



Санкт-Петербургский
государственный
университет

ТЕЗИСЫ УЧАСТНИКОВ

Школы-семинара

«Механика, химия и новые материалы»



Санкт-Петербургский
научный центр РАН

г. Санкт-Петербург

2022 г.

Организаторы:

- Санкт-Петербургский Государственный Университет,
- Санкт-Петербургский научный центр РАН (Научный совет по горению и взрыву в составе Объединенного научного совета по проблемам материаловедения, механики, прочности)

Мероприятие организовано в рамках мегагранта (Соглашение 075-15-2022-1114 от 30 июня 2022 г.).

ВАЛИЕВ Р.З.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Уфимский Государственный Авиационно-Технический Университет

E-mail: ruslan.valiev@ugatu.su

Многочисленные исследования последних лет свидетельствуют, что наноструктурирование металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) открывает возможность значительного повышения их механических и функциональных свойств. Использование методов ИПД позволяет создавать металлические материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, имеющей средний размер зёрен на наноуровне и содержащие нанодисперсные особенности в виде наночастиц вторых фаз, нанодвойников и необычных сегрегаций легирующих элементов на границах зёрен. Результатами такого УМЗ структур является изменение механизмов деформации и упрочнения в материалах, что позволяет реализовывать в них необычные механические свойства – сверхпрочность, сверхпластичность, очень высокие усталостную прочность и износостойкость. В докладе рассмотрены примеры демонстрации таких перспективных свойств на ряде промышленных материалов – лёгких сплавов на основе Al, Mg и Ti и нескольких сталях.

Особый интерес представляет использование ИПД обработки для создания наноматериалов с так называемыми многофункциональными свойствами, сочетающими высокие механические и функциональные свойства (коррозия, эрозионная и радиационная стойкость, электропроводность и т.д.). Представлены основные подходы к моделированию и достижению стабильности наноструктур в экстремальных условиях. Обсуждаются применения наноматериалов в инновационных разработках, направленных на их широкое использование в энергетике, медицине и технике.

ЕНИКЕЕВ Н.А.

УЛУЧШЕННОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Уфимский Государственный Авиационно-Технический Университет

E-mail: nariman.enikeev@gmail.com

Современное общество остро нуждается в новых материалах с превосходными характеристиками для передовых приложений. Стали являются одними из важнейших материалов для различных отраслей промышленности, и существует глобальная потребность в дальнейшем улучшении их многофункциональных свойств. Например, аустенитные нержавеющие стали известны своей выдающейся коррозионной стойкостью, хорошей формуемостью, высокой долговечностью и т.д. Однако предел текучести этих сталей относительно низок, что ограничивает их использование во многих потенциальных областях применения. Наноструктурирование посредством чрезвычайно больших деформаций под высоким давлением для существенного измельчения микроструктуры металлических материалов с целью получения ультрамелкозернистых состояний привлекает большое внимание исследователей, так как позволяет существенно улучшить механические и функциональные свойства уже существующих материалов.

В представленной работе приводится анализ выполненных с соавторами работ, посвящённых исследованию микроструктуры и механического поведения наноструктурных аустенитных сталей, таких как коррозионно-стойкие стали и стали с эффектом пластичности, наведённой двойникованием (TWIP-стали). Наряду с эффектами измельчения зёрненной структуры обсуждается недавно обнаруженное явление перераспределения легирующих элементов, обусловленное интенсивной деформацией. Исследуется влияние структурных особенностей на механические характеристики сталей и их устойчивость к внешним воздействиям, а также эффект упрочнения отжигом и увеличение пластичности в высокопрочном состоянии наноструктурной стали за счёт механизма пластичности, учитывающего взаимодействие зернограницных сегрегаций и дислокаций

КУКУШКИН С.А., ОСИПОВ А.В.

НАНОМАСШТАБНЫЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ - НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ

Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sergey.a.kukushkin@gmail.com

Докладывается о открытии нового метода синтеза эпитаксиальных пленок nano-карбида кремния на кремнии, разработке технологии его получения и создании производства. Существующие способы получения пленок SiC на Si приводят к образованию трещин и дислокаций, а также к искривлению подложки ввиду высоких механических напряжений. Разработанный метод основан на замещении части атомов в кремнии на атомы углерода без разрушения кремниевой основы. Впервые в мировой практике реализован метод последовательной замены атомов одного сорта другими прямо внутри исходного кристалла без разрушения его кристаллической структуры. Метод напоминает “генетический синтез” белковых структур в биологии. Качество структуры слоев, полученных данным методом, значительно превосходит качество пленок карбида кремния, выращенных на кремниевых подложках ведущими мировыми компаниями. Метод дешев и технологичен. Открытие данного метода позволяет прямо на кремниевой подложке синтезировать широкий спектр широкозонных материалов, что открывает беспрецедентные условия для создания нового типа приборов. Метод и технология созданы в результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено образование новой фазы Si, находящейся в состоянии «полуметалла» на границе раздела SiC(111)/Si(111). Образование Si в состоянии «полуметалла» на границе раздела SiC/Si (111) связано с большими, кратковременно возникающими (время импульса порядка 10^{-5} - 10^{-4} сек.) «импульсами сдавливания» при переходе Si в SiC. Показано, что давления сжатия, возникающие тонком приграничном слое толщиной порядка нескольких нанометров, могут достигать величин порядка 200-250 GPa. Давления подобной величины приводят к образованию особых, ранее неизвестных, свойств границы раздела SiC(111)/Si(111). На примере образования SiC вскрыт механизм протекания широкого класса гетерогенных химических реакций между газовой фазой и твердым телом. Показано, что основным отличительным свойством пленок SiC, синтезированных данным методом, является образование в нем избыточной концентрации кремниевых вакансий, в то время как в SiC, выращиваемом по стандартным методикам, присутствуют в основном вакансии углерода. Взаимодействие углеродных атомов и кремниевых вакансий приводит к образованию слоев SiC, упорядоченных ансамблей углеродно-вакансионных структур. Подобные структуры образуются как вследствие химической реакции замещения, так и вследствие усадки кристаллической ячейки Si при ее превращении в кристаллическую ячейку SiC. Присутствие углеродно-вакансионных структур в SiC приводит к образованию в нем целого ряда новых уникальных оптических, электрических и магнитных свойств.

Инновационный потенциал данной технологии состоит в его основной технологической составляющей – новой прорывной технологии выращивания буферного слоя карбида кремния на кремнии, на основе которого и будут формироваться слои других широкозонных полупроводников на кремнии.

В настоящее время: начато производство небольших партий пластин карбида кремния на кремнии диаметром 2, 3, 4 и 6 дюймов; начаты продажи небольших партий пластин карбида кремния диаметром 4 дюйма; разработана технология создания светодиодных чипов для микро-LED и созданы первые, промышленного качества образцы микро-светодиодов на пластинах карбида кремния на кремнии; изготовлены первые в мире опытные образцы микрочипов, для микро светодиодов (Micro LED) толщиной порядка 5-20 мкм на основе гетероструктуры AlInGaN/GaN, сформированной на Si с буферным слоем наномасштабного SiC; разработаны и созданы терагерцовые приемники и излучали на подложках SiC/Si; разрабатывается технология создания датчиков ультрафиолетового диапазона с длиной волны менее 320 нм на подложке нового типа – карбид кремния на кремнии; разработана технология создания на подложках SiC/Si пиро- и пьезодатчиков с пьезокоэффициентом $12 \mu\text{C}/(\text{m}^2\text{K})$ со слоем AlN и $18 \mu\text{C}/(\text{m}^2\text{K})$ со слоем AlGaN, что на сегодняшний день в три раза превышает подобные коэффициенты известных материалов, изготовленных на основе AlN.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по контракту № FFNF-2021-0001,

Список литературы

1. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. J. of Phys. D: Appl. Physics, 2014, 47. 313001-313041.
2. S.A. Kukushkin and A.V. Osipov. Materials. 2021. 14. 78.
3. S.A. Kukushkin and A.V. Osipov. Materials. 2021. 14. 5579.
4. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, В.В. Романов, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов. ФТП, 2021, 55, 103.
5. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов. ФТП, 2021, 55, 1027.
6. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, В.Л. Уголков. ФТП, 2022, 56, 715.

БЕЛЯЕВ Ф.С., ВОЛКОВ А.Е., ЕВАРД М.Е.

МИКРОСТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Санкт-Петербургский Государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.volkov@spbu.ru

Сплавы с памятью формы уже нашли и находят все большее применение в различных областях техники и медицины. Наиболее известны термомеханические соединения труб, термодатчики, термоприводы, а в медицине – эндоваскулярные стенты и костные импланты. Развитие деформации и механических напряжений в СПФ обусловлено протеканием в них мартенситных фазовых превращений и определяется всей историей изменения температуры и механических нагрузок. В связи с этим расчет деформаций и напряжений необходимо производить посредством математического моделирования поведения сплава при конкретных режимах термомеханического нагружения. В настоящее время разработано много различных моделей, среди которых можно выделить группу так называемых микроструктурных моделей. Их отличительной особенностью является рассмотрение деформации на различных структурных уровнях и формулировка определяющих соотношений для СПФ на основе экспериментально найденных закономерностей действия различных деформационных механизмов: упругость, тепловое расширение, фазовое превращение, дислокационное скольжение.

Перед докладом предполагается демонстрация научно-популярного фильма «Память металлов», снятого в 1984г. в основном в лаборатории Прочности материалов СПбГУ во время бурного распространения экспериментальных исследований СПФ. Затем в докладе будут представлены принципы построения микроструктурной модели и приведены примеры моделирования основных функциональных свойств СПФ: накоплении деформации образца при охлаждении через интервал температур мартенситного превращения и ее возврат при последующем нагреве – эффект памяти формы; при изотермическом деформировании образцов, находящихся в высокотемпературном состоянии – псевдоупругость, и в низкотемпературном мартенситном состоянии – псевдопластичность; накоплении необратимой деформации при циклически повторяющихся изменениях температуры или при циклическом деформировании.

СКОРБ Е.В.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНФОХИМИИ

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: skorb@itmo.ru

На нескольких примерах будем показано применение интеллектуальных технологий в инфохимии. Так одним из примеров, будет процесс кавитации в сложных смесях. Показан математический метод разделения движений для интерпретации акустического воздействия на пузырь. Хотя невозможно получить детерминированное описание того, как концентрация раствора влияет на динамику пузырьков, все же возможно разделить изображения с различными концентрациями, применяя алгоритм искусственной нейронной сети. Алгоритм был обучен обнаруживать концентрацию спирта в водном растворе на основе изображений пузырьков. Это указывает на то, что методы искусственного интеллекта (ИИ) могут дополнять детерминированный анализ в неравновесных сложных системах. (Korolyev et. al. J. Phys. Chem. B 126 (2022) 3161).

Еще один пример, предложенные подходы к разработке методов анализа поверхностей и микрочастиц с использованием различных математических методов. Так шероховатые поверхности имеют сложную топографию, которую нельзя охарактеризовать одним параметром. Выбор соответствующих параметров шероховатости зависит от конкретного применения. Большой набор данных, представляющие топографию поверхности, обладают упорядоченностью, которая может быть выражена в терминах топологические особенности в высокомерных пространствах данных, отражающие такие свойства, как анизотропия и количество направлений прокладки. Элементы зависят от масштаба, так как и длина выборки, и разрешение влияет на них. Показано, как характеризовать наноразмерные поверхности, с помощью атомно-силовых изображений и их анализа. Рассчитываем параметры шероховатости, авторреляционную функцию, распределение точек экстремума и барр-коды для поверхностей. Эти интересные параметры обсуждаются и сравниваются в одной из недавних работ в ACS Appl. Mater. Interfaces – DOI:10.1021/acsmi.1c20694.

ЧЕРНЫШОВ М.В

ОПТИМАЛЬНЫЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ И СТРУКТУРЫ – ОТ СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ К ПРИКЛАДНЫМ ПРИЛОЖЕНИЯМ

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mvcher@mail.ru

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова активно развивается научное направление, посвященное анализу взаимодействия разнообразных газодинамических разрывов (ударных волн, скачков уплотнения, волн разрежения и сжатия, тангенциальных разрывов и контактных поверхностей), оптимизации и практическим приложениям возникающих при этом ударно-волновых систем и разветвленных структур.

В докладе, предлагаемом Вашему вниманию, рассматриваются различные приложения разработанной теории: уменьшение потерь полного давления в сверхзвуковых воздухозаборниках, оптимизация формы обтекаемых поверхностей и аэродинамических характеристик тел в сверхзвуковом потоке, особые и экстремальные параметры тройных конфигураций скачков уплотнения, приближенно-аналитические модели струйных и канальных течений с маховским отражением, в том числе с энергоподводом на главном (маховском) скачке, и их применение при создании перспективных воздушно-реактивных двигателей. Особое внимание уделено разработке средств защиты от поражающего действия взрывной ударной волны. Предлагается воздействие на взрывную волну и ударно-волновые структуры, возникающие при её распространении и отражении, как геометрическим методом (создание выделенного направления распространения), так с использованием многофазной среды, поглощающей энергию взрыва.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20269, <https://rscf.ru/project/22-29-20269/>.

Н.Ф. МОРОЗОВ, Б.Н. СЕМЕНОВ, Е.Г. ЗЕМЦОВА, В.М. СМIRНОВ, И.В. СМIRНОВ **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ**

Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

E-mail: semenov@bs1892.spb.edu

Композиты на основе алюминиевой матрицы, армированной керамическими частицами, находят широкое применение в качестве конструкционных материалов в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря их улучшенным механическим свойствам, таким как прочность, высокая удельная жесткость и износостойкость. В качестве армирующих элементов в этих материалах используются как микро-, так и наноразмерные карбидные частицы, углеродные структуры (углеродные нанотрубки, графены, фуллерены и наноалмазы). Существенное влияние на свойства металломатричных композитов (ММК) помимо концентрации, распределения частиц по объему, размера, формы армирующих частиц оказывают равномерность их распределения частиц по матрице и интерфейсное взаимодействие матрицы и частиц. Кроме того повышение прочности и предела текучести сопровождается уменьшением пластической деформации ММК по сравнению с пластической деформацией материала матрицы. Для решения некоторых из этих проблем применяются различные способы. В частности, карбидные частицы покрываются металлическим нанослоем, что исключает slipping армирующих частиц, обеспечивает равномерное распределение частиц по матрице, улучшает адгезию между матрицей и армирующими частицами, а также плотность микродефектов вблизи интерфейса. Также используется комбинированное армирование углеродными структурами и карбидными наночастицами. В рамках работы проведен анализ микромеханических и компьютерных методов для моделирования деформирования ММК, армированных карбидными частицами с металлическим покрытием, углеродными нанотрубками и их комбинацией. Выявлены механизмы упрочнения, вносящие существенный вклад в итоговое упрочнение металлокомпозиата. Для ММК с армирующими частицами TiC/Ni методом конечных элементов построены кривые деформирования, с учетом фактического упрочнения матрицы, полученное на основе микромеханического подхода. Кривые деформирования, построенные по разработанным компьютерным моделям, хорошо согласуются с экспериментальными кривыми деформирования. По результатам конечно-элементного моделирования выявлены зоны инициации разрушения и исследовано влияние тонкого слоя никеля на поверхности армирующей

частицы на эффективные механические параметры металлокомпозиата. Проведена оценка упрочнения металлической матрицы за счет комбинированного армирования углеродными нанотрубками и наночастицами карбида титана.

O. YU. KURAPOVA^{1,2}, **I. V. SMIRNOV**^{1,2}, **Y.V. KONAKOV**^{2,3}, **V.G. KONAKOV**^{2,3}

TENSILE PROPERTIES, HARDNESS AND PHASE FORMATION OF THE AL-NI-RGO COMPOSITES

¹*Institute of Chemistry, Saint Petersburg University, 199034, Saint Petersburg, Russia*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia*

³*Institute of Problems of Mechanical Engineering, RAS, 199034, St. Petersburg 199178, Russia*

E-mail: o.y.kurapova@spbu.ru

Nickel aluminides, namely NiAl, Ni₃Al and NiAl₃ based functional materials, have the attractive properties for structural applications at elevated temperatures. However, the intermetallics in the Al-Ni system are rather brittle which limits their practical applications. Graphene and its derivatives are known to be excellent reinforcements for various metallic and ceramic matrices. Thus, the aim of the present research was to optimize the conditions of powder metallurgy technique for intermetallics composites formation and investigate the phase formation, tensile properties and hardness of the Al-Ni intermetallics based composites doped by rGO. In order to obtain intermetallic compounds powder mixtures with compositions xNi-(100-x)Al and (xNi-(100-x)Al)-0.5 wt.% rGO, x=10-80 mol.% were prepared via the modified powder metallurgy approach. Microwave reduced graphene oxide (rGO) was manufactured via oxidation-reduction method, including the oxidation via Hummers technique. Phase composition, structures of powders and composite intermetallic materials were investigated via SEM, EDX, XRD, Raman spectroscopy and hydrostatic weighing. The optimization of manufacturing parameters included the milling rate and milling duration. Obtained powder mixtures were grinded in a planetary mill in the atmosphere of nitrogen (Pulverisette-6 planetary mill, 300 for 30 and 60 min and 450 rpm for 30-210 min with the step of 30 min, with 2 minutes reverse cycles, residual oxygen pressure 10-3 atm). Optimal milling conditions for composite powders were chosen as following: milling rate 450 rpm and milling time 210 min. Obtained powders were compacted using cold pressing technique (uniaxial pressure, 12.5 ton, 15 min). The pellets with 25 mm diameter and 9 mm height were manufactured via annealing in vacuum furnace at 600 °C for 1 hour. Via SEM and XRD data it was shown that the milling of metallic powders results is accompanied by the formation of the small amounts of nickel aluminide formation on the surface of the nickel grains. Via XRD it was shown, that rGO favors the formation of AlNi, Ni₃Al and Al₃Ni compounds in the Al-Ni based bulk samples. The Al₃Ni₂ was shown to be first intermediate phase appearing in the phase sequence. Using SEM, EDS and XRD techniques it was demonstrated that rGO enhances the phase formation at 600 °C resulting in single-phased nickel aluminides, Al₃Ni₂ being the intermediate compound for all investigated compositions. Raman spectroscopy, SEM and hydrostatic weighting data confirmed that rGO addition increases the densities (77.78-99.77%) of composites and results in their pronounced heterogeneity. The 16nNi-rGO composite showed about twice higher elongation value for comparing to 80nNi-rGO. The 31nNi-rGO, 40nNi-rGO and 51nNi-rGO composites demonstrated the superior hardness, 297±28 HV0.3, 561±121 HV0.3 and 640±118 HV0.3, respectively.

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (task 0784-2020-0027). SEM and EDX data of the powders and consolidated specimens were obtained at the Research park of St. Petersburg State University «Center for Geo-Environmental Research and Modeling (GEOMODEL)» and «Interdisciplinary Center for Nanotechnology» respectively.

Raman spectroscopy analysis was performed at the Center for Optical and Laser Materials Research of St. Petersburg State University.

СЕМЕНОВ К.Н.

СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ БИМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ПЕРВОМ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ МЕДИЦИНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМ. АКАД. И. П. ПАВЛОВА

Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: semenov1986@yandex.ru

В лаборатории биомедицинского материаловедения проводятся исследования по синтезу и функционализации углеродных наноструктур (фуллерены, графены, нанотрубки, наноалмазы), наночастиц противоопухолевых препаратов (липосомы, альбумин и аэросил) и создание их конъюгатов с векторами для адресной доставки (фолиевая кислота, антитела). Совместно с Астонским университетом и кафедрой химии твёрдого тела Института химии СПбГУ проводятся расчёты динамических и структурных характеристик синтезированных материалов методом молекулярной динамики на основе *ab initio* и классического подходов. Указанные исследования позволяют описывать процессы адресной доставки потенциальных лекарственных препаратов в клетку, определять оптимальные центры связывания препарата и носителя, устанавливать механизмы взаимодействия материалов с биологическими жидкостями и изучать процессы переноса или распределение заряда в биологических системах.

ГРУЗДКОВ А. А.

УЧЕТ ДИСКРЕТНОСТИ СРЕДЫ В КОНТИНУАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) СПбГТИ(ТУ), г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gruzdkov@mail.ru

Классические уравнения математической физики, описывающие поведение сплошных сред, с одной стороны находятся в противоречии с базовыми физическими принципами, с другой — не описывают важные особенности поведения дискретной среды, предельными случаями которой они являются. Возникает вопрос о разработке таких модификаций моделей сплошных сред, которые позволили бы учесть эти особенности. В последние десятилетия в ряде работ подобные модификации были предложены, однако многие вопросы по-прежнему остаются открытыми.

ШИСЯН ЧЖАО

МОДИФИКАЦИЯ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Санкт-Петербургский Государственный Университет

В работе разработана модификация релаксационной модели пластического деформирования, предложенной ранее с целью объяснения и прогноза временных эффектов нестабильности диаграмм пластического деформирования. Показано, что модифицированный вариант релаксационной модели позволяет учесть поведение деформационных кривых на длительных временах после наступления текучести и более полно представить соответствующие временные эффекты, в том числе эффекта «зуба текучести». Проведены сравнения расчетов модифицированного подхода с первоначальной версией релаксационной модели и широко распространенной моделью Джонсона–Кука на примере экспериментально полученных диаграмм деформирования для сталей API 5L X70 и HSLA-65. Результаты расчетов подтверждают описательную и прогностическую эффективность разработанной модели. Используя этот небольшой набор параметров структурно-временного подхода и релаксационной модели пластичности, можно получать различные типы деформационных кривых, реализующихся в одном материале в широком диапазоне скоростей деформации.

ИГУШЕВА Л.А.

ЗАВИСИМОСТЬ КИН ОТ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Санкт-Петербургский Государственный Университет

E-mail: st040152@student.spbu.ru

В ходе проделанной работы произведено исследование динамического разрушения горных пород при наличии внешнего гидростатического давления с использованием структурно-временной теории. Найдена зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости нагружения при различных значениях амплитуды воздействия. Получена формула, выражающая линейную связь между инкубационным временем и гидростатическим давлением. Найдено подтверждение гипотезы, о том, что разница инкубационных времен у породы с разной степенью насыщенности вызывается различным уровнем гидростатического давления, возникающего при быстром ударном воздействии. Выявлено, что чем больше значение гидростатического давления, тем больше значение инкубационного времени при проведении экспериментов на растяжение. Давление замедляет инкубационный процесс микро-растрескивания, что является причиной увеличения характерного времени релаксации. При изучении динамического сжатия образцов, результаты показывают, что динамическая прочность горных пород изменяется при изменении скорости нагружения при различных гидростатических давлениях, демонстрируя линейную тенденцию увеличения с увеличением скорости нагружения. В то время как прирост прочности образца, находящегося под гидростатическим давлением, становится меньше с увеличением гидростатического всестороннего давления. Обнаружено, что зависимость динамической прочности породы от скорости нагружения уменьшается с увеличением гидростатического всестороннего давления. Динамическая прочность горных пород при заданной скорости нагружения увеличивается с увеличением гидростатического давления, и это увеличение происходит быстрее при более низком давлении. Инкубационное время разрушения материала при испытаниях на сжатие уменьшается с ростом гидростатического давления, в то время как критическое значение напряжения в образце для статических нагрузок увеличивается с ростом гидростатического давления.

ЮРЬЕВ Г.О.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, г. Санкт-Петербург, Россия

В докладе будут представлены данные по синтезу и изучению композиционных материалов на основе диоксида кремния и углеродных наноструктур. Данные композиты представляют интерес для создания гемосорбентов, конъюгатов для адресной доставки лекарственных препаратов, фотосенсибилизаторов и антиоксидантов.

МИКОЛАЙЧУК О.В.

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ НАНОФОРМ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПОЛИАЗОТИСТЫХ ГЕТЕРОЦИКЛОВ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, г. Санкт-Петербург, Россия

Известно, что производные на основе 1,3,5-триазинового каркаса проявляют противомикробные, противовирусные, противовоспалительные и противоопухолевые свойства.

Для снижения токсичности 1,3,5-триазинов было использовано два подхода, а именно:

- введение в структуру метаболически устойчивого гетероцикла тетразола;
- создание наноформы на основе оксида графена и 1,3,5-триазилинтетразолов.

Показано, что использование данных подходов приводит не только к повышению эффективности, но и увеличению пролонгируемости действия лекарственного средства

АГЕЕВ С.В.

СИНТЕЗ И БИМЕДИЦИНСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ КАРБОКСИЛИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

Институт химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

В докладе будет представлен новый метод получения окисленных одностенных углеродных нанотрубок. Будет описана методика синтеза, идентификация с применением современных физико-химических методов (^{13}C ЯМР-спектроскопия, ИК-спектроскопия, Рамановская спектроскопия и др.), а также результаты изучения биосовместимости, включающие исследование гемосовместимости, антиоксидантных свойств, связывания с транспортными белками крови, генотоксичности и цитотоксичности.

ШЕМЧУК О.С.

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОТЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ПРОИЗВОДНОГО ФУЛЛЕРЕНА C_{60} С L-МЕТИОНИНОМ ПРИ УФ-ИНДУЦИРОВАННОМ ПОВРЕЖДЕНИИ КОЛЛАГЕНА

Институт химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Функционализация фуллеренов аминокислотами является эффективным подходом для получения новых материалов для медицины. В докладе будет представлен метод синтеза, результаты изучения фотопротекторных свойств и биологической активности аддукта фуллерена C_{60} с L-метионином ($\text{C}_{60}[\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2\text{S}]_3$, C_{60} -L-Met). Особое внимание будут уделено данным по идентификации полученного соединения с использованием физико-химических методов анализа (твердофазная ^{13}C ЯМР-спектроскопия, ИК-спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, элементный анализ). Изучение биосовместимости синтезированного соединения включало исследование

генотоксичности, фотопротекторного эффекта, влияния на агрегацию тромбоцитов, антирадикальных свойств, связывания с человеческим сывороточным альбумином.

ШАРОЙКО В.В.

СИНТЕЗ МАТЕРИАЛОВ БИМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИВЫХ КЛЕТОК КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ТАРГЕТИРОВАНИЮ ОЧАГОВ ОПУХОЛЕВОГО ПРОЦЕССА С МОЛЕКУЛЯРНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, г. Санкт-Петербург, Россия

Доклад будет посвящён рассмотрению возможностей функционализации гликокаликса живых Т-клеток адресными антителами с помощью реакции хемоселективного легирования (азид-алкиновое циклоприсоединение или клик-реакция). Нами было показано, что фармацит, полученный в результате реакции хемоселективного легирования Т-клеток человека и анти-VEGF пептида, блокирует сигнальный путь VEGF, что приводит к подавлению пролиферации пигментных эпителиальных клеток сетчатки глаза человека (ARPE-19), а также клеток опухолевой клеточной линии A549. Результаты могут быть использованы для подавления роста сосудов и снижения проницаемости микрососудов при лечении офтальмологических заболеваний (возрастная дегенерация жёлтого пятна сетчатки, диабетическая ретинопатия, окклюзия сетчатки, ретинопатия у недоношенных детей) и при онкологических заболеваниях

РЕБРОВ Т.В., СТАРОДУБОВА М.С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ TiZr И CuAlBe

Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

э.л.почта: st063189@student.spbu.ru, st063188@student.spbu.ru

Сплав TiZr является высокопрочной и биосовместимой альтернативой титану. Он обладает большим сопротивлением ползучести при высоких температурах и прекрасной коррозионной стойкостью, которая может быть дополнительно повышена при должной обработке. При этом функциональные свойства данного материала как сплава с памятью формы мало изучены. CuAlBe, в свою очередь, выделяется относительно низкими температурами мартенситного превращения, высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью и сопротивлением усталости. Для эффективного использования СПФ в различных приложениях необходимы модели, позволяющие адекватно рассчитывать деформацию этих материалов. При моделировании с применением микроструктурного подхода [1] одной из важнейших материальных постоянных является тензор деформации превращения кристаллографической решетки исходной высокотемпературной аустенитной фазы в низкотемпературную мартенситную. В настоящей работе произведен расчет матриц тензоров деформации при мартенситном превращении $\beta \leftrightarrow \alpha$ в сплавах Ti-50Zr (ат. %), Ti-30Zr (ат. %) и превращении $DO3 \leftrightarrow 18R$ в сплаве CuAlBe. Вычислены матрицы тензоров градиента деформации и Грина-Лагранжа для упомянутых сплавов. Выполнена оценка кристаллографического ресурса для данных превращений как максимальной величины главной деформации. В ходе моделирования монокристалла Ti-50Zr (ат. %) была найдена такая его ориентация, при которой в испытании на псевдоупругость наблюдается деформация, близкая к рассчитанному значению кристаллографического ресурса. Также было

произведено моделирование одноосного растяжения поликристалла сплава Ti-30Zr (ат. %), получен результат близкий к экспериментальным данным. Аналогично, полученная матрица тензора деформации для CuAlBe была использована при моделировании функционально-механических свойств сплава, в том числе при циклических термомеханических воздействиях с учетом аккомодационной пластичности. Результаты также хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) 19-01-00685.

[1] Belyaev F. et al. A Microstructural Model of SMA with Microplastic Deformation and Defects Accumulation: Application to Thermocyclic Loading // Mater. Today Proc. Elsevier Ltd., 2015. Vol. 2. P. S583–S587.

Н.В. МИХАЙЛОВА¹, Ю.В. ПЕТРОВ^{1,2}

РАЗРУШЕНИЕ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИ ПОРОГОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия*

²*Институт проблем машиностроения РАН, Большой пр. 61, Санкт-Петербург, 199178, Россия*

E-mail: n.v.mikhailova@spbu.ru

Представленная работа направлена на исследование переходных процессов при динамическом воздействии в сплошных средах и определение их пороговых нагрузок. Рассматриваемые в исследовании переходными процессами являются кавитация жидкости и разрушение твердых тел. Структурно-временной подход позволил предсказать и смоделировать нестабильность динамической прочности и эффект задержки разрушения, которые также были подтверждены экспериментальными данными. Теоретическое моделирование сверления с наложением ультразвука позволило спрогнозировать переход к обычному сверлению, вызванный увеличением скорости вращения сверла. Дополнительно исследовалось возникновение кавитации для различных жидкостей и внешних условий.

Е.В. КИЛЬДЮШОВ¹, О.Ю. КУРАПОВА²

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПРОВОДИМОСТЬ ПРОТОН-ЗАМЕЩЕННОГО БЕТА-ГЛИНОЗЕМА

¹*Санкт-Петербургский Горный Университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия*

E-mail: evgenii.kildiushov@gmail.com

В настоящее время преобразование химической энергии в электрическую является одной из наиболее важных проблем, изучаемых во всём мире. Здесь следует упомянуть низко и

среднетемпературные топливные элементы с протон-проводящими мембранами, поскольку они обладают высокой эффективностью и являются экологически чистыми. Протонированный бета-глинозем является перспективным протонным проводником для топливных элементов, поскольку он характеризуется высокой протонной проводимостью и термической стабильностью в широком диапазоне температур. Слоистая структура β - Al_2O_3 обеспечивает быстрый перенос катионов, что приводит к высокому уровню электропроводности таких мембран в интервале температур работы таких топливных элементов. Можно предположить, что замена Na^+ на H^+ улучшит фазовую стабильность бета-глинозема. Целью данной работы являлся синтез керамик из протон-замещенного бета-глинозема, а также изучение фазового состава, структуры таких мембран в зависимости от степени обмена Na^+/H^+ в воде при разных температурах. Порошок-прекурсор натриевого бета-глинозема был получен пиролизом солей HCOONa и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и прокален при 970°C в течение 24 часов, а затем при 1100°C в течение 3 часов. Цилиндрические мембраны были сформированы путем холодного изостатического прессования (выдержка в течение 10 минут под давлением 10 т/см^2 гидравлического пресса Mega KMG-50A) и последующего прокаливания при 1520°C , на воздухе в течение 2 часов. Мембраны имели диаметр 10 мм и толщину 5 мм. Мембраны были исследованы следующими методами: рентгенофазовый анализ (дифрактометр SHIMADZU XRD-6000), сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия (микроскоп Hitachi S-3400N), гидростатическое взвешивание (весы RADWAG с приставкой для определения плотности твердых тел и жидкостей), лазерная седиментография (Horiba LA-950), весовой метод для определения степени замещения Na^+/H^+ , а также импедансная спектроскопия для исследования проводимости полученных керамик при $20 - 800^\circ\text{C}$ (Autolab PGSTAT 302N). На основании данных СЭМ и РФА показано, что после синтеза были получены однофазные образцы бета-глинозема без примесей каких-либо других фаз. Измеренная плотность бета-глинозема натрия близка к теоретической.

Э.Э. ШИЛОВСКИХ, О.Ю. КУРАПОВА

**ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА ТЕМПЕРАТУРЫ
ДЕГИДРАТАЦИИ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИЧЕСКОГО
ПРЕКУРСОРА $60\text{CeO}_2\text{-}30\text{ZrO}_2\text{-}10\text{Y}_2\text{O}_3$ (MOL.%)**

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт химии, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: evelina14shilovskikh@gmail.com

Твердые растворы диоксида церия используются в качестве катализаторов для селективного окисления в биологических системах, а также в качестве анодов и кислородпроводящих мембран для различных электрохимических устройств. Однако такие твердые растворы кристаллизуются при температурах порядка 900°C , поэтому существует необходимость в снижении температуры кристаллизации. Гидротермальный синтез имеет ряд преимуществ перед другими методами синтеза оксидов, таких как точный контроль стехиометрии получаемых твердых растворов, а также распределение частиц по размерам, их морфологии и кристаллической структуры. Таким образом, целью работы было исследование влияния условий гидротермальной обработки на дегидратацию, температуру кристаллизации и фазовый состав $60\text{CeO}_2\text{-}30\text{ZrO}_2\text{-}10\text{Y}_2\text{O}_3$ (мол.%). Гели на основе диоксида церия были получены методом золь-гель синтеза в варианте обратного соосаждения, условия синтеза составляли $\text{pH} = 9\text{-}10$, $T = 1\text{-}2^\circ\text{C}$. Затем полученный гель помещали в автоклав при температуре $160\text{-}260^\circ\text{C}$ (с шагом нагрева 20°C) на 120 минут. Полученные порошки сушили до постоянства веса при температуре 110°C . Полученные прекурсоры были всесторонне

исследованы с помощью СТА, РФА, РФЭС и PSD анализа. Было установлено, что использование гидротермальной обработки геля привело к смещению кристаллизации твердого раствора с ~900 до 200 °С. Средний размер агломератов порошков, обработанных гидротермально, лежит в диапазоне 180-240 нм. Гидротермальная обработка 0,3М раствора нитратов при 260°С приводит к прямой кристаллизации кубических твердых растворов на основе диоксида церия.

Благодарности. ДСК и ТГ исследования были проведены в Центре термогравиметрических и калориметрических исследований СПбГУ. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (исследовательский проект 075-15-2021-370)

ЗАРИПОВ А.А., ПАЖЕЛЬТЦЕВ В.В., КУРАПОВА О.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА, ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИСУРЬМЯНОЙ КИСЛОТЫ

Институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: artemzaripov@bk.ru

Разработка новых мембранных материалов для электрохимических источников тока является серьезной научной проблемой, связанной с устойчивым переходом к водородной энергетике, а также созданию автономных источников энергии. Одним из перспективных протонных проводников для низкотемпературных твердоотопливных элементов является полисурьмяная кислота (ПСК) $Sb_2O_5 \cdot nH_2O$, где $n = 3-6$. Таким образом, целью данной работы стало изучение фазового состава, термической стабильности и транспортных свойств мембран на основе ПСК.

Кристаллическая ПСК плохо прессуется, что делает невозможным создание из нее прочных мембран. Эта проблема была решена использованием инертного связующего (фторопласт Ф-26) на стадии прессования мембран. Мембраны получали методом холодного прессования (гидравлический пресс Mega KMG-50A). Для изготовления мембран брали порошок ПСК и связующего фторопласта. Фторопласт растворяли в небольшом количестве ацетона, смешивали с порошком ПСК в массовом соотношении 90:10 (90ПСК) и 80:20 (80ПСК), и далее смесь прессовали в цилиндрической форме (выдержка 10 минут при давлении 1,5 тонн/см²). Полученные мембраны имели диаметр 30 мм и толщину 5 мм. Мембраны комплексно исследовали следующими методами: синхронный термический анализ (СТА, дериватограф MOM-3 Q-1500 D), рентгенофазовый и терморентгенофазовый анализ (РФА, дифрактометр SHIMADZU XRD-6000, термо-РФА, исследовательский комплекс на базе дифрактометра Rigaku «Ultima IV»), сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный анализ (СЭМ и EDX, микроскоп Hitachi S-3400N), гидростатическое взвешивание (весы RADWAG с/хс с приставкой для определения плотности твердых тел и жидкостей), потенциометрия (рН-метр HANNA HI2002-02 серии edge), ртутная порометрия (AutoPore IV, model 9500, Micrometrics), динамическое рассеяние света (Malvern Zetasizer Nano ZS).

С помощью СТА, РФА и термо-РФА было показано, что порошок ПСК термически стабилен вплоть до 350 °С, добавление фторопласта незначительно снижает термостабильность - вплоть до 300 °С. До этой температуры (при температурах около 60 °С) начинается дегидратация чистой ПСК. Добавление фторопласта сдвигает начало дегидратации до 100 °С. С помощью СЭМ и EDX было показано, что связующее в мембране не полностью покрывает зерна ПСК и не нарушает контакт между ними, необходимого для транспорта протона через мембрану. С помощью потенциометрии были определены коэффициенты диффузии и

коэффициенты самодиффузии протона через мембрану, значение которых составило соответственно $3,5-6,5 \times 10^{-5}$ и $1,3-2,1 \times 10^{-6}$ см²/с. Сравнение с другими протонными проводниками и водой показывает, что данные значения соответствуют быстрому транспорту протона через мембрану. С помощью методов гидростатического взвешивания, ртутной порометрии и определения диаметра пор по скорости протекания было показано, что мембраны являются вакуумно-плотными, а диаметр пор в мембранах составляет 50-70 нм для мембран 90ПСК и 25-50 нм – для мембран 80ПСК. *Благодарности.* Исследования СЭМ, EDX, термо-РФА проведены с использованием оборудования ресурсных центров «Геомодель» и «РДМИ» Научного парка СПбГУ. Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ для молодых кандидатов МК-3798.2021.1.3.

КАПЛАНОВА В.И., КУРАПОВА О.Ю.

СТРУКТУРА, КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФфуЗИИ И САМОДИФфуЗИИ В ПРОТОН ЗАМЕЩЕННОМ β -ГЛИНОЗЕМЕ

Институт Химии, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: st064811@student.spbu.ru

В настоящее время задачи, связанные с разработкой и внедрением экологически чистых источников энергии, приобретают все большую значимость. В этой области стоит выделить низкотемпературные топливные элементы с протон проводящими мембранами, обладающие высокой экологической безопасностью и значительным коэффициентом полезного действия (КПД). Структура и проводимость твердого электролита (ТЭ), используемого в качестве мембраны, во многом предопределяет характеристики работы таких топливных элементов. Однако существующие на данный момент протон проводящие мембраны характеризуются низкой устойчивостью, что приводит к необходимости поиска новых материалов. Протон замещенный β -глинозем рассматривается как привлекательный материал для протон проводящего ТЭ. Поэтому, целью данного исследования стало изучение фазового состава, структуры и транспортных свойств керамики на основе $\text{H-}\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. Порошок-прекурсор Na^+ - β -глинозема состава $\text{Na}_2\text{O} \cdot 6.5\text{Al}_2\text{O}_3$ был получен методом пиролиза раствора солей (нитрата алюминия и формиата натрия). Затем его запрессовали в таблетки (диаметр 30мм, толщина 3 мм) и прокаляли на воздухе при 1520 °С в течение 1 часа. $\text{H-}\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ получили методом ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{H}^+$ в растворе HNO_3 , а также H_2O . Полноту ионного обмена контролировали методом кондуктометрии (inoLab Cond7110) и атомноэмиссионной спектроскопии АЭС (ICPE-9000), после чего была рассчитана степень замещения Na^+ на H^+ . Структуру керамики исследовали методами гидростатического взвешивания (RADWAG WAS 220/X), рентгенофазового анализа РФА (SHIMADZU XRD-6000), сканирующей электронной микроскопии СЭМ (Hitachi S-3400N) и энергодисперсионной спектроскопии EDX (Hitachi S-3400N). Транспортные свойства ТЭ были исследованы методом ЭДС в кислой (0.1, 0.4 и 1 н соляная кислота) и щелочной (0.1, 0.4 и 1 н гидроксид калия) среде. Методом РФА было показано, что обмен Na^+ на H^+ вызывает увеличение интенсивности пиков на дифрактограмме без изменения их положения, что соответствует протонированной форме $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. С помощью СЭМ и EDX было обнаружено, что в структуре ТЭ присутствуют фазы β - и $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$, ион натрия замещается на протон только в фазе β -глинозема, а в натриевой фазе $\beta''\text{-глинозема}$ замещения не происходит. Коэффициенты диффузии и самодиффузии, рассчитанные по данным ЭДС, хорошо коррелируют с литературой [1]. *Литература:* 1. Yao Y. F. Y., Kummer J. T. Ion exchange properties of and rates of ionic diffusion in beta-alumina //Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. 1967. Т. 29. №. 9. С. 2453-2475. *Благодарности.* Данные СЭМ и EDX были получены в ресурсном центре «GEOMODEL», а измерение АЭС было выполнено в «Центре химического анализа и материаловедения» научного парка СПбГУ.

КАШТАНОВА С.В.

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ЗАДАЧАХ ОБ ОБОЛОЧКАХ С ОТВЕРСТИЯМИ И
ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Kastasya@yandex.ru

В докладе обсуждаются проблемы, связанные с решением аналитическим методом задач о пластинах или оболочках с отверстиями и включениями: обзор, анализ известных методов, разбор неудачных подходов, пробелы в методологии, предлагаются новые подходы.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке ФРФФИ в рамках научного проекта №19-31-60008.