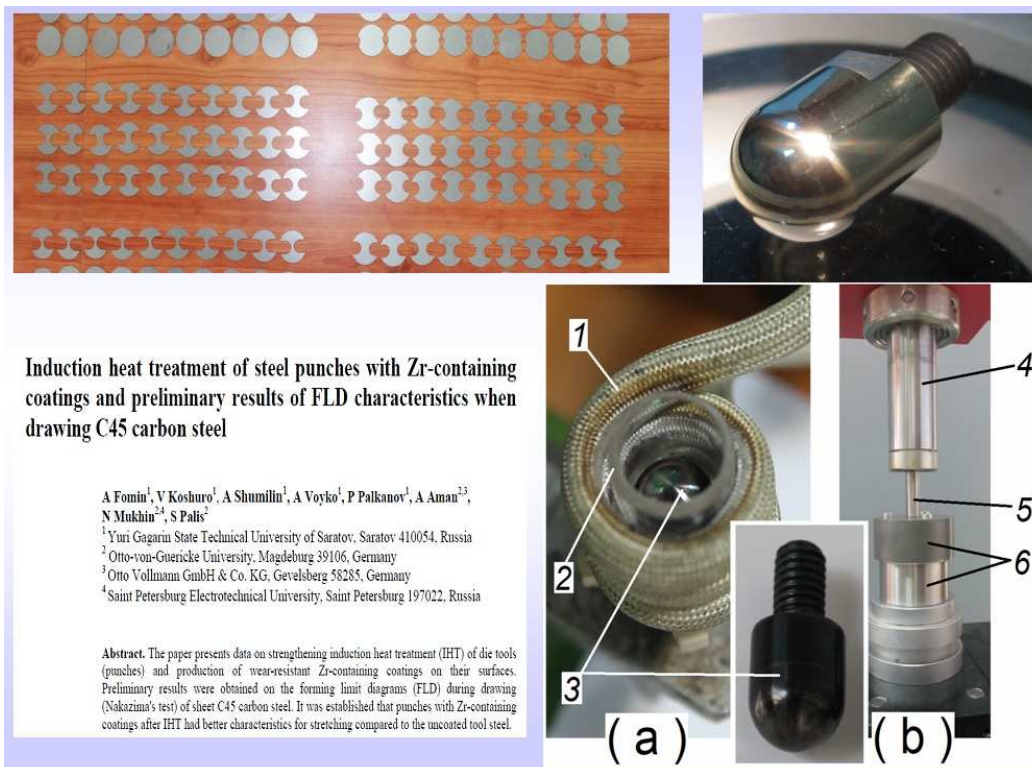
**Ил.23.** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «Composite Structures» (2019 г.) [24].

С 15 по 29 июля 2019 года профессор **Александр Фомин** посетил Германию в рамках [первого этапа краткосрочной стажировки](#) в Магдебургском университете имени Отто фон Герике. Основанием для стажировки стали высокий научный уровень результатов, полученных при выполнении работ по [программе «Михаил Ломоносов»](#) (стажировки в 2016 и 2018 годах), приглашение зарубежных коллег **Jun.-Prof. Dr. Stefan Palis** и **Dr. Alexander Aman** для развития совместной темы «Формирование износостойких металлокерамических покрытий на стальных штамповых инструментах». Данное мероприятие было поддержано руководством вуза в рамках [Программы развития СГТУ имени Гагарина Ю.А. на 2017–2020 гг.](#) За время короткого визита были уточнены параметры штампового инструмента, включая типы износостойких покрытий, в которых заинтересованы зарубежные компании. Молодой ученый посетил металлообрабатывающие предприятия Германии, поставляющие свои детали и сборочные единицы на все автомобилестроительные заводы стран Евросоюза ([Ил.24](#)).



**Ил.24.** Профессор **Александр Фомин** на металлообрабатывающем заводе, специализирующемся на роботизированной сварке и штамповке металлоизделий (на заднем фоне расположен пресс с усилием 1000 тс) (г. Цвёниц, Германия, 2019 г.).

В ходе многолетнего сотрудничества международный коллектив сделал достаточно большой задел для развития инструментальной тематики в рамках крупных научно-исследовательских и прикладных (хоздоговорных) тем. Предварительные результаты связаны с изготовлением штамповых форм и тестового инструмента для глубокой вытяжки ([Ил.25](#)). Активно ведутся исследовательские работы по разработке твердых и износостойких покрытий для штампового инструмента, выполняются тесты по зарубежным стандартам для определения вытяжной способности конструкционной и высокопрочной сталей, а также алюминиевых сплавов. В работе принимают участие студенты и аспиранты **Павел Палканов** и **Алексей Войко**, молодые ученые – доценты **Владимир Кошуро** и **Александр Шумилин** и зарубежные коллеги **Dr. N. Mukhin**, **Dr. A. Aman** и **Dr. S. Palis**.



**Ил.25.** Экспериментальные образцы штампового инструмента для тестирования металлов и сплавов, оснастки для вытяжки и модифицирующего индукционно-термического оборудования, разработанного молодыми учеными.

Профессор **Александр Фомин** в очередной раз представил результаты коллективного научного исследования на международной конференции по механике композитов «**5th International Conference on Mechanics of Composites**», проходившей с 1 по 4 июля 2019 г. в Лиссабоне (Португалия) (**Ил.26**).



**Ил.26.** Докладчики из Китая, Турции, Польши и России на секции «Функционально-градиентные материалы и структуры» на международной конференции по механике композитов в Высшем техническом институте Лиссабона (2019 г.).

Основной секционный доклад отражал наиболее важные результаты исследований по проекту **РНФ 18-79-10040**, связанные с созданием нового типа слоистой композиционной структуры «титан – тантал / пентоксид тантала» с экстремально высокой твердостью (около 55 ГПа), полученной вакуумно-конденсационным распылением и контактной сваркой с последующей модификацией токами высокой частоты. Данные образцы композиционных структур имеют высокий потенциал для использования в восстановительной медицине при изготовлении малогабаритных конструкций имплантатов. Статья в высокорейтинговом издании «**Composite Structures**» вышла в начале 2020 года (**Ил.27**) [25].



## Functionally graded “Ti-base + (Ta, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-coatings” structure and its production using induction heat treatment

Marina Fomina<sup>a</sup>, Vladimir Koshuro<sup>a</sup>, Aleksandr Shumilin<sup>a</sup>, Aleksey Voyko<sup>a</sup>,  
Andrey Zakharevich<sup>b</sup>, Aleksandr Skaptsov<sup>b</sup>, Aleksey Steinhauer<sup>a</sup>, Aleksandr Fomin<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

<sup>b</sup> Saratov State University, 83 Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia



### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Tantalum  
Tantalum oxide  
Induction heat treatment  
Hardness  
Layered system

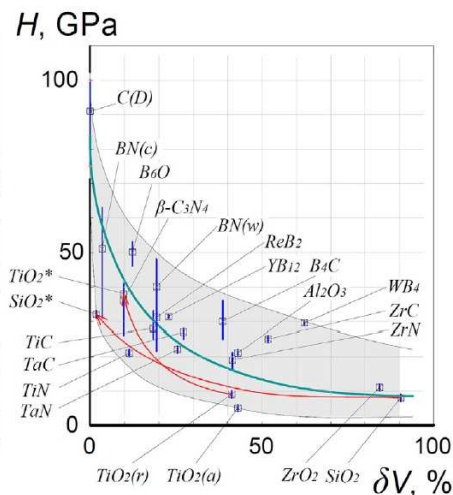
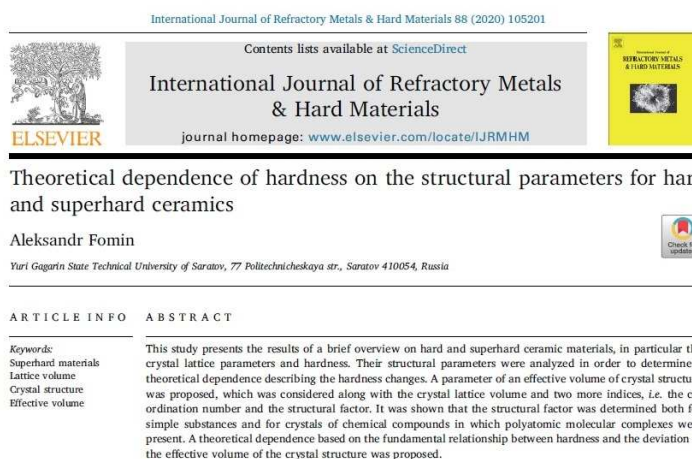
### ABSTRACT

On the surface of the “Ti-base + Ta-coating” layered system, tantalum oxide coatings were obtained by induction heat treatment (IHT) within 600–1600 °C for 1–120 s. It was established that in the entire range of temperature and duration of IHT, the highest oxide with an oxygen concentration  $C_{[O]} = 70.35\text{--}72.48$  at.% was formed on tantalum. An oxide coating without cracks having an average grain size  $D_G = 170\text{--}340$  nm and pore size  $D_p = 130\text{--}150$  nm was formed at  $T = 1000\text{--}1050$  °C. With an exposure time  $t = 30\text{--}120$  s in the temperature range from 850 to 900 to 1000–1050 °C, high hardness values about 39–47 HRA (105–135 HV) for the tantalum layer and about 69–84 HRN15 (240–495 HV) for the near-surface layer were noted. These samples also had a superhard oxide coating with  $H_{0.01} = 55.27 \pm 16.00$  GPa and  $H_{0.1} = 39.09 \pm 13.10$  GPa. The results of the study of these samples showed that high microhardness of  $1579 \pm 537$  HV<sub>0.2</sub> combined with high Rockwell hardness and low defectiveness of the oxide coating allowed the creation of a mechanically stable “Ti-base + (Ta, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-coating” layered system.

**Ил.27.** Титульная страница статьи молодых ученых СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «[Composite Structures](#)» (2020 г.) [25].

В начале октября 2019 года прошел [второй этап стажировки в Магдебургском университете имени Отто фон Герике \(Германия\)](#) по расширенному направлению темы «Исследование структуры и свойств сварной сталь-титановой конструкции и процесса ее последующей химико-термической обработки токами высокой частоты для создания металлообрабатывающего инструмента с износостойкими металлооксидными покрытиями». Основные результаты этой работы легли в основу промежуточного отчета научных исследований по [Гранту Президента РФ \(проект МД-157.2019.8\)](#) для молодых докторов наук.

При выполнении теоретической части исследований по гранту [РНФ № 18-79-10040](#), руководитель проекта – заведующий кафедрой МБИ, ведущий научный сотрудник **Александр Фомин** представил научной общественности классификацию и теоретическое обоснование зависимости твердости для керамических материалов от параметров кристаллической структуры, в частности объема и типа решетки, а также предложенного «структурного  $K$ -фактора», определяющего «эффективный объем кристаллической структуры». В исследовании предложено описание установленной закономерности для сверхтвердых материалов (алмаз, вюртцитный и кубический нитрид бора, бета-нитрид углерода, субоксид бора, диоксид титана со структурой стиховита), твердых материалов (карбид бора, корунд, кварц, рутил, карбиды, нитриды и бориды тугоплавких металлов) и мягких материалов (графит, гексагональный нитрид бора). Данные соединения имеют различную молекулярную структуру, которая может быть отнесена к «простым» или «сложным» соединениям со сверхструктурой. В работе также приводятся результаты поискового исследования, согласно которому имеются данные по переходу твердых материалов в сверхтвердое состояние, сопровождающемуся фазовым переходом в твердом состоянии, под воздействием экстремально высокого давления. Статья опубликована в высокорейтинговом журнале «[International Journal of Refractory Metals and Hard Materials](#)» (импакт-фактор 2.794 за 2018 г.), который индексируется в наукометрических системах: Q1 – «Web of Science» по рубрике «Металлургия и металлургические технологии»; Q1 – «Scopus» по рубрикам «Керамика и композиты» (основной), «Химия материалов», «Металлы и сплавы» ([Ил.28](#)) [26].



**Ил.28.** Титульная страница статьи молодого ученого СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «International Journal of Refractory Metals and Hard Materials» (2020 г.) [26].

Передовые исследования коллектива молодых ученых кафедры МБИ продолжились в части развития термической и химико-термической обработки металлов и сплавов с применением индукционного нагрева. На данном направлении значительная часть экспериментальной работы выполняется аспирантом первого курса **Алексеем Войко**, который вплотную приблизился к разработке высокоэффективной электротехнологии индукционного упрочнения титановых тонкослойных элементов за счет высокотемпературной цементации и формирования карбонитридных покрытий с высокой твердостью, электропроводностью и биосовместимостью. Рукопись, отражающая данные исследования, была одобрена к публикации в журнале «Composite Structures» и уже доступна для ознакомления на сайте издателя (Ил.29) [27].

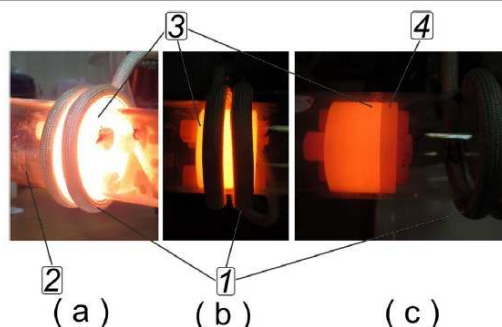


Fig. 1. Arrangement of structural elements of the device for thermochemical treatment of titanium samples at high-temperature exposure (a, b) and slow cooling (c): 1 – an inductor; 2 – a quartz tube; 3 – a sample container; 4 – a cover plate of the container.

**Ил.29.** Титульная страница статьи молодого ученого СГТУ, опубликованной в высокорейтинговом зарубежном издании «Composite Structures» (2020 г.) [27].

Таким образом, основной задачей молодых ученых кафедры МБИ в рамках международной кооперации является сохранение наработанных связей с зарубежными коллегами, особенно научными сотрудниками технических вузов, представителями наукоемких стартап-проектов и крупных производственных компаний металлообработки. Для успешного выполнения индикаторных показателей действующих научных программ (РНФ, РФФИ, грантов/стипендий Президента РФ и проектов государственного задания) и будущих заявок необходимо повышать уровень исследований в части представления экспериментального и теоретического материала в виде статей, публикуемых в высокорейтинговых изданиях первой четверти (Q1), например «Composite Structures», «Ceramics International», «International Journal of Refractory Metals and Hard Materials» и других профильных журналах.

#### Ссылки:

- [1] Фомин А.А. Плазменно-индукционное нанесение покрытий с улучшенными параметрами биосовместимости при изготовлении дентальных имплантатов; дисс. канд. техн. наук (спец. 05.09.10 – Электротехнология). <http://sstu.ru/aspirantu/dissertation/1070-fomin-aleksandr-aleksandrovich.html>.
- [2] Фомин А.А., Штейнгауэр А.Б., и др. Биосовместимые наноструктурированные гидроксиапатитовые покрытия и технология их получения плазменно-индукционным напылением, *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2011. № 6. С. 35-42. [www.mashin.ru/files/2011/utp6\\_11\\_1.pdf](http://www.mashin.ru/files/2011/utp6_11_1.pdf).
- [3] ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. (гос. контракт № П2535 от 20.11.09).
- [4] Fomin A.A., Fomina M.A., et al. Production of nano-ceramic coatings on titanium implants, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015. Vol. 77. Art. number 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/77/1/012015>.
- [5] Fomin A., Fomina M., et al. Induction heat treatment device and technique of bioceramic coatings production on titanium implants, *Proc. IEEE, 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2014)*, 2014. pp. 111-115. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2014.6998203>.
- [6] Fomin A.A. Chapter 13 – Plasma-induction spraying of nanocrystalline hydroxyapatite coatings obtained on titanium intraosseous implants», *Handbook of Nanoceramic and Nanocomposite Coatings and Materials*, Oxford, Butterworth-Heinemann (imprint of Elsevier Ltd.), 2015. pp. 293-317. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799947-0.00013-4>.
- [7] Fomin A.A., et al. Chapter 19 – Chemical composition, structure and properties of the surface of titanium VT1-00 and its alloy VT16 after induction heat treatment, *Handbook of Nanoceramic and Nanocomposite Coatings and Materials*, Oxford, Butterworth-Heinemann (imprint of Elsevier Ltd.), 2015. pp. 403-424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799947-0.00019-5>.
- [8] Fomin A.A., Fomina M.A., Koshuro V.A., et al. Oxide-bioceramic coatings obtained on titanium items by the induction heat treatment and modified with hydroxyapatite nanoparticles, *Proc. SPIE, Nanotechnology VII*, 2015. Vol. 9519. Art. number 95190I. <https://doi.org/10.1117/12.2180134>.
- [9] Fomin A.A., Fomina M.A., et al. Superhard bioceramic coatings produced on dental implants by the induction heat treatment and surface modification, *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, 2015. Vol. S. pp. 14. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3393.4564>.
- [10] Fomin A., Fomina M., Koshuro V., Zakharevich A., Skaptsov A., et al. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles, *Ceramics International*, 2016. Vol. 42(9). pp. 10838-10846. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.213>.
- [11] Фомин А.А. Изменение фазово-структурных характеристик и физико-механических свойств биосовместимых металлических материалов при обработке низкотемпературной плазмой и модифицированием токами высокой частоты // *Отчет о НИИ* № 11.687.2016/ДААД от 11.01.2016 г. (Заказчик: Министерство образования и науки Российской Федерации). <https://elibrary.ru/item.asp?id=29387747>.
- [12] Fomin A., Fomina M. FEM modeling and experimental data of induction heating of titanium medical devices, *Proc. IEEE, 57th International Scientific Conference on Power and*

*Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016)*, 2016. Art.number 7763079. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763079>.

[13] Fomin A., Fomina M., Koshuro V., Zakharevich A., Skaptsov A., *et al.* Structure and mechanical properties of hydroxyapatite coatings produced on titanium using plasma spraying with induction preheating, *Ceramics International*, 2017. Vol. 43(14). pp. 11197-11204. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.168>.

[14] Фомин А.А. Научные основы термических процессов получения оксидных покрытий на титановых медицинских изделиях с применением токов высокой частоты; *дисс. докт. техн. наук* (спец. 05.09.10 – Электротехнология; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. <http://sstu.ru/aspirantu/dissertation/fomin-aleksandr-aleksandrovich.html>.

[15] Koshuro V., Fomina M., Fomin A., *et al.* Metal oxide (Ti,Ta)-(TiO<sub>2</sub>,TaO) coatings produced on titanium using electrospark alloying and modified by induction heat treatment, *Composite Structures*, 2018. Vol. 196. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.005>.

[16] Koshuro V., Fomina M., Voyko A., Zakharevich A., Skaptsov A., Fomin A., *et al.* Surface morphology of zirconium after treatment with high-frequency currents, *Composite Structures*, 2018. Vol. 202, pp. 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.055>.

[17] Koshuro V., Fomin A., *et al.* Composition, structure and mechanical properties of metal oxide coatings produced on titanium using plasma spraying and modified by micro-arc oxidation, *Ceramics International*, 2018. Vol. 44(11). pp. 12593-12599. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.056>.

[18] Fomin A., Egorov I., Shchelkunov A., Fomina M., Koshuro V., *et al.* Composite “1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>” structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment, *Composite Structures*, 2018. Vol. 206. pp. 467-473, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.084>.

[19] Fomina M., Koshuro V., Papshev V., Fomin A., *et al.* Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying, *Data in Brief*, 2018. Vol. 20, pp. 1409-1414. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.09.028>.

[20] Фомин А.А. Исследование состава, структуры и механических свойств металлических материалов и покрытий, подвергнутых высокотемпературной обработке токами высокой частоты // *Отчет о НИИ* № 11.12785.2018/12.2 от 03.05.2018 г. (Заказчик: Минобрнауки РФ).

[21] Кошуро В.А. Исследование структуры и механических свойств инструментальной стали, подвергнутой электроискровому легированию TiC и TiC-WC керамикой и финишной обработке // *Отчет о НИИ* № 11.12784.2018/12.2 от 03.05.2018 г. (Заказчик: Минобрнауки РФ).

[22] Fomin A. Superhard titania coatings produced on titanium using induction heat treatment, *Ceramics International*, 2019. Vol. 45(7). pp. 8258-8264. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.131>.

[23] Fomin A., Functionally graded zirconium oxide coatings produced on zirconium using induction heat treatment, *Composite Structures*, 2019. Vol. 220. pp. 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.001>.

[24] Fomin A., Fomina M., Koshuro V., *et al.* Composite metal oxide coatings on chromium-nickel stainless steel produced by induction heat treatment, *Composite Structures*, 2019. Vol. 229. Art. number 111451. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111451>.

[25] Fomina M., Koshuro V., Shumilin A., Voyko A., Zakharevich A., Skaptsov A., Steinhauer A., Fomin A. Functionally graded “Ti-base+(Ta, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-coatings” structure and its production using induction heat treatment, *Composite Structures*, 2020. Vol. 234, Art. number 111688. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111688>.

[26] Fomin A. Theoretical dependence of hardness on the structural parameters for hard and superhard ceramics, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020. Vol. 88, Art. number 105201. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105201>.

[27] Fomin A., Voyko A., Fomina M., Mokrousov S., Koshuro V. Functionally graded Ti(C,N) coatings and their production on titanium using solid-state carburization associated with induction heat treatment, *Composite Structures*, 2020. Vol. 245. Art. number 112393. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112393>.