

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИИ И НАУК О МАТЕРИАЛАХ РАН
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО МАТЕРИАЛАМ И НАНОМАТЕРИАЛАМ
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БАЙКОВА РАН
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

VII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НАНОМАТЕРИАЛАМ

НАНО 2020

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО НАНОМАТЕРИАЛАМ

VII



СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

МОСКВА, 18 — МАЯ 2020 Г.

WWW.NANO.IMETRAN.RU

**VII Всероссийская конференция
по наноматериалам**



СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

18-22 мая 2020 г.

Москва, ИМЕТ РАН

УДК 539.2:621.3.049.77(063)
ББК 22.36+22.37+30.37я431
В 85

VII Всероссийская конференция по наноматериалам. Москва. 18-22 мая 2020 г. /
Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2020, 317 с.

Конференция проведена в дистанционном (заочном) формате

ISBN 978-5-6043996-3-7



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Материалы публикуются в авторской редакции.

Организаторы конференции:

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Отделение химии и наук о материалах РАН
Научный Совет РАН по материалам и наноматериалам
Институт металлургии и материаловедения
им. А.А Байкова РАН
Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Основная тематика конференции

СЕКЦИЯ 1. Фундаментальные основы синтеза нанопорошков

Координаторы: академик Ляхов Н.З.,
член-корр. РАН Алымов М.И.

СЕКЦИЯ 2. Наноструктурные пленки и покрытия в конструкционных и функциональных материалах

Координаторы: академик Иевлев В.М.,
проф. Левашов Е.А.

СЕКЦИЯ 3. Объемные наноматериалы

Координаторы: проф. Добаткин С.В.,
проф. Глезер А.М.

СЕКЦИЯ 4. Нанокompозиты

Координаторы: член-корр. РАН Карпов М.И.,
член-корр. РАН Лукашин А.В.

СЕКЦИЯ 5. Инновационные применения нанотехнологий и развитие методов аттестации наноматериалов

Координаторы: член-корр. РАН Гудилин Е.А.,
член-корр. РАН Мелихов И.В.

Организационный комитет

Солнцев К.А.	- председатель, ИМЕТ РАН, г. Москва
Ляхов Н.З.	- зам. председателя, ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск
Добаткин С.В.	- зам. председателя, ИМЕТ РАН, г. Москва
Алымов М.И.	- ИСМАН, г. Черноголовка
Астахов М.В.	- МИСиС, г. Москва
Бурханов Г.С.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Валиев Р.З.	- УГАТУ, г. Уфа
Глезер А.М.	- ЦНИИЧМ, г. Москва
Григорович К.В.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Ермаков А.Е.	- ИФМ Уро РАН, г. Екатеринбург
Иванов В.В.	- МФТИ, г. Долгопрудный
Иванов В.К.	- ИОНХ РАН, г. Москва
Карпов М.И.	- ИФТТ РАН, г. Черноголовка
Ковальчук М.В.	- НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва
Колобов Ю.Р.	- БГУ, г. Белгород
Комлев В.С.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Левашов Е.А.	- МИСиС, г. Москва
Панченко В. Я.	- РФФИ, г. Москва
Пархоменко Ю.Н.	- ГИРЕДМЕТ, г. Москва
Петрунин В.Ф.	- МИФИ, г. Москва
Ремпель А.А.	- ИХТТ Уро РАН, г. Екатеринбург
Устинов В.В.	- ИФМ Уро РАН, г. Екатеринбург
Цветков Ю.В.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Шмаков А.А.	- МИФИ, г. Москва

Программный комитет

Иевлев В.М.	- председатель, МГУ, г. Москва
Бузник В.М.	- зам. председателя, ВИАМ, г. Москва
Баринов С.М.	- зам. председателя, ИМЕТ РАН, г. Москва
Бойнович Л.Б.	- ИФХЭ РАН, г. Москва
Гудилин Е.А.	- МГУ, г. Москва
Кожевников В.Л.	- ИХТТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Костиков В.И.	- МИСиС, г. Москва
Кузнецов Н.Т.	- ИОНХ РАН, г. Москва
Леонтьев Л.И.	- ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Лукашин А.В.	- МГУ, г. Москва
Лунин В.В.	- МГУ, г. Москва
Мелихов И.В.	- МГУ, г. Москва
Мясоедов Б.Ф.	- Президиум РАН, г. Москва
Панин В.Е.	- ИФПМ СО РАН, г. Томск
Пастухов Э.А.	- ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Рыбин В.В.	- СПбГПУ, г. Санкт-Петербург
Счастливец В.М.	- ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург
Хохлов А.Р.	- МГУ, г. Москва
Цивадзе А.Ю.	- ОХНМ РАН, г. Москва
Чарушин В.Н.	- ИОС УрО РАН, г. Екатеринбург
Шабанов В.Ф.	- ИФ СО РАН, г. Красноярск
Шевченко В.Я.	- ИХС РАН, г. Санкт-Петербург
Юртов Е.В.	- РХТУ, г. Москва

Консультативный комитет

Каблов Е.Н.	- председатель, ВИАМ, г. Москва
Алдошин С.М.	- зам. председателя, ИПХФ РАН, г. Черноголовка
Алешин Н.П.	- МВТУ, г. Москва
Алфимов М.В.	- ЦФ РАН, г. Москва
Баннх О.А.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Болдырев В.В.	- ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск
Золотов Ю.А.	- МГУ, г. Москва
Осико В.В.	- НЦ ЛМТ ИОФ РАН, г. Москва
Пармон В.Н.	- ИК СО РАН, г. Новосибирск
Сергиенко В.И.	- Президиум ДВО РАН, г. Владивосток
Тартаковский В.А.	- ИОХ РАН, г. Москва
Шудегов В.Е.	- Гос. Дума ФС РФ, г. Москва

Исполнительный комитет

Добаткин С.В.	- председатель, ИМЕТ РАН, г. Москва
Рыбальченко О.В.	- ученый секретарь, ИМЕТ РАН, г. Москва
Просвирнин Д.В.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Мартыненко Н.С.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Страумал П.Б.	- ИМЕТ РАН, г. Москва
Лукьянова Е.А.	- ИМЕТ РАН, г. Москва

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

«РЕНТГЕНОАМОРФНЫЕ» ВЕЩЕСТВА И МАТЕРИАЛЫ КАК ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ

Иевлев В.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
rnileme@mail.ru

Аморфные материалы используются в современных технологиях, но полная характеристика их структуры затруднена вследствие ограниченных возможностей дифракционных методов, успешно реализуемых применительно к кристаллическим веществам и материалам. В докладе представлены результаты анализа дифрактограмм в виде гало для твердых металлических систем и оксидов, образующихся в процессах быстрого охлаждения из расплава, термического испарения и конденсации, ионного распыления, механохимии. Подход базируется на сопоставлении экспериментальной дифрактограммы с модельной, построенной с учетом размерного эффекта дифракции на ожидаемой для конкретной системы совокупности кристаллических фаз, характеризующихся предельно малым размером областей когерентного рассеяния – зародышей этих фаз. Получена хорошая корреляция модельной и экспериментальной дифрактограмм для систем: Fe-P-Si, Ag-Cu, Ni-Ti, Li-Nb-O, аморфный фосфат кальция (АФК), по составу соответствующий $\text{Ca}_{10}\text{PO}_4(\text{OH})_2$.

Эти результаты позволяют рассматривать такого рода структуры (квазиаморфные) как один из вариантов предельного наноструктурирования кристаллических веществ. В рассматриваемых структурах когерентность упруго рассеянных волн утрачена вследствие произвольной взаимной ориентации кристаллических зародышей соответствующих фаз предельно малых размеров. Их «кристаллизацию» можно рассматривать как процесс собирательной кристаллизации, характерный для наноструктурированных пленок. В квазиаморфных объектах этот процесс проявляется формированием кристаллизованных областей, разделенных относительно большими промежутками исходной структуры.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ ПУТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Ляхов Н.З.¹, Удалова Т.А.^{1,2}, Григорьева Т.Ф.¹

¹ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, lyakhov@solid.nsc.ru, grig@solid.nsc.ru

²ФГБУН Новосибирский Государственный Технический Университет,
Новосибирск, udalova@solid.nsc.ru

Существует большое количество методов получения наноразмерных материалов, среди которых для синтеза ультрадисперсных металлов наиболее широко используются конденсационные методы: растворные (золь-гель, быстрое термическое разложение прекурсоров в растворе и др.), химической конденсации (плазмохимия), физической конденсации (метод молекулярных пучков, электровзрыв металлической проволоки), диспергационные (механическое дробление, разложение, механохимический синтез). Необходимо отметить, что в большинстве методов используется термическое воздействие, которое приводит к значительной агрегации нанопорошков и необходимости дополнительных операций по разделению на фракции по размерам.

Из перечисленных методов наиболее простыми, сухими, экологически чистыми и конкурентноспособными являются механохимический синтез и электровзрыв металлических проволок. Однако последний имеет существенные недостатки, а именно грохот электрического разряда, сложность и высокую стоимость оборудования.

Наиболее эффективный метод получения наночастиц был предложен Мак-Кормиком, он состоит в осуществлении обменных твердофазных реакций, подобранных с таким расчетом, чтобы образующиеся в результате взаимодействия побочные продукты легко растворялись в традиционных химических растворителях, а наночастицы – целевой продукт

– были бы в них нерастворимы. С этой точки зрения наиболее перспективны высокоэзотермичные системы, в которых легко могут быть проведены механостимулированные реакции.

Механохимическое восстановление твердых смесей оксидов активным металлом с получением высокодисперсных порошков металлов выгодно отличается короткими временами синтеза и одновременным устранением ряда экологических проблем. Продукты механохимической окислительно-восстановительной реакции (ОВР) – композиты $Me/(Me_{акт})_xO_y$ – смеси порошков высокодисперсных частиц оксида активного металла (MgO) и восстановленных элементов (W, Mo, Cu, Ge, Si). Оксид магния, обладая высокой температурой плавления, препятствует спеканию продуктов механической активации, а при

взаимодействии композитов Me/MgO с растворами соляной или серной кислот MgO переходит в хорошо растворимые соединения.

Из результатов рентгенофазового анализа продуктов механохимического восстановления оксидов WO₃, MoO₃, CuO, Cu₂O, GeO₂, SiO₂ магнием, определены оптимальные условия проведения механической активации. Показано, что при скорости вращения барабанов вокруг общей оси 1000 об/мин механохимические ОВР завершаются с формированием композитов W (Cu, Ge, Mo, Si)/MgO за время активации 2 (Cu), 4 (Si, Ge), 8 (Mo, W) мин. Определены необходимые стехиометрические составы смесей MeO + Mg и условия отделения высокодисперсных элементов от оксида магния последовательной обработкой композитов растворами: Cu/MgO – 1М HCl (H₂SO₄), H₂O_{дист.}; Si/MgO – 1М HCl, H₂O_{дист.}, HF; H₂O_{дист.}; Ge/MgO – 1М HCl, H₂O_{дист.}, 0,1М NaOH; H₂O_{дист.}; Mo(W)/MgO – 1М H₂SO₄, H₂O_{дист.}; HF; H₂O_{дист.}, ацетон.

Размеры частиц порошков W, Mo, Cu, Ge, Si, отделенных от побочных продуктов, определенные методом сканирующей электронной микроскопии, составили от ~ 0.01 до 0.1мкм.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект №. АААА-А17-117030310277-6).

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ СИНТЕЗА НАНОПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Самохин А.В., Цветков Ю.В.

*Институт металлургии и материаловедения РАН им А.А. Байкова, Москва,
samokhin@imet.ac.ru*

Нанопорошки металлов и неорганических соединений являются важнейшей составляющей технологий создания различных наноструктурных материалов, обеспечивающих высокие значения механических и эксплуатационных свойств в условиях интенсивного термического, механического, химического и радиационного воздействия. К таким материалам можно отнести функциональную керамику и твердые сплавы, дисперсноупрочненные и модифицированные жаропрочные сплавы, покрытия различного назначения, композиционные металлические, керамические и полимерные материалы и т.д.

Среди многообразия различных способов получения нанопорошков плазменный синтез является наиболее универсальным методом получения нанопорошков элементов, их неорганических соединений и композиций в контролируемой газовой атмосфере – инертной, восстановительной и

окислительной. Метод относится к категории газофазных процессов синтеза наночастиц и основывается на совокупности последовательно протекающих процессов: полном испарении сырья, вводимого в плазменную струю, целевых химических превращениях в газовой фазе, образовании пересыщенных паров в результате быстрого охлаждения продуктов химического взаимодействия, гомогенной нуклеации с последующим конденсационным и коагуляционным ростом индивидуальных частиц и, в конечном счете, осаждении сформированных частиц на поверхности сбора целевого продукта. Энерго-технологические характеристики процессов получения нанопорошков свидетельствует о конкурентоспособности плазменного метода и широких возможностях его применения.

Процессы получения порошков с помощью воздействия химически активной термической плазмы, как правило, осуществляются как струйно-плазменный процесс по схеме прямоточного реактора, соосно пристыкованного к выходному соплу плазменного генератора. Наряду с относительной простотой организации процесса их отличает высокая производительность, возможность организации непрерывного процесса, масштабируемость и способность к управлению и автоматизации. В значительной степени благодаря исследованиям сотрудников ИМЕТ РАН струйно-плазменные процессы переработки диспергированных веществ принадлежат к числу наиболее обеспеченных фундаментальными разработками и продвинутыми в отношении практической реализации. В ИМЕТ РАН разработана и неоднократно воспроизведена в различных модификациях плазмохимическая установка для синтеза нанопорошков различных металлов и соединений.

На основе многолетнего массива экспериментальных исследований плазмохимических процессов синтеза нанопорошков металлов, оксидов, нитридов, карбидов, боридов, а также композиций на их основе разработана структура параметров процесса, определяющих свойства получаемых нанопорошков и технико-экономические характеристики процесса в целом.

Представительность выполненных теоретических обобщений и практических рекомендаций по организации процессов обусловлены принятой и непрерывно развиваемой нами методологией исследования плазменных процессов, базирующейся на расчетах высокотемпературной термодинамики исследуемых систем, математическом трехмерном моделировании процессов формирования наночастиц по механизму коагуляции в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением, методики комплексного анализа получаемых порошковых материалов, а также конструктивных и технологических решениях, позволяющих с помощью управляемого плазмохимического синтеза получать порошки заданного химического, фазового и дисперсного состава.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00947-20-00 на 2020 год.

ПОРОШКОВЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АЛЫМОВ М.И.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
Черноголовка*

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
alymov@ism.ac.ru*

Развитие новых технологий консолидации порошковых наноматериалов с применением электромагнитных полей, газовой экструзии, экструзии в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, методов, сочетающих самораспространяющийся высокотемпературный синтез и прессование горячего продукта, ударно-волновые способы консолидации позволяет решать проблемы создания новых материалов с заданными свойствами.

Производство и широкое применение металлических нанопорошков сдерживается их высокой пирофорностью. Недавно был разработан эффективный способ подавления пирофорности металлических порошков и прессовок из них контролируемой пассивацией. Предложенный способ позволяет снизить продолжительность пассивации на порядок.

Исследован процесс воспламенения нанопорошков железа насыпной плотности и образцов, спрессованных до относительной плотности 0,3-0,5 при их нагреве на воздухе. Температура воспламенения спрессованных образцов не зависит от скорости нагрева и составляет 100-115 °С. Процесс окисления состоит из стадий инертного прогрева, воспламенения, поверхностного и фильтрационного режима реакции и догорания. Длительность активных стадий – воспламенения и фильтрационного окисления при одинаковых условиях нагрева зависит от плотности, но при этом характеризуется постоянством относительного увеличения массы образца [1].

Используя метод механического легирования и одноосное горячее прессование были получены нанокompозиты на основе алюминиевого сплава АА5049, упрочненные микродобавками многослойных углеродных нанотрубок покрытых наночастица TiC и без покрытия, обладающие повышенными механическими свойствами [2].

Синтезирована пористая каталитически активная мембрана на основе α -Al₂O₃. Для синтеза мембраны в исходный порошок Al₂O₃ вводили

порошкообразные добавки оксида магния и карбида кремния эвтектического состава с использованием прессования при давлении от 30 до 90 МПа и спекания при 1350 °С. Для придания синтезируемой мембране каталитических свойств в состав шихты вводили добавки $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$ до 10 % [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-13-00013П).

Список литературы:

1. M.I. Alymov, S.G. Vadchenko, E.V. Suvorova, V.A. Zelenskii, A.B. Ankudinov. Effect of the density of iron nanopowders on the parameters of their ignition during heating in air. Doklady Physical Chemistry, 2019, Vol. 488, Part 2, pp. 143–145. DOI: 10.1134/S0012501619100014
2. A. Aborkin, K. Khorkov, E. Prusov, A. Ob'edkov, K. Kremlev, I. Perezhogin, M. Alymov. Effect of increasing the strength of aluminum matrix nanocomposites reinforced with microadditions of multi-walled carbon nanotubes coated with TiC nanoparticles. Nanomaterials. 2019. 9(11). p. 1596.
3. В.И. Уваров, М.И. Алымов, В.Э. Лорян, Р.Д. Капустин, А.С. Федотов, М.В. Цодиков. Разработка мембраны с использованием технологического горения для процесса дегидрирования углеводородов. Новые огнеупоры. 2019. № 8. с.59-62.

СТРУКТУРНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ С СИЛИЦИДНЫМ И КАРБИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Карпов М.И.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

karпов@issp.ac.ru

В докладе сделан обзор состояния исследований в области создания новых жаропрочных сплавов для газотурбинного моторостроения и представлены результаты, полученные в ИФТТ РАН при участии ВИАМ при исследовании сплавов систем Nb-Si и Nb-C эвтектического типа. Сплавы на основе ниобия, упрочненные частицами силицидов, карбидов и других тугоплавких соединений в настоящее время рассматриваются как основа для создания нового поколения особо жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей.

Исследовались структура, кратковременные механические свойства, проводились испытания на длительную прочность в интервале температур 1200 – 1500 °С. Полученные результаты показали, что предельными температурами, при которых могут применяться сложнолегированные сплавы системы Nb-Si, не превышают 1300 °С. Ограничение связано с сопротивлением ползучести собственно упрочняющей фазы Nb₅Si₃. Сплавы системы Nb-C способны работать при более высоких температурах. Так образцы сплава Nb₄₀Mo₄₀C₂₀ сохраняют высокую длительную прочность при 1500 °С, благодаря более высокому сопротивлению ползучести фазы NbC. На основе полученных данных о зависимости скорости ползучести от напряжения определены величины энергии активации ползучести и параметра n, характеризующего зависимость скорости ползучести от напряжения. Сделаны предположения о механизмах высокотемпературной деформации исследованных сплавов

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты 16-02-00384 и 19-02-00434 в рамках Государственного задания ИФТТ РАН и Программы Президиума РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».

МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ КВАЗИДВУМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Петухов Д.И., Садилов И.С., Чернова Е.А., Лукашин А.В., Елисеев А.А.
Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва

Работа направлена на исследование процессов массопереноса в слоистых квазидвумерных системах для создания новых классов мембранных материалов. Рассмотрены мембранные материалы с ультратонкими (до 100 нм) селективными слоями, сформированные на основе наноллистов двумерных соединений, обладающих гидрофильной (оксид графена, слоистые карбиды титана, дисульфид молибдена) и гидрофобной поверхностью (графен, наноллисты CdTe в оболочке олеиновой кислоты). Изучены механизмы транспорта газов в данных системах и показана возможность реализации процессов газоразделения по механизмам конфигурационной диффузии и капиллярной конденсации в межслоевом пространстве.

С использованием данных классов мембран установлена возможность эффективного газоразделения в парах H₂/CH₄, NH₃/H₂, H₂O/N₂, C₄H₁₀/CH₄ и др. Показано, что мембраны на основе наноллистов оксида

графена, с гидрофильной поверхностью позволяют осуществлять селективный транспорт паров воды, а мембраны на основе CdTe, поверхность которого модифицирована олеиновой кислотой демонстрируют высокую проницаемость по отношению к тяжелым углеводородам (пропан, бутан). Изучены изменения межслоевого пространства при адсорбции и капиллярной конденсации газов в мембранах на основе оксида графена и CdTe в оболочке олеиновой кислоты. Представлены результаты *operando* исследования структуры мембран на основе оксида графена при выделении паров воды из газовых смесей различной влажности. Показано, что ключевую роль в процессах выделения конденсируемых компонентов играет межслоевое расстояние между нанолитами, которое определяет скорость массопереноса. Для оксида графена это позволяет достичь селективности по паре H_2O/N_2 до 10^4 , определяющей технологическую применимость данных мембран. С использованием контролируемого изменения межслоевого расстояния в квазидвумерных слоистых соединениях продемонстрирована возможность создания мембран, переключаемых внешним полем.

Работа по исследованию мембран на основе оксида графена выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-29-19105. Д.И. Петухов благодарит грант Президента РФ №МК-128.2019.3 (Договор № No 075-15-2019-194 от 23 мая 2019 г.) за финансовую поддержку работ по исследованию мембран на основе CdTe.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА И СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Колобов Ю.Р.

*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
kolobov@icp.ac.ru*

В докладе на основе обзора результатов оригинальных экспериментальных и исследований и компьютерного моделирования анализируется роль модификации (путем изменения химического и фазового составов, структуры, свойств и др.) внешней и внутренних (межкристаллитные границы зерен и фаз, дислокационные субграницы, микро - и нанопоры) поверхностей раздела в формировании механических и других свойств наноструктурных металлов и сплавов медицинского и технического назначения с целью определения возможностей управления указанными свойствами, в том числе для материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий [1- 4].

Проводится обобщение результатов исследований закономерностей формирования наноструктурного (НС), субмикроструктурного (СМК) и ультрамелкозернистого (УМЗ) состояний в металлах и сплавах. На примере медицинских сплавов на основе титана и магния рассмотрены возможности получения в условиях малотоннажного производства высокопрочных НС/СМК длинномерных прутков указанных материалов, обладающих повышенной пластичностью в условиях обработки при комнатной температуре за счет реализации процессов зернограницного проскальзывания и обнаруженного (на примере титана) проявления эффекта автоволнового распространения полос локализованной большой пластической деформации при кручении с реализацией в приповерхностных слоях процессов деформации со скоростями 10^2 - 10^3 с⁻¹, соответствующих динамическому нагружению [1, 5, 6].

Обнаружено аномальное поведение прочностных характеристик СМК и НС материалов в области высоких скоростей нагружения, проявляющееся в существенно более низком сопротивлении пластической деформации по сравнению с соответствующим для крупнозернистых материалов. Показано, что ударно-волновое нагружение приводит к существенному измельчению зерна в крупнозернистых материалах и отсутствию такого эффекта для образцов в исходном СМК состоянии [1, 7, 8].

Особое внимание уделено уникальным возможностям обработки фемто- и наносекундным лазерным облучением, позволяющим проводить обработку внешней поверхности без существенного разогрева приповерхностных слоев, что очень важно для НС/СМК материалов в связи с необходимостью сохранения в таких слоях высокопрочных нерекристаллизованного НС или СМК состояний. Излагаются результаты цикла работ по модификации поверхности наноструктурированных и субмикроструктурных материалов нано- и фемтосекундными лазерными импульсами [1,9].

На примере поверхностно - модифицированных титана и его сплавов демонстрируется использование СМК материалов для изготовления медицинских имплантатов для травматологии и деталей конструкции протезов крупных суставов.

Список использованной литературы:

1. Kolobov Y. R. Regularities and Mechanisms of Formation of Submicro-, Nano-, and Ultrafine-Grained Structures and Mechanical Properties of Metals and Alloys Under Different Treatments //Russian Physics Journal. 2018. V. 61. №. 4. P. 611-623.

2. Kolobov Yu.R., Golosova O.A., Manokhin S.S.. Regularities of formation and degradation of the microstructure and properties of new ultrafine-grained low-modulus Ti–Nb–Mo–Zr alloys // Russian Journal of Non-Ferrous Metals.- 2018. -Vol. 59.- No. 4.- pp. 393–402.

3. Nelasov I. V., Lipnitskii A. G., Kartamyshev A. I., Maksimenko V. N., Kolobov Yu. R. Molecular-dynamics simulation of the α -Ti plastic deformation under conditions of high-energy effects // AIP Conference Proceedings.–2018.– V.2053.–P. 030047

4. Kolobov Yu.R., Prohorov A.N., Manohin S.S., Tokmacheva-Kolobova A.Yu., Serebryakov D.I., Afanasiev V.V.. Comparative Study of the Structural-Phase State and Mechanical Properties of Ni–Cr(X) and Fe–Cr(X) Heat-Resistant Alloys Fabricated by Additive Technologies // Russian Journal of Non-Ferrous Metals.– 2018.– Vol. 59.– No. 6.– pp. 685–692.

5. Божко С.А., Бецофен С.Я., Колобов Ю.Р., Вершинина Т.Н. Закономерности формирования структуры и свойств сплава Mg-Al-Zn-Mn при воздействии пластической деформацией прокаткой // Металлы.–2015.– №2.–С.41-47

6. Ivanov M. B., Penkin A. V., Kolobov Yu. R. Torsion-induced propagation of a localized deformation band in nanostructured titanium // Technical Physics Letters. - 2015. –V. 40. - N. 12 - pp. 1082–1085.

7. Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Колобова А.Ю., Кудымова Ю.Е., Бетехтин В.И., Гольшев А.А., Молодец А.М., Андриевский Р.А. Фрагментация зерен и изменения фазового состава крупно- и нанокристаллического титана в результате ступенчатого ударно-волнового воздействия // Письма ЖТФ.–2016.– Т. 42.– №18.– С. 63–71.

8. Колобов Ю.Р., Перевезенцев В.Н., Манохин С. С., Кудымова Ю.Е., Колобова А.Ю., Брагов А. М., Константинов А.Ю. Особенности формирования структуры и развития пластической деформации при динамическом нагружении крупнозернистого и наноструктурированного титана // Композиты и наноструктуры. – 2016. – Том 8. – №1 .– С. 16-29

9. Kolobov Yu.R., Golosov E.V., Vershinina T.N. et.al. Structural transformation and residual stresses in surface layers of $\alpha + \beta$ titanium alloys nanotextured by femtosecond laser pulses // Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. –2015. –Vol. 119.– № 1.– P. 241–247.

НАНОСТРУКТУРНЫЙ ДИЗАЙН МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ

Валиев Р.З.

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
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. При этом свойства полученных объемных наноматериалов определяются не только формированием ультрамелких зерен, но и структурой и фазовым составом границ зерен. В последнее десятилетие активное развитие получила зернограничная инженерия объемных наноматериалов, связанная с созданием различных границ зерен (малоугловых и высокоугловых, специальных и общего типа, равновесных и неравновесных, а также с присутствием зернограничных сегрегаций и выделений) в ультрамелкозернистых металлах. Показано, что формирование разных типов границ зерен значительно влияет на механические свойства наноструктурных металлов и сплавов, особенно, на хрупкость и пластичность, усталость и сверхпластичность. Особый интерес представляет использование зернограничной инженерии для создания наноматериалов с так называемыми многофункциональными свойствами, сочетающими высокие механические и функциональные свойства (коррозионная и радиационная стойкость, электропроводность и т.д.). Обсуждаются физическая природа и применения наноматериалов в инновационных разработках, направленных на их широкое использование в энергетике, медицине и технике.

ФОРМИРОВАНИЕ СМАЧИВАЮЩЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛА И ЕГО РОЛЬ В СВОЙСТВАХ И ТЕХНОЛОГИИ РОСТА УЛЬТРАТОНКИХ СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ

Плюснин Н.И.

*Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток*
plusnin@iacp.dvo.ru

В настоящее время, значительное внимание уделяется созданию новых слоистых наноматериалов на основе гибридных структур (см., например, [1]), а также на основе эффекта близости в ультратонких слоях

[2]. В частности такие наноматериалы представляют значительный интерес для спинтроники [3]. Недавнее открытие ультратонкого смачивающего слоя металла на полупроводнике [4] создает новые перспективы для получения, как слоистых наноматериалов, так и прекурсоров для нанолитографии в этих наноматериалах [5]. Кроме того, смачивающий слой модифицирует приграничную область полупроводника и ее свойства, что создает уникальный по своей природе биметаллический наноматериал на кремнии [6]. Более того, теоретическое рассмотрение особенностей зарождения и роста смачивающего слоя позволяет представить его структуру [7] и, в конечном итоге, - предсказать его свойства.

Доклад посвящен роли смачивающего слоя металла или металл-кремний в свойствах и технологии формирования ультратонких слоев металла или силицида в системе металл (Cr, Fe, Co, Cu) – подложка кремния. Для получения смачивающего слоя необходимы низкотемпературные режимы его формирования. В докладе, также представлена разработанная нами специальная технология, использующая осаждение из низкотемпературного пара. В целом, полученные результаты позволяют сформировать новый взгляд на формирование ультратонких пленок металлов на полупроводнике, а также контакта металл-полупроводник и имеют большое значение для создания новых приборов наноэлектроники и спинтроники.

Список источников:

1. V. R. Mudinepalli, C. J. Tsai, Y. C. Chuang, P. C. Chang, N. Plusnin, W. C. Lin. Annealing-induced alloy formation in Pd/Fe bilayers on Si (1 1 1) for hydrogen sensing. *Applied Surface Science*, 366 (2016) 38-45.
2. I. Žutić, A. Matos-Abiague, B. Scharf, H. Dery, K. Belashchenko. Proximitized materials. *Materials Today*, 22 (2019) 85-107.
3. N. I. Plusnin. Creation of Electrical Spin Injectors for Silicon Spintronics: Achievements and Prospects. *Solid State Phenomena*. 245 (2016) 32-41.
4. N. I. Plusnin. Wetting Layer and Formation of Metal-Semiconductor Interface. *Defect and Diffusion Forum*. 386 (2018) 9-14.
5. Н.И. Плюснин и А. М. Маслов, Морфологические превращения в нанофазном смачивающем слое меди на кремнии, активированные давлением зонда атомно-силового микроскопа, Письма в ЖТФ. 5 (2018) 16-24.
6. А. М. Маслов, N. I. Plusnin. Evolution of Optical Spectra at the Initial Stages of Fe Growth on Si (001). *Defect and Diffusion Forum*. 386 (2018) 15-20.
7. Н.И. Плюснин, Феноменологические модели зарождения и роста металла на полупроводнике, Физика твердого тела. 61/12 (2019) 2421- 2424.

СЕКЦИЯ 1

Фундаментальные основы синтеза нанопорошков

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРЕВРАЩЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ И В МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Мелихов И.В.¹, Веденяпин В.В.², Аджиев С.З.¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

²*ИИПМ им. М.В. Келдыша РАН; РУДН, Москва*

melikhov@radio.chem.msu.ru

В последнее время обострилась проблема создания материалов, получение и использование которых приводило бы к минимальным энергозатратам и максимальной экологической безопасности среды. Подходы к решению этой проблемы затрагивались в двух миллионах научных статей, учтённых базой “Scopus”. Однако, результаты исследований не удалось обобщить в виде теории управления процессами, приводящими к превращению нанодисперсных веществ с заданными свойствами. Вместе с тем стало ясно, что такое обобщение возможно только на основе информации о связи указанных процессов с молекулярным движением в частицах дисперсных веществ, причём выявление этой связи должно завершиться формулированием ряда кинетических уравнений, характеризующих изменение свойств частиц при внешних воздействиях. В комплекс таких уравнений, который целесообразно считать молекулярно-кинетической моделью превращения веществ в материалы, придётся ввести информацию о многих уравнениях, не описанных ранее. Для накопления такой информации придётся провести специальные исследования, последовательность которых определится данными о создании материалов, обобщёнными в виде методологии создания материалов нового поколения.

Представляется целесообразным включить в специальные исследования решение следующих задач. 1. Создание априорных мезокинетических моделей процессов, которые, судя по общим представлениям о веществе, могут влиять на морфологические свойства частиц дисперсного вещества. Выбор модельных веществ для последующих исследований. Разработка априорных молекулярно-кинетических моделей процессов с участием модельных веществ. 2. Экспериментальное изучение процессов с участием каждого из модельных веществ. Обобщение экспериментальных данных в виде уравнений для скорости изменения функции распределения частиц по молекулярно-

кинетическим параметрам их состояния при различных воздействиях. 3. Сопоставление данных о измеренных функциях распределения частиц модельного вещества с целью поиска интенсивности воздействий, при которых функции распределения совпадают и являются носителями информации о всех модельных веществах. 4. Создание молекулярно-кинетической модели превращения нанодисперсного вещества в материал нового поколения с использованием экспериментальных данных о изученных процессах.

Опыт решения перечисленных задач уже накоплен. Разработаны методы многопараметрической характеристики нанодисперсных веществ, накоплена информация о многих процессах в различных наносистемах и сформулированы модели, описывающие опытные данные о ряде веществ. Однако, чтобы использовать накопленную информацию при изучении превращения веществ в материалы, нужно провести дополнительные исследования в соответствии с описанной методологией.

Литература:

1. Мелихов И.В. Некоторые направления развития идей технологической науки // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 12. № 4. С. 341–354.

2. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твёрдого вещества. Москва: Бином. Лаборатория знаний. 2006. 309 с.

3. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. Approaches to determining the kinetics for the formation of a nano-dispersed substance from the experimental distribution functions of its nanoparticle properties // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2019. Vol. 10, № 5. P. 549–563.

Приглашенный доклад

ВЛИЯНИЕ СУЛЬФАТ ГРУПП НА ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ

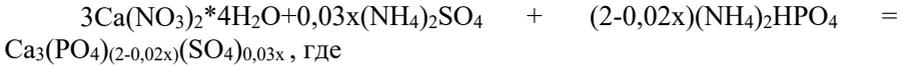
Хайрутдинова Д.Р., Гольдберг М.А., Смирнов С.В., Антонова О.С.,
Оболкина Т.О., Крохичева П.А., Баринов С.М.

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва,
dvdrr@list.ru*

Материалы на основе трикальцийфосфата (ТКФ) широко применяются в реконструктивно - восстановительной хирургии и стоматологии [1]. Его преимуществом по сравнению с наиболее известным фосфатом кальция – гидроксиапатитом, является растворимость. Из литературных данных известно, что материалы на основе ТКФ активно

растворяются в первые сутки, затем происходит насыщение раствора, и процесс растворения замедляется [2]. Регулировать резорбцию ТКФ можно с помощью механического введения в материал сульфата кальция (СК), имеющего более высокую растворимость [3].

В настоящей работе авторы получали трикальцийфосфатные материалы, содержащие СК, с помощью химического синтеза, который проводили по приведенной ниже химической реакции:



$$x = 0, 1, 5, 10, 20.$$

После синтеза полученный осадок фильтровали и сушили при температуре 200°C до полного удаления жидкой фазы.

Из полученных порошков синтезировали цементы. В качестве цементной жидкости использовали водный раствор фосфата магния. Соотношение порошок\жидкость составляло 2\1. Синтез проводили мануально на предметном стекле с помощью медицинского шпателя. Для этого порошок смешивали с цементной жидкостью до образования густого раствора, полученную цементную пасту помещали в цилиндрическую тефлоновую форму и оставляли на воздухе до полного затвердевания.

Проводили рентгенофазовый анализ полученных цементов, а также их морфологические и механические исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-03-00429.

Список литературы:

1. Gurin, A. N., Komlev, V. S., Fadeeva, I. V., Petrakiva, N. V., Varda, N. S. A comparative study of bone regeneration potency of alfa and beta-tricalcium phosphate bone substitute materials //Stomatologija. – 2012. – V. 91. – №. 6. – P. 16-21.
2. Komlev, V., Mastrogiacomo, M., Pereira, R. C., Peyrin, F., Rustichelli, F., Cancedda, R. Biodegradation of porous calcium phosphate scaffolds in an ectopic bone formation model studied by X-ray computed microtomograph. – 2010.
3. Smirnov V. V., Goldberg M. A., Khairutdinova D. R., Antonova O. S., Smirnov S. V., Konovalov A. A., Barinov S. M.. Synthesis and Properties of Bone Cement Materials in the Calcium Phosphate–Calcium Sulfate System//Inorganic Materials. - 2017. - V. 53. - N. 10. - P.1075–1079.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Ni-Pt

Варыгин А.Д.^{1,2}, Попов А.А.¹, Шубин Ю.В.^{1,2}, Плюснин П.Е.^{1,2},

Шарафутдинов М.Р.³

¹ИИХ СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ИХТТМ СО РАН, Новосибирск

a.varygin@g.nsu.ru

Наносплавы платиновых металлов с металлами подгруппы железа (Fe, Ni, Co) обладают рядом специфических физико-химических свойств, что позволяет найти им применение в различных областях науки, например, в качестве микромагнитных систем, а также в катализе, в частности, в различных электрохимических процессах, реакциях гидрирования и для выращивания углеродных нановолокон.

Изменяя при приготовлении сплава соотношение исходных компонентов и температуру обработки, можно контролировать активность и стабильность получаемых катализаторов. Одним из направлений в поиске способов модифицирования каталитических свойств сплавных систем является синтез сверхструктурно-упорядоченных частиц. Сверхструктурное упорядочение в решетке биметаллического сплава (образование интерметаллидов) приводит к изменению его электронного строения и позволяет расширить область применения катализаторов. Исследования показывают, что некоторые интерметаллиды проявляют повышенную устойчивость к коррозии и являются более активными по сравнению с неупорядоченными сплавами того же состава. Для получения катализаторов на основе упорядоченных частиц в литературе предложено большое число подходов, однако немногие из них позволяют получить сплавы с широко варьруемым составом.

В работе предложен удобный способ синтеза биметаллических наносплавов методом восстановительного термолитического восстановления многокомпонентных предшественников при сравнительно низких (300-600 °C) температурах. Преимуществом предложенного метода является возможность задания любого необходимого соотношения металлов. В качестве предшественников используются микрогетерогенные смеси комплексных соединений необходимых металлов. Для системы Ni-Pt такими соединениями выступают $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ и $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

В докладе представлены результаты работ по синтезу и исследованию наносплавов Ni-Pt. На синхротронном источнике излучения в высокотемпературной рентгеновской камере в условиях *in situ* изучена эволюция фазового состава сплава в процессе формирования интерметаллида NiPt из многокомпонентного предшественника. На основе

полученных данных подобраны условия для эффективного получения однофазных упорядоченных и неупорядоченных сплавов в данной системе. Синтезирован широкий ряд твердых растворов $Ni_{1-x}Pt_x$ в области концентраций 25÷75 ат.% Pt. Методом РФА изучены фазовые превращения дисперсных сплавов и процессы их сверхструктурного упорядочения. Получены высокодисперсные интерметаллиды Ni_3Pt , $NiPt$ и $NiPt_3$ с различной степенью упорядочения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-03-00777 А.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ ГАФНАТОВ ЕВРОПИЯ И ЛАНТАНА И ИХ ФАЗОВАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Воротыло С., Еремеева Ж.В., Бардасова К.В., Капланский Ю.Ю.,
Ахметова А.
НИТУ «МИСис», Москва
s.vorotilo@misis.ru

Целью данного исследования было выявление закономерностей и механизмов структуро-и фазообразования при механохимической обработке эквимоллярных смесей оксидов $La_2O_3 + HfO_2$ и $Eu_2O_3 + HfO_2$, а также установление взаимосвязей между особенностями фазовых диаграмм соответствующих систем и результатами их механохимической обработки.

Методом первопринципного моделирования построены фазовые диаграммы для систем La-Hf-O и Eu-Hf-O при 0К. Одним из основных отличий данных систем является существование в системе La-Hf-O неравновесной фазы La_2HfO_5 . Эквимоллярные смеси оксидов $La_2O_3 + HfO_2$ и $Eu_2O_3 + HfO_2$ подвергали механохимической обработке в течение 45 мин. Исследована структура и фазовый состав наноструктурированных продуктов механосинтеза.

Сформулированы механизмы фазовых превращений при механохимической обработке смесей $La_2O_3 + HfO_2$ и $Eu_2O_3 + HfO_2$. Для смеси $La_2O_3 + HfO_2$ выявлено образование неравновесной фазы La_2HfO_5 в процессе механохимической обработки и значительно более высокая степень конверсии исходных реагентов в стабильную фазу $La_2Hf_2O_7$, в то время как для смеси $Eu_2O_3 + HfO_2$ характерна селективная аморфизация оксида европия, структурные превращения оксида гафния из моноклинной

модификации в орторомбическую, и сравнительно низкая конверсия в фазу $\text{Eu}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$.

Работа проводилась в рамках гранта РФФИ (номер гранта 19-08-00273).

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Крутикова И.В., Иванов М.Г.

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

ivjikhina@iep.uran.ru

Область применения наночастиц довольно широка, начиная от лекарственных средств и их доставки до разработки эффективных солнечных элементов [1,2]. Высокий интерес к наночастицам оксидов иттрия связан с тем, что они являются исходным материалом для спекания керамических материалов, обладающих высоким светопропусканием в видимой и ИК-области спектра, высокой термо- и химической стойкостью, и являющихся перспективным материалом для твердотельных лазеров, люминофоров, сцинтилляторов. Одной из основных проблем создания высокопрозрачных материалов остается синтез наночастиц. Механические методы получения наночастиц при помощи размолла и дробления не обеспечивают необходимой однородности распределения частиц по размерам и вносят загрязнения в измельчаемый материал. Наночастицы, полученные химическими методами, часто неоднородны по своей структуре и составу, а полученные при помощи пиролиза: загрязнены продуктами реакции и сильно агломерированы. В целом же, большинство немеханических методов получения наночастиц ограничены по производительности. Оптимизация методов синтеза и компактирования наночастиц с целью получения высокоплотных малодефектных керамических материалов являются крайне актуальными задачами. Кроме того, перед применением наночастиц крайне важно охарактеризовать их свойства (морфология, фазовый состав, исследование поверхности, химические, электрические и др. свойства).

В настоящей работе нанопорошки оксидов иттрия, допированные редкоземельными ионами (Ce^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} и др.) были получены методом испарения материала с помощью волоконного иттербиевого лазера YLR-1000 (IPG Photonics, Россия) с длиной волны 1.07 мкм и последующей конденсации паров в потоке буферного газа. Метод лазерного испарения отличается отсутствием реактивов, кроме того, испарение наночастиц

происходит в атмосфере очищенного воздуха, что обеспечивает получение высокочистых сферических слабоагрегированных наночастиц со средним размером $10 \div 20$ нм и узким диапазоном дисперсии, что подтверждается результатами просвечивающей электронной микроскопии. Лазер работал в модулированном режиме с частотой модуляции 5 кГц при средней мощности лазера $255 \div 500$ Вт и различной длительности импульса. Показано, что уменьшение длительности импульса от 100 до 60 мкс приводит к смещению распределения частиц по размерам в сторону уменьшения среднего размера. Интенсивность лазерного излучения в фокальном пятне - 10^6 Вт/см². Средняя производительность нанопорошков для оксидов иттрия ~ 25 г/ч. Согласно РФА нанопорошков оксидов иттрия исходные наночастицы однофазны и представляют собой твердый раствор на основе моноклинной формы (S.G.: C2/m), оттоженные образцы являются однофазным материалом, представляющие собой твердый раствор на основе кубической формы (S.G.: Ia-3). Методом ТГ-ДСК анализа установлено, что нанопорошки Y₂O₃ помимо воды и углекислого газа среди уходящих газов содержат около 5 масс. % летучих соединений, в том числе, в порошках наблюдались следы оксидов азота. Методом ИК-Фурье спектроскопии подтверждает присутствие ионов OH⁻, CO₃²⁻, NO₂⁻ и NO₃³⁻ на поверхности частиц, образующиеся в результате сорбции воды и атмосферных газов. Содержание углерода в полученных нанопорошках линейно зависит от площади удельной поверхности порошка и составляет примерно 0,1 мг/м².

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00531 мол_а.

Список литературы:

1. Beek W.J.E. et al. Adv. Mater., 2004, 16, 1009-13.
2. Murthy S.K. Int. J. Nanomed, 2007, 2, 129-41.

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НАНОКРИСТАЛЛА

Магомедов М.Н.

*Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал
объединенного института высоких температур РАН, Махачкала
mahmag4@mail.ru*

Обсуждается применение формализма равновесной и обратимой термодинамики для изучения свойств нанокристалла однокомпонентного вещества из N атомов. Показано, что корректное выражение для удельной

поверхностной энергии (σ) можно получить только путем изохорно-изотермической обратимой деформации формы наносистемы. Для получения корректного выражения для поверхностного давления (P_{sf}) необходимо ввести понятие не имеющей объема геометрической поверхности, т.е. поверхности Гиббса. Иначе в наносистеме возникнут градиенты, величину которых невозможно оценить в рамках формализма равновесной и обратимой термодинамики

На основе предложенной ранее RP-модели [1-3] получены аналитические выражения как для σ и P_{sf} , так и для изохорной ($\sigma'(T)_v$) и изобарной ($\sigma'(T)_P$) производных функции σ по температуре. В RP-модели нанокристалл со свободной поверхностью имеет вид прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием, ограниченный гранями типа (100) с геометрической поверхностью Гиббса. Величина $f = N_{ps}/N_{po}$ – это параметр формы, который определяется отношением числа N_{ps} атомов на боковом ребре к числу N_{po} атомов на ребре основания параллелепипеда. Для стержневидной формы $f > 1$, для куба $f = 1$, для пластинчатой формы $f < 1$. Указано, что полученные на основе RP-модели выражения для термодинамических свойств применимы как к макро-, так и к нанокристаллу при любых (соответствующих твердой фазе) температуре (T) и удельном объеме ($v = V/N$).

Из полученных выражений можно сделать выводы, справедливые при любом N :

1. Функция $\sigma(P)$ с ростом давления увеличивается до максимума (при $P_M(N, f)$), после чего она резко уменьшается и при определенном давлении ($P_f(N, f)$) переходит в отрицательную область. Более подробно это изучено в [1, 2].

2. При $P < P_M$ для веществ, у которых $\alpha_p = (\partial \ln v / \partial T)_P > 0$ выполняется: $\sigma'(T)_P < \sigma'(T)_v < 0$. При $T = 0$ К обе функции при любых N - f -параметрах достигают максимума: $\sigma'(0)_P = \sigma'(0)_v = 0$ [1, 2]. Это согласуется с третьим началом термодинамики в «сильной» формулировке Планка. Таким образом зависимости $\sigma'(T)_P$ и $\sigma'(T)_v$ нелинейные.

3. При $P = 0$ поверхностное давление отрицательное, т.е. $P = 0$ нанокристалл растянут тем сильнее, чем выше температура или чем заметнее форма нанокристалла отклонена от энергетически оптимальной формы (для RP-модели это куб) [1-3].

4. Функции $\sigma(N, f)$, $\sigma'(T)_P$ и $\sigma'(T)_v$ при $P < P_M$ убывают с уменьшением N тем заметнее, чем выше температура, или чем заметнее форма нанокристалла отклонена от энергетически оптимальной формы (для RP-модели это куб) [1-3].

5. При высоких давлениях и низких температурах функции $\sigma(N)$ может возрасти при изобарно-изотермическом уменьшении размера

нанокристалла [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 18-29-11013_мк и Программы Президиума РАН (программа б, грант 2-13).

1. Magomedov M.N. On the Statistical Thermodynamics of a Free-Standing Nanocrystal: Silicon // Crystallography Reports. 2017. Vol. 62. N 3. P. 480–496. DOI: 10.1134/S1063774517030142

2. Magomedov M.N. State Equation of a Nanocrystal with Vacancies // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. Vol. 12. N 1. P. 185-196. DOI: 10.1134/S1027451018010299

3. Magomedov M.N. Change in Thermodynamic Properties of a Germanium Nanocrystal with a Decrease in its Size under Various P-T-conditions // Nanotechnologies in Russia. 2019. Vol. 14. N 1-2. P. 21-32. DOI: 10.1134/S1995078019010063

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ УСЛОВИЯМИ СИНТЕЗА,
СТРУКТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ НАНОЧАСТИЦ
ДИОКСИДА ОЛОВА, ДОПИРОВАННЫХ 3D И 4F ЭЛЕМЕНТАМИ**

Подурец А.А., Колоколов Д.С., Фомкина А.С., Одегова В.С., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Вознесенский М.А., Осмоловская О.М.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
[o_osmolovskaya@mail.ru](mailto:osmolovskaya@mail.ru)

Диоксид олова представляет собой широкозонный полупроводник (запрещенная зона 3.6 эВ, область UV-A), наночастицы которого в последнее время активно исследуются как фотокатализаторы различных органических реакций. Для повышения энергоэффективности предложено смещать область их фотохимической активности в диапазон видимого света путем допирования, однако, механизм этого процесса до сих пор не выяснен окончательно. В данной работе было изучено влияние различных концентраций переходных (3d (медь, кобальт) и 4f (европий, тербий)) элементов на характеристики допированных наночастиц SnO₂, полученных в мягких и жестких условиях методами «мокрой» химии.

Методами ПЭМ и БЭТ показано, что в мягких условиях (метод соосаждения) независимо от природы допанта образуются частицы сферической формы с размерами менее 5 нм. В ходе последующей гидротермальной обработки (жесткие условия) формируются частицы

кубической или стержнеобразной формы, размеры которых уже зависят от природы допанта. Для всех допированных наночастиц зафиксировано изменение параметров элементарной ячейки по сравнению с реперными SnO_2 , что подтверждает успешность допирования. С использованием оригинального подхода к квантово-химическим расчетам в рамках метода DFT определены положения допантов в кристаллической решетке SnO_2 и показано, что они зависят от формы существования допанта в исходной реакционной среде. Установлено, что допирование способствует формированию поликристаллических частиц, при этом в мягких и жестких условиях тенденции изменения размера кристаллитов с ростом концентрации допанта являются разнонаправленными. Методами Рамановской спектроскопии и РФЭС показано наличие в образцах кислородных вакансий, количество которых можно регулировать путем изменения природы допанта и условий синтеза.

По данным импедансной спектроскопии для всех допированных образцов в интервале 77-400 К существует не только объемная проводимость, но и проводимость границ зерен, что хорошо коррелирует с обнаруженной поликристаллическостью наночастиц. При этом во всех случаях рассчитанное значение энергии активации объемной проводимости отвечает определенным из спектров поглощения величинам оптической запрещенной зоны.

Исследование фотокаталитической активности полученных образцов под действием УФ- и видимого света проводилось путем изучения кинетических зависимостей деградации модельного красителя метиленового голубого с регистрацией масс-спектров продуктов реакции; предварительно подтверждено отсутствие адсорбции красителя на наночастицах. Показано, что эффективность фотокатализа обусловлена природой допанта и количеством кислородных вакансий в материале; процесс происходит при длинах волн значительно больших, чем соответствующие значения оптической запрещенной зоны.

Кроме того, для 4f- SnO_2 образцов показано наличие тушения люминесценции при 25 мол% допанта в наночастицах, полученных гидротермальным методом, связанное с близким расположением атомов друг относительно друга.

Таким образом, показано, что путем варьирования природы допанта и процедуры синтеза возможно регулирование его положения в структуре SnO_2 , что приводит к контролируемому появлению дефектов, определяющих функциональную активность материала.

Исследования проведены на базе Научного парка СПбГУ: Рентгенодифракционные методы исследования, Методы анализа состава

вещества, Инновационные технологии композитных наноматериалов, Оптические и лазерные методы исследования, Вычислительный центр.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-03-00762 А.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА СОСТАВА $\text{SnO}_2@ \text{SnO}_2$ (TiO_2 , ZnO): СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ

Подурец А.А.¹, Барр М.², Осмоловский М.Г.¹, Бобрышева Н.П.¹, Бахманн Ж.^{1,2}, Осмоловская О.М.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

²*Университет Эрлангена-Нюрнберга, Германия*

anastasiia.podurets@gmail.com

Полупроводниковые наночастицы на основе SnO_2 (ширина запрещенной зоны 3.6 эВ), широко изучаются как катализаторы реакций фотокаталитического разложения органических загрязнителей для очистки сточных вод с использованием в качестве модельного загрязнителя органического красителя метиленового голубого (МВ), концентрация которого может быть легко определена по окраске исследуемого раствора. В данной работе мы предлагаем новый подход к регулированию фотокаталитических характеристик материалов на основе SnO_2 путем создания структур типа ядро – оболочка, основываясь на известной возможности в значительной степени изменять функциональные свойства материалов путем получения их тонких слоев. В связи с тем, что для достижения оптимальных фотокаталических характеристик формирующийся слой должен быть тонким и упорядоченным, для его получения нами был выбран метод атомного слоевого осаждения (ALD). Данный метод широко используется для получения тонких пленок, однако, круг получаемых с его помощью порошкообразных продуктов весьма ограничен.

Целью данной работы является исследование влияния структурных характеристик наночастиц типа ядро-оболочка состава $\text{SnO}_2@ \text{SnO}_2$ (TiO_2 , ZnO) на их фотокаталитическую активность под действием УФ- и видимого излучения.

Для получения ядра (наночастиц SnO_2 размером 4 нм) использовался метод осаждения, далее проводился синтез полупроводниковых оболочек разного состава (SnO_2 , TiO_2 , ZnO) методом ALD при температуре 150-200°C с использованием воды и органических

прекурсоров (TDMA, TPIP, DEZ). Качественный анализ состава оболочек был проведен методом РФЭС; показано, что ионы Sn^{4+} , Ti^{4+} , Zn^{2+} образуют оболочку без изменения степени окисления. Неизменность фазового состава образцов подтверждена методом РФА, обнаружено увеличение размеров кристаллитов и изменение параметров решетки, что косвенно подтверждает успешность ALD. По данным ПЭМ высокого разрешения и величины удельной поверхности толщина оболочки составляет от 0.9 до 1.4 нм в зависимости от природы её материала. Продемонстрировано, что наличие оболочки существенно уменьшает величину запрещенной зоны материала (с 3.7 эВ для ядра до 2.8 эВ у оболочки диоксида олова).

Фотокаталитическая активность образцов (кинетические зависимости деградации и состав продуктов, определённый методом масс-спектроскопии) была протестирована с использованием МВ ($2 \cdot 10^{-3}$ г/л) и трех источников изучения с предварительно определенными различными спектрами испускания. Изучена «тёмная» адсорбция МВ на поверхности всех образцов и показано, что она не превышает 5%, что исключает её влияние на фотокаталитический процесс. Установлено, что фотокаталитические свойства зависят от структуры наночастиц; при этом для оптимального образца $\text{SnO}_2@/\text{SnO}_2$ 90% деградации достигается через 5 минут при использовании видимого излучения.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-03-00762-а. Исследования были проведены на базе ресурсных центров «Инновационные технологии композитных материалов», «Методы анализа состава и вещества», «Нанотехнологии», «Оптические и лазерные методы исследования», «Рентгенодифракционные методы исследования», «Физические методы исследования поверхности» Научного парка СПбГУ.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Co-Pt, Ni-Pt

Попов А.А.¹, Шубин Ю.В.^{1,2}, Плюснин П.Е.^{1,2}, Бауман Ю.И.³,
Мишаков И.В.^{2,3}, Шарафутдинов М.Р.⁴

¹ИИХ СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ИК СО РАН, Новосибирск

⁴ИХТТМ СО РАН, Новосибирск

apopov@niic.nsc.ru

Сверхструктурное упорядочение биметаллических сплавов приводит к изменению кристаллической решетки и формированию

интерметаллидов, при этом значительно изменяются электронные свойства поверхности, что может оказывать положительное влияние на каталитические характеристики материалов на основе сплавных частиц. Варьируя условия получения катализатора на основе сплава с возможностью сверхструктурного упорядочения, температуру обработки и соотношение металлов, можно менять как активность, так и селективность приготовленного катализатора. В работе разработана методика получения катализаторов на основе сверхструктурно-упорядоченных сплавов платиновых металлов с различной степенью упорядочения, испытаны каталитические свойства полученных образцов в процессе получения наноструктурированного углеродного волокнистого материала (УНВ) при разложении этилена.

В докладе описан синтез широкого ряда наносплавов $Co_{1-x}Pt_x$ и $Ni_{1-x}Pt_x$ посредством восстановительного термолиза двухкомпонентных предшественников. Предшественники представляют собой специально-приготовленные микрогетерогенные смеси аминоккомплексов соответствующих металлов. Термолиз предшественников проводится в атмосфере водорода при относительно низких температурах (300-600 °С), что позволяет получать высокодисперсные порошки гомогенных сплавов. Процессы термолиза предшественников и структурно-фазовые превращения в образующихся сплавах изучены методами термического анализа и высокотемпературного РФА *in situ*. Показано, что формирование сплавных частиц и упорядочение в данных системах в области эквиатомного состава протекает за времена порядка нескольких часов.

Испытания катализаторов в процессе получения наноструктурированных углеродных волокон из этилена показали наличие концентрационных максимумов активности при составах 75 ат.% Co и 90 ат.% Ni. Тем самым был продемонстрирован синергетический эффект смешения компонентов в сплавах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-03-00777 А.

О МЕХАНИЗМАХ КОАЛЕСЦЕНЦИИ И СПЕКАНИЯ НА НАНОМАСШТАБАХ

Самсонов В.М.¹, Талызин И.В.¹, Васильев С.А.^{1,2}, Алымов М.И.²

¹Тверской государственный университет, Тверь

²ИСМАН РАН им. А.Г. Мерджанова, Черноголовка

samsonoff@inbox.ru

Тема нашей презентации связана с двумя примечательными, но оставшимися почти незамеченными недавними юбилейными датами:

столетием со дня рождения Я.Е. Гегузина и 125-летием со дня рождения Я.И. Френкеля. Оба они принадлежат к основоположникам науки о коалесценции капель и спекании твердых частиц. Статья Я.И. Френкеля [1] цитируется [2, 3] даже далеко за пределами бывшего Советского Союза. Результаты наших недавних работ [4, 5] позволяют сделать два интересных, как мы полагаем, вывода: 1) закономерности и механизмы коалесценции и спекания на наномасштабе принципиально различны, и температура плавления контактирующих наночастиц, определенная с учетом ее размерной зависимости, позволяет различать два вышеупомянутых явления; 2) основной механизм коалесценции не только на макро-, но и на наномасштабах соответствует вязким течениям внутри сливающихся капель, вызванных тенденцией к уменьшению свободной поверхностной энергии дочерней капли. Иными словами, основная идея теории Френкеля [1] в большей или меньшей степени применима и к наноклапям. В развитие наших предыдущих работ [4, 5], мы распространили теорию Френкеля на коалесценцию наноклапель. Теоретические результаты, включая оценки характерного времени слияния, были сопоставлены с нашими молекулярно-динамическим (МД) результатами и экспериментальными результатами Я.Е. Гегузина [6] по коалесценции макроскопических капель (см. рис. 1).

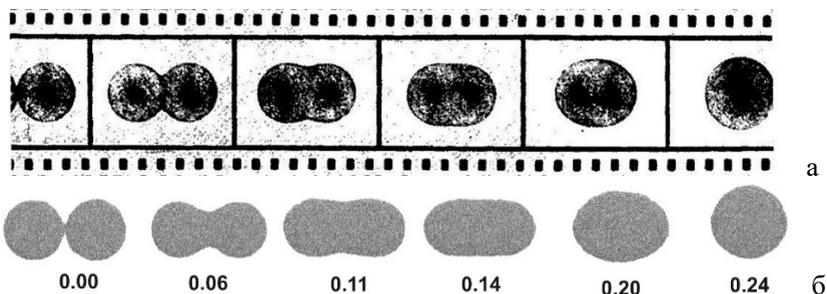


Рисунок 1 – Сравнение последовательных экспериментальных кадров из фильма Я.Е. Гегузина (а), демонстрирующих коалесценцию макрокапель смолы диаметром 5 см (при комнатной температуре) с конфигурациями, полученными в наших МД экспериментах (б), которые соответствуют коалесценции наноклапель Au, состоящих из 100096 атомов (температура $T = 1500$ К). Цифры под МД конфигурациями отвечают времени в нс. Время коалесценции для капель смолы составляет около 1 мин.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература:

1. Frenkel J.I. // J. Phys., USSR. 1945, V. 9. P. 385-391.
2. Ristic M.M., Milosevic S.Dj. // Sci of sintering. 2006, V. 38. P. 7-11.
3. Zachariah M.R., Carrier M.J. // J. Aerosol Sci., 1999, V.30. P. 1139-1151.
4. Samsonov V.M., Alymov M.I., Talyzin I.V., Vasilyev S.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019, V. 1352. P. 012044.
5. Самсонов В.М., Талызин И.В., Васильев С.А., Алымов М.И. // Доклады академии наук. 2019. Т. 489. № 5. С. 27-30.
6. Гегузин Я.Е. Капля. М.: Наука, 1973. 161 с.

**О РАЗМЕРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО
УГЛА РОСТА (КРИСТАЛЛИЗАЦИИ) НИТЕВИДНЫХ
НАНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Небольсин В.А., Свайкат Н., Ожогина Л.В.

Воронежский государственный технический университет, Воронеж

vcmsao13@mail.ru

Рост нитевидных нанокристаллов (ННК) полупроводников является единственным примером кристаллизации, когда в многокомпонентной системе в равновесии одновременно участвуют три фазы: твердая, жидкая и паровая. Вещество каждой фазы вблизи замкнутой линии трехфазного контакта находится под воздействием вещества двух других фаз, и поэтому его состояние отличается от состояния в объеме и от состояний вблизи границы раздела двух фаз. Наличие искривленной трехфазной границы является наиболее ярко выраженной особенностью роста ННК. Влияние кривизны поверхности ННК и капли катализатора на поверхностную энергию должно проявляться при их радиусах порядка единиц и десятых долей нанометра, что соответствует межмолекулярным расстояниям. В то же время в случае линейного натяжения влияние кривизны трехфазной границы по периметру смачивания капли проявляется при радиусах в десятки нанометров, что по порядку величины соответствует радиусу действия поверхностных сил [1].

В работе предпринята попытка обосновать, что в стационарных условиях смачивающего сценария (или моды) роста ННК [2], когда реализуется неплоская геометрия фронта кристаллизации под каплей катализатора, смещение линии пересечения границ раздела фаз пар, жидкость, кристалл (тройной линии (ТЛ)) происходит под фиксированным углом к поверхности капли катализатора – термодинамическим углом

роста (кристаллизации) φ_0 . Угол роста ННК φ_0 определяется не из геометрических соображений, а на основе физической природы процессов, происходящих в окрестности ТЛ, и обнаруживает размерную зависимость, обусловленную влиянием линейного натяжения искривленной границы раздела трех фаз. Получено выражение для размерной зависимости φ_0 и показано, что при положительной кривизне ТЛ с уменьшением радиуса ННК угол роста может и увеличиваться, и уменьшаться относительно величины термодинамического угла роста для макроскопической капли катализатора или прямой ТЛ φ_0^∞ . При положительной кривизне ТЛ линейное натяжение χ может принимать положительные и отрицательные значения. Значение χ положительно, т.е. его силовой вклад α_χ в некоторой точке А на ТЛ направлен радиально внутрь, когда $\varphi_0^\infty < \varphi_0$. Положительное линейное натяжение ($\chi > 0$) приводит к стягиванию кругового периметра смачивания капли при уменьшении радиуса и увеличению угла φ_0 по сравнению с его макроскопическим значением φ_0^∞ . В противном случае линейное натяжение отрицательно ($\chi < 0$ и вектор силы в точке А на трехфазной линии направлен радиально наружу), и при уменьшении r уменьшение φ_0 , по сравнению с φ_0^∞ , вызывает расширение кругового периметра смачивания.

На основе размерной зависимости φ_0 , обуславливающей появление в системе механизма отрицательной обратной связи, объясняется наблюдаемая радиальная периодическая неустойчивость ННК. Под влиянием линейного натяжения и действия механизма положительной обратной связи могут образоваться острые или игольчатые кристаллы.

1. Небольсин В.А. и др. О вкладе свободной энергии линейной границы раздела трех фаз в условия термодинамического равновесия капли катализатора при росте нитевидных кристаллов Si и GaP // Неорг. Матер., 2015. Т.51. №3. С.237-242.

2. Nebof'sin, V.A., Dunaev, A.I., Tatarenkov, A.F., Shmakova, S.S. Scenarios of stable Vapor-Liquid Droplet-Solid Nanowire Growth // J. Cryst. Growth. 2016. V.450. P. 207-214.

ПОЛУЧЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ НАНОПОРОШКОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТО

Синайский М.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Кирпичёв Д.Е.,

Асташов А.Г., Фадеев А.А., Литвинова И.С., Цветков Ю.В.

Институт металлургии и материаловедения РАН им А.А. Байкова, Москва, ms18@mail.ru

Перспективным направлением улучшения физико-механических характеристик металлов и сплавов является переход к композитным материалам с упрочняющей дисперсной фазой, в качестве которой могут использоваться наночастицы тугоплавких материалов.

Данная работа направлена на реализацию процессов получения в термической плазме электродугового разряда нанопорошков тугоплавких соединений металлов и их композиций, используемых для создания металломатричных нанокompозитов в виде сфероидизированных частиц в диапазоне размеров 20-50 мкм, предназначенных для создания объемных материалов и покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, в том числе для аддитивных технологий.

Синтез нанопорошков был реализован на плазмохимической установке, защищенной патентом РФ № 2311225, с использованием электродугового плазмотрона мощностью до 25 кВт в унифицированном реакторе с ограниченным струйным течением. В ходе проведения экспериментальных исследований было осуществлено получение наноразмерных порошков тугоплавких безкислородных и кислородсодержащих соединений – TiC, TiCN при взаимодействии TiCl₄ и CH₄ в потоке Ar-H₂ плазмы и N₂-H₂ плазмы соответственно; оксидных систем на основе Al₂O₃, Y₂O₃, HfO₂ и ZrO₂ при взаимодействии соответствующих металлов (Al, Zr, Y, Hf) и соединений HfC и Y₂(CH₃COO)₃ с воздушной плазмой; а также композиции Ni+TiCN при взаимодействии Ti и Ni с CH₄ в потоке N₂-H₂ плазмы.

Определено влияние основных параметров процесса, включающих состав и энтальпию плазменной струи, расход и дисперсности исходного сырья, а также технологических особенностей процесса на физико-химические свойства получаемого нанопорошка (дисперсный, фазовый и химический состав).

В процессах синтеза нанопорошков TiC и TiCN получены однофазные порошки с кубической решеткой, состоящие из наночастиц кубической формы со средним размером в диапазоне 25 – 100 нм и агрегатов на их основе. Изменение параметров синтеза позволяло получать нанопорошки с удельной поверхностью 12 – 49 м²/г. Нанопорошок

системы Ni+TiCN характеризующимся присутствием Ni, TiCN и TiC, состоящих из наночастиц кубической и округлой формы со средним размером в диапазоне 30 – 60 нм (16 – 24 м²/г).

В процессах синтеза нанопорошков оксидных двух и трехкомпонентных систем на основе Al₂O₃, Y₂O₃, HfO₂ и ZrO₂ получены многофазные порошки с наночастицами сферической формы и средним размером в диапазоне 50 – 150 нм, значительная агрегация частиц появляется лишь после термообработки. Изменение параметров синтеза позволяло получать нанопорошки с удельной поверхностью 6 – 15 м²/г. Фазовый состав оксидных композиций характеризуется присутствием как индивидуальных оксидных фаз, так и наличием совместных твёрдых растворов. Использование различного сырья практически не влияет на характер распределения элементов среди наночастиц оксидной композиции.

Проведена термохимическая обработка наноразмерных порошков оксидных систем, полученных в плазменных процессах. Выполнена коррекция фазового состава плазменного нанопорошка δ-Al₂O₃ с целью получения альфа-модификации. Показана возможность коррекции физико-химических свойств (дисперсного и фазового состава) порошков оксидных композиций.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00947-20-00 на 2020 год.

ПОВЕДЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СВОБОДНЫХ НАНОПОРОШКОВ (Sm,Er)₂Fe₁₇-(N,H), ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОМОЛА

Терёшина И.С.¹, Веселова С.В.¹, Вербецкий В.Н.¹, Каминская Т.П.¹, Горбунов Д.И.², Савченко А.Г.³

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, tereshina@physics.msu.ru

²Лаборатория высоких магнитных полей, Центр имени Гельмгольца, Дрезден, Германия, d.gorbunov@hzdr.de

³Московский государственный институт стали и сплавов, Москва, algsav@gmail.com

В редкоземельных (R) интерметаллидах на основе железа связь между редкоземельными и Fe магнитными моментами является, как правило, либо параллельной для первой половины редкоземельного ряда (Ce - Eu), либо антипараллельной для его второй половины (Gd - Tm). При

достаточно сильных магнитных полях антипараллельная связь магнитных моментов может быть нарушена. При этом индуцированные полем магнитные фазовые переходы (в виде скачков или плавного роста намагниченности), которые наблюдаются, как правило, вдоль оси легкого намагничивания, дают полную информацию о силе межподрешеточной связи. Данная работа направлена на проведение сравнительного исследования процессов намагничивания в сильных магнитных полях в азотированных и гидрированных образцах $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ с целью выяснения влияния H и N на величину молекулярного поля (т.е. поля, действующего на подрешетку R со стороны подрешетки Fe). Все образцы получены в виде порошков, с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы.

Установлено, что замена части атомов Er на Sm приводит к значительному смещению поля перехода в сторону более высоких полей для исходного соединения $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$, его гидрида $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ и нитрида $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{N}_2$. Также мы исследовали свойства нанопорошков $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{N}_2$, имеющих различную дисперсность в результате разного времени помола в шаровой мельнице. Обнаружено, что дисперсность частиц не оказывает заметного влияния на индуцированный полем спин-переориентационный фазовый переход и, как следствие, на обменное взаимодействие R-Fe в нитридах Sm-Er-Fe-N, которые в настоящее время являются привлекательными для использования в качестве постоянных магнитов.

Исследование выполнено за счет Гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00135).

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ НАНОПОРОШКОВ СИСТЕМЫ W-Ni-Fe В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

Фадеев А.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Дорофеев А.А.,

Завертяев И.Д., Синайский М.А., Пахило-Дарьял И.О., Цветков Ю.В.

Институт металлургии и материаловедения РАН им А.А. Байкова, Москва,

fadeev@imet.ac.ru

Композитные нанопорошки имеют обширные перспективы применения в различных отраслях промышленного производства и привлекают большое внимание со стороны исследователей и разработчиков новых материалов возможностью значительного повышения функциональных и эксплуатационных характеристик

получаемых материалов и изделий на их основе. Среди них особое место занимают композитные нанопорошки на основе вольфрама системы W-Ni-Fe, представляющие заметный интерес в качестве перспективных материалов при создании термоядерных установок, ракетно-космической техники, износостойких узлов и др.

Формирование композитных наночастиц системы W-Ni-Fe со структурой частиц «ядро-оболочка», где ядро - W, а оболочка - сплав Ni-Fe эффективно осуществляется в ИМЕТ РАН на уникальной научной установке синтеза нанопорошков металлов и неорганических соединений в условиях плазмохимического синтеза в термической плазме электродугового разряда в результате конденсационных процессов, происходящих в газовой фазе. Образование композитных наночастиц со средним размером менее 70 нм (Рис. 1а) осуществляется в результате последовательной конденсации паров металлов (W, Ni, Fe), полученных в результате физико-химических превращений частиц исходных соединений металлов, вводимых в плазменный поток транспортирующим газом в реакторе с ограниченным струйным течением. В процессе эволюции наночастиц от момента их образования в плазменном потоке до осаждения на водоохлаждаемые стенки реактора происходит изменение их дисперсного и химического составов в результате столкновений частиц, а также взаимодействия с реакционной газовой средой. Управление этими процессами обеспечивается за счет изменения различных параметров процесса - состава, энтальпии и скорости истечения плазменной струи, концентрации реагентов, размеров реактора.

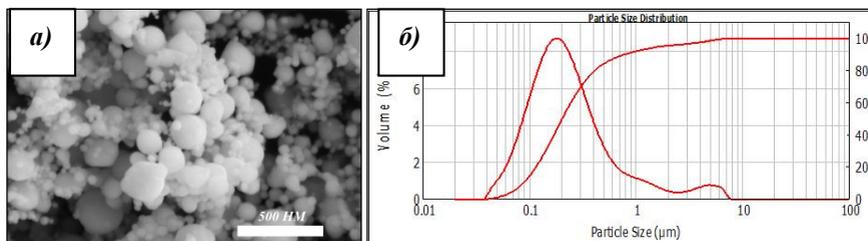


Рисунок 1 – а)- РЭМ нанопорошка системы W-Ni-Fe, полученного на установке плазмохимического синтеза ИМЕТ РАН; б)- результаты гранулометрического анализа продукта.

В ходе экспериментальных исследований процесса плазмохимического синтеза композитных нанопорошков системы W-Ni-Fe (состава ВНЖ-90), направленных на увеличение выхода продукта в нанометровом диапазоне размеров, разработано и предложено новое конструктивно-технологическое оформление плазменного процесса.

Изменение дисперсного состава, типа исходного сырья, характеристик истечения плазменной струи, типа плазмохимического реактора, а также условий смешения дисперсного сырья с плазменной струей позволили снизить содержание фракции с размером частиц более 1 мкм в продукте плазмохимического синтеза с 33 до 8 об.% (Рис. 1б) при сохранении длительного ресурса работы технологического оборудования.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00947-20-00 на 2020 год.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГРЕГАЦИИ НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ, НАПРАВЛЕННАЯ НА ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Аджиев С.З.¹, Веденяпин В.В.², Мелихов И.В.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; РУДН, Москва

sergeyadzhiev@yandex.ru

Исследования последнего времени показали, что кинетические модели процессов в наносистемах необходимо модифицировать с детализацией описания основных процессов. В связи с созданием наноматериалов нового поколения к основным процессам целесообразно отнести агрегацию при многопараметричной характеристике агрегатов. Учитывая это, нами сформулирована детализированная модель процессов в реакторе, в который вводят потоки молекул, тепловой и механической энергии, обеспечивающие объединение молекул в агрегаты, состояние каждого из которых характеризуется рядом параметров состояния. При создании этой модели использована накопленная наукой информация о следующих процессах:

1. Зарождение агрегатов в растворе или паре, введённом в реактор большого объёма.
2. Формирование функций распределения агрегатов по параметрам состояния при разных режимах работы реактора.
3. Образование агрегатов с иерархической структурой в реакторе, заполненном испаряющимся раствором.

Кинетическая модель каждого из этих процессов включена в модель агрегации в виде решений соответствующих краевых задач. При этом учтены опубликованные экспериментальные данные о кинетике агрегации, из которых следует, что зарождение агрегатов начинается с парных столкновений молекул с последующим укрупнением образовавшихся димеров, а состояние агрегатов, находящихся в реакторе, характеризует их функция распределения по десятку параметров состояния. Учтено также, что детализация описания агрегации предполагает включение в рассмотрение потенциала взаимодействия всех атомов агрегата друг с другом и с атомами окружающей его среды.

Разработанная детализированная модель агрегации, представленная в виде уравнений, описывающих кинетику изменения многопараметричной функции распределения агрегатов разного вида по параметрам состояния, была использована для описания ряда

экспериментальных данных об агрегации, опубликованных в научной литературе. Было установлено, что скорость агрегации многих нанодисперсных веществ, находящихся в потоках молекул и тепловой энергии, изменяется в соответствии с уравнением типа Фоккера–Планка. Это же уравнение применимо для описания превращения олигомеров в полимеры и агрегации микромолекул с образованием полимерных макротел. Использование же решения краевой задачи третьего вида при изучении процессов в испаряющемся растворе формвара в дихлорэтане (ДХЭ), привело к тому, что с помощью функции распределения агрегатов, обнаруженных после полного удаления ДХЭ из реактора, удалось получить информацию о кинетике агрегации, протекавшей со скоростью, недоступной для определения *in situ*.

Эти факты указывают на то, что сформулированную модель целесообразно развивать, приближая её использование к разработке компьютерной системы поиска оптимальных вариантов получения материалов нового поколения.

Литература

1. Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Волков Ю.А., Мелихов И.В. Обобщенные уравнения типа Больцмана для агрегации в газе // ЖВМиМФ. 2017. Т. 57. № 12. С. 2065–2078.

2. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. Approaches to determining the kinetics for the formation of a nano-dispersed substance from the experimental distribution functions of its nanoparticle properties // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2019. Vol. 10, № 5. P. 549–563.

НОВЫЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА И МОДИФИКАЦИИ МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ахмадуллина Н.С.¹, Скворцова Н.Н.^{2,3}, Образцова Е.А.³, Степахин В.Д.²,
Кончечков Е.М.², Каргин Ю.Ф.¹, Шишилов О.Н.⁴

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

³*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

⁴*Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова (МИРЭА), Москва*

Плазмохимические методы играют существенную роль в современном материаловедении. Нами ведутся разработки нового метода

генерации низкотемпературной плазмы (НТП, $T \leq 10^4$ К) для синтеза и модификации микро- и нанодисперсных материалов, который заключается в обработке импульсами мощного микроволнового излучения смесей порошков металл-диэлектрик [1,2,3]. Эксперименты выполняются на плазмохимическом комплексе МИГ-3, представляющем собой электрон-циклотронную систему нагрева плазмы стелларатора Л-2М с гиротроном 75/0.8 (75 ГГц, импульс 1...12 мс, мощность до 550 кВт) [2]. Импульс гиротрона посредством системы медных зеркал направляется в специально разработанный плазмохимический реактор [3]. При определенном пороговом значении энергии, поглощаемой смесью, происходит разряд, приводящий к возникновению НТП и протеканию плазмохимических процессов с образованием новых материалов и/или модификацией исходных (например, изменением распределения частиц по размерам).

Ранее было показано, что разряд может быть инициирован в смесях $Ti + B$, $Mo + B$, $W + B$, $Mo + W + B$, $Mo + BN$, $Ti + KBF_4$ и $Mg + CB_4$ в атмосфере воздуха и азота [1,2,3]. Температура поверхности порошка на стадии пробоя составляет от 2000 до 5000 К, газовой фазы до 10000 К [3]. Основными продуктами являются оксиды металлов и бора, бориды металлов и, в некоторых случаях, нитрид бора. Пороги по энергии для инициации разряда составляют 1.0-2.5 кДж/г реакционной смеси. Предметом текущих исследований являются системы Al/Al_2O_3 с добавкой соединений-источников водорода ($C_2B_{10}H_{12}$) и азота (меламин). Введение источников водорода позволяет повысить выход продуктов процесса, в то время как азотсодержащие соединения способствуют протеканию процессов азотирования, что позволило, в частности, синтезировать материалы, содержащие оксонитридные фазы $Al_{11}O_{15}N$ и $Al_{27}O_{39}N$ [4]. Частицы этих материалов, очевидно, состоят из Al_2O_3 , поверхность которого подвергается азотированию. Кроме того, в системе отмечено изменение распределения по размерам частиц Al – оно становится более узким, а среднее значение несколько повышается.

В ходе последних экспериментов для смесей Al /меламин было показано, что, во-первых, разряд может быть легко инициирован в смесях металл-органическое вещество и, во-вторых, что пороговое значение энергии для инициации разряда демонстрирует линейную зависимость от объемной доли металла в смеси в достаточно широком диапазоне (~10-30%). В то же время эффективность процесса азотирования оказывается недостаточной для образования нитридных фаз в идентифицируемых количествах – по всей видимости, требуется наличие источника водорода (напр., $C_2B_{10}H_{12}$), т.е. процесс азотирования протекает с участием азотводородных соединений (NH_3 , N_2H_4 и т.п.) и является восстановительным.

Авторы выражают благодарность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку работы (проект № 18-33-01097).

Ссылки:

1. Batanov G.M., Belousov V.I., Bondar' Yu.F., et al. // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39. Is. 13. P. 1088–1095.
2. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D., et al. // J. Nanophoton. 2016. V.10 (1). 012520.
3. Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., et. al. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2013. V. 8. P. 58–66.
4. Akhmadullina N.S., Skvortova N.N., Obratsova E.A., et al. // Chem. Phys. 2019. V. 516. P. 63–70.

ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ C₃₂

Барбин Н.М.¹, Якупова Л.В.¹, Терентьев Д.И.¹, Алексеев С.Г.²

¹Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург

²Уральский НИИ ВДПО, Екатеринбург

NMBarbin@mail.ru

Знание температуры устойчивости углеродных наночастиц необходимо как для разработки технологий производства и очистки углеродных наночастиц, так и для их применения [1].

В работе методом термодинамического моделирования изучено нагревание углеродных наночастиц C₃₂ в атмосфере азота при давлении 10⁵ Па.

Термодинамическое моделирование заключается в термодинамическом анализе равновесного состояния системы в целом [2]. В расчетах использован программный комплекс TERRA, представляющий собой этап дальнейшего развития пакета программ ASTRA. Расчеты состава фаз и характеристик проводятся с использованием справочной базы данных [3-6].

При расчете использованы термодинамические параметры конденсированных углеродных наночастиц C₃₂ и газообразных C, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₂₈, C₃₂, CN, CN₂, N₂C, NCN, C₂N, CNC, CCN, C₂N₂, C₄N, C₅N. Температурный интервал от 273 до 3373 К, давление 0,1 МПа. Соотношение углерода к азоту – 1:2.

В температурном интервале от 273 до 473К содержание конденсированного углерода C₃₂ в системе C₃₂-N составляет 100%. В

интервале температур от 473 до 773К наблюдается исчезновение конденсированной фазы с образованием паров C_{32} . Начиная с 773К весь углерод находится в газообразной фазе. В промежутке 773-873К происходит рост количества паров C_{32} от 50% до 100% и при повышении температуры от 873 до 1783К остается неизменным. В температурном интервале от 1783 до 2673К содержание пара C_{32} уменьшается и составляет 93%. Это вызвано появлением паров C_{28}, C_4N, C_5N .

Содержание пара C_{32} в диапазоне температур 2673-3073К резко уменьшается и к концу данного температурного промежутка составляет 15%. С повышением температуры до 2873 и выше выявлено образование данного списка элементов: $C_3, C_5, C_{32}, CN, C_2N, CNC, C_2N_2, C_4N, C_5N$.

Дальнейшее повышение температуры приводит к линейному уменьшению содержания паров C_{32} . При температуре 3223К пары C_{32} обнулены, а процентное содержание имеющихся паров следующее: 47% - $C_5N, 19\% - C_3, 13\% - C_5, 8\% - CNC, 5\% - C_4N, 3\% - C_2N_2, 3\% - CN, 2\% - C_2N$.

1. Бородин В.И., Трухачева В.А. Термическая устойчивость фуллеренов // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. №14. С. 53-55.

2. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. – М.: Металлургия. 1994. 352 с.

3. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Термодинамические свойства некоторых газообразных фуллеренов // Журнал физической химии. 2002. Т. 76. №2. С. 217-220.

4. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Оценка стандартной энтальпии образования (СЭО) метастабильных конденсированных «малых» самоассоциатов углерода и некоторых металлов // Доклады академии наук. 2003. Т. 392. №5. С. 653-656.

5. Barbin N.M., Dan V.P., Terentiev D.I., Alekseev S.G. Thermodynamic modeling of the Behavior of Higher Fullerenes C_{84} when Heated in an inert Atmosphere. - Smart Nanocomposites. 2016. V. 7. №2. p. 251-253.

6. Барбин Н.М., Дан В.П., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Моделирование поведения малого углеродного кластера C_3 в процессе нагревания в среде аргона// Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2016.Т.7. №4.С.8-13

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ TiO_2 - MoO_3 ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Боборико Н.Е.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

boboriko@bsu.by

Диоксид титана широко используется для каталитических и сенсорных приложений благодаря своей высокой термической стабильности. Введение различных оксидов металлов (V_2O_5 , CeO_2 , Al_2O_3) в диоксид титана позволяет модифицировать его структурные, морфологические и каталитические характеристики. Триоксид молибдена широко используется для изменения каталитических свойств TiO_2 , поскольку композиты TiO_2 - MoO_3 сочетают в себе высокую каталитическую активность в процессах окисления, характерную для MoO_3 , и термическую стабильность диоксида титана, что позволяет их активно использовать в гетерогенном катализе. В основе процессов детектирования горючих газов (CH_4 , H_2 , CO и др.) химическими оксидными газовыми сенсорами лежит гетерогенная реакция каталитического окисления молекул газа оксидным материалом, следовательно, высокая каталитическая активность композитов TiO_2 - MoO_3 открывает широкие возможности их использования в качестве эффективных газочувствительных материалов.

Композиты TiO_2 - MoO_3 с содержанием триоксида молибдена 0,1 – 10 мол.% были получены введением навески гидрата парамолибдата аммония $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ с последующей ультразвуковой обработкой в золь гидрата диоксида титана $TiO_2 \cdot nH_2O$, синтезированный с использованием раствора тетраоксида титана в соляной кислоте в качестве прекурсора, водного раствора аммиака в качестве осадителя и концентрированной азотной кислоты в качестве стабилизатора. Установлено, что фазовый состав композитов и средний размер частиц контролируется мольным соотношением оксидов в композите и температурой прогрева композита. Предложенный способ синтеза с последующей температурной обработкой при 850 °C в течение 2 часов позволяет получить композиты на основе рутила с высокодисперсной кристаллической фазой α - MoO_3 со средним размером частиц оксида молибдена 10 нм, обладающие высокой газочувствительной активностью по отношению к водороду. Показано, что процесс детектирования водорода композитами TiO_2 - MoO_3 включает адсорбцию молекул H_2 на парамагнитные поверхностные дырочные центры с последующим окислением H_2 с участием кислорода решетки MoO_3 и адсорбированных частиц O_2 . Установлено, что выходной сигнал

сенсоров на основе композитов $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ с исследованным мольным соотношением оксидов максимален при содержании MoO_3 1 мол. %.

Снижение выходного сигнала с увеличением содержания MoO_3 в композите более 1 мол. % коррелирует как с увеличением среднего размера частиц оксида молибдена до 75 нм, так и с результатами моделирования взаимодействия молекул водорода с атомными плоскостями совокупности {100} диоксида титана и триоксида молибдена методом молекулярной динамики. Анализ локализации молекул водорода на поверхности диоксида титана и триоксида молибдена, а также энергии взаимодействия молекул с различными атомными плоскостями, исходя из вероятности расположения молекулы на определенном расстоянии от поверхности, указывает на возможность локализации молекул водорода на поверхности диоксида титана над цепочками ионов титана «углубленных» между цепочками ионов кислорода, тогда как локализация H_2 на поверхности оксида молибдена значительно менее выражена. Следовательно, для того, чтобы композит $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ обладал высокими газочувствительными свойствами по отношению к водороду, необходимо присутствие в его структуре высокодисперсного наноразмерного оксида молибдена, обеспечивающего эффективное окисление молекул H_2 , с сохранением доступной для молекул водорода поверхности диоксида титана для эффективной адсорбции.

Работа частично поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (договор №Х19М-046).

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦИРКОНО-АЛЮМО-ИТТЕРБИЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Волченкова В.А., Казенас Е.К., Андреева Н.А., Овчинникова О.А.,
Пенкина Т.Н., Родионова С.К., Смирнова В.Б., Фомина А.А.,
Подзорова Л.И., Ильичева А.А.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва

volch.v.a@mail.ru

Определение наличия примесных, канцерогенных и вредных элементов в синтезируемых материалах является необходимым этапом для установления области применения, в особенности, для медицины. Разработанны методики атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной

плазмой (АЭС с ИСП) определения примесей в новых цирконо-алюмо-иттербиевых керамических материалах медицинского назначения позволяющие экспрессно определять большой спектр элементов: Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cu, Cr, Fe, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sn, Ti, V, Y, Zn в широком диапазоне концентраций от $1 \cdot 10^{-3}$ до $n\%$, с хорошими метрологическими характеристиками без предварительного отделения матрицы и без использования стандартных образцов. Относительное стандартное отклонение (S_r) составляет 0,05-0,005 при содержании элементов от 1 до 20% и не превышает 0,20 при содержании элементов от 0,001 до 0,1%. В таблице представлены результаты определения содержаний элементов в керамических образцах. Из-за отсутствия стандартных образцов для подтверждения правильности полученных результатов определения элементов проводили их сравнение с данными масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС с ИСП) или атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС).

Таблица. Результаты определения содержаний элементов в порошках цирконо-алюмо-иттербиевой керамики, полученные различными методами ($n = 10$; $P = 0,95$)

Определяемый элемент	Образец №1				Образец №2			
	АЭС с ИСП		Другие методы анализа		АЭС с ИСП		Другие методы анализа	
	Масс. сод., %	S_r	Масс. сод., %	S_r	Масс. сод., %	S_r	Масс. сод., %	S_r
Al	34,9	0,007	34,7	0,007	23,7	0,007	23,5	0,007
Zr	24,5	0,005	24,6	0,005	34,9	0,005	34,7	0,005
Ce	<0,001	0,01	<0,001	0,01	8,17	0,01	8,21	0,01
Y	0,0031	0,04	0,0034	0,04	0,018	0,04	0,018	0,04
Yb	5,15	0,10	5,19	0,10	0,0075	0,10	0,0071	0,10
Hf	0,11	0,05	0,12	0,05	0,30	0,05	0,29	0,05
As	<0,001	0,15	<0,001	0,15	<0,001	0,15	<0,001	0,15
Ba	0,047	0,10	0,049	0,10	0,051	0,10	0,050	0,10
Be	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13
Bi	<0,001	0,15	<0,001	0,15	<0,001	0,15	<0,001	0,15
Ca	0,0040	0,08	0,0044	0,08	0,20	0,08	0,21	0,08
Cd	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13
Co	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13	<0,001	0,13
Cu	0,0043	0,13	0,0040	0,13	0,030	0,13	0,032	0,13
Fe	0,011	0,13	0,010	0,13	0,021	0,13	0,022	0,13

Работа выполнена по Государственному заданию 075-00947-20-00

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕОЛИТА ZSM-5 ПУТЕМ ОБРАБОТКИ В ЩЕЛОЧИ И КИСЛОТЕ

Кузнецова А.В., Латыпова А.Р.
ФГБОУ ВО «ИГХТУ», Иваново
kuznetsova.anna37@gmail.com

Наличие в структуре цеолитов микропор делают его перспективным носителем для промышленных катализаторов. Однако лимитирующей стадией в химическом превращении является диффузия реагентов в порах цеолита, что делает невозможным использование всего кристалла цеолита в целом. Эту проблему можно решить уменьшением диффузионного фактора по средствам увеличения размера и количества пор в материале. Подобного эффекта можно добиться благодаря обработке ZSM-5 в растворах щелочи или кислоты.

В работе была произведена модификация поверхности цеолита 3 способами: 1) обработка 0.2 М раствором NaOH, 2) последовательная обработка 0.2 М раствором NaOH, а затем 0.2 М раствором NH_4NO_3 , 3) обработка 0.2 М раствором HCl.

Обработку цеолита ZSM-5 водным раствором гидроксида натрия проводили при постоянном перемешивании на магнитной мешалке при температуре 75°C в течение 4 часов. После этого материал отфильтровывали, суспензировали в свежем растворе гидроксида натрия и повторяли процедуру модификации по описанной ранее методике. Далее отфильтрованный и промытый цеолит сушили на воздухе.

Последовательная обработка в щелочи и нитрате аммония происходила в два этапа. Первым этапом проходила модификация щелочью по методике, приведенной выше. Вторым этапом была обработка материала водным раствором 0.2 М NH_4NO_3 при температуре 75 градусов в течение 3 часов. После материал отфильтровывали, снова суспензировали в водном растворе нитрата аммония и процесс повторялся.

Также цеолит был модифицирован в ходе его обработки водным раствором 0.2 М HCl. Процесс проводили по схожей методике. Суспензию цеолита в кислоте выдерживали при 75°C в течение 4 часов также со сменой раствора кислоты.

На основе каждого из модифицированных образцов были синтезированы 5 % палладиевые нанесенные катализаторы. Палладиевые катализаторы получали путем добавления по каплям водного раствора H_2PdCl_4 к порошкообразному носителю, суспензированному в водном растворе Na_2CO_3 . Суспензию перемешивали в течение 3 часов при 40 °C. Далее катализатор отфильтровывали, тщательно промывали дистиллированной водой и сушили при 150 °C на воздухе. Катализатор

активировали в потоке водорода при 250 °С в течение 1 часа. Полученные носители и палладиевые катализаторы были исследованы с использованием таких методов, как просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения, ИК-Фурье спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная и рентгенофлуоресцентная спектроскопия, рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ, низкотемпературная адсорбция-десорбция азота, температурно-программируемая десорбция аммиака и температурно-программируемое восстановление.

Активность и стабильность полученных катализаторов оценивали в ходе жидкофазного гидрирования 4-нитроанилина в водном растворе 2-пропанола в условиях повторных циклов на одной навеске катализатора (5 циклов). Процесс гидрирования 4-нитроанилина проводили при атмосферном давлении водорода и при температуре 25 °С. Кинетические закономерности протекания реакции контролировались посредством газовой хроматографии.

Согласно полученным данным кинетических экспериментов было установлено, что наиболее активным является катализатор, синтезированный на цеолите, обработанном только водным раствором 0.2 М NaOH. При этом данный катализатор также оказался самым стабильным по сравнению с остальными полученными катализаторами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10157).

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ ОРГАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КРЕМНЕЗЕМОВ

Лебедев М.Д., Латыпова А.Р., Румянцев Е. В., Долуда В.Ю.

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
Иваново*

MaximLebedev37@gmail.com

Одним из важнейших направлений синтеза новых материалов является получение наночастиц. На их основе создаются функциональные материалы с заданными структурными и морфологическими параметрами. Такие материалы перспективны для использования их в качестве сорбентов, систем точечной доставки лекарственных препаратов, а также в катализе.

В настоящей работе был проведен синтез субмикронного модифицированного кремнезёма с последующим наращиванием на его

поверхности металлических наночастиц палладия. Для получения матрицы модифицированного диоксида кремния, использовался золь-гель процесс с использованием алкоксисиланов. Полученные материалы содержали amino, тиол, метил и фенил функциональные группы. Функционализация проводилась методом соконденсации с соответствующими алкоксисиланами. Контроль морфологических характеристик в ходе синтеза, был осуществлен за счет введения ПАВ. В растворе происходит самоорганизация мицелл, которые являются структурообразующими элементами для растущей матрицы кремнезёма. Отличительной чертой предлагаемого метода является проведение всех стадий процесса в одном стакане (one-pot) и использование ПАВ – додецилдиметиламин-N-оксида, проявляющего мультифункциональное действие в данном синтезе. Функциональные органические группы обеспечивают взаимодействие с ионами палладия и способствуют росту металлических наночастиц на поверхности кремнезёма. Преимущества данного подхода заключены в простоте проведения синтеза частиц необходимого состава.

Планируется что данные, представленные в настоящей работе, будут в дальнейшем использованы для получения катализаторов для тонкого органического синтеза. Была проведена экспертиза на модельной реакции гидрирования 4-нитроанилина, которая показала его превосходство по сравнению с углерод-нанесенными палладиевыми аналогами, широко применяемыми в процессах гидрогенизации.

Авторы благодарят РФФ за финансовую поддержку исследований (проект № 18-79-10157)

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРФОЛОГИЕЙ И РАЗМЕРНОСТЬЮ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПИРОЛИЗОМ СМЕСИ МОНОСИЛАНА И АЦЕТИЛЕНА

**Новиков Н.Н.¹, Ершов И.А.¹, Пустовой В.И.¹, Красовский В.И.¹,
Исхакова Л.Д.¹, Чайков Л.Л.²**

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

²*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва*

Целью данной работы являлся синтез методом лазерно-индуцированного пиролиза наночастиц карбида кремния (SiC), которые в дальнейшем будут использованы как основа для изучения однофотонной люминесценции и изучения спиновых состояний, и определение их размера и состава.

Получение SiC пиролизом газообразных прекурсоров с инициацией реакции излучением CO₂ лазера в проточном реакторе было впервые предложено в работе [1] в 1979 г. Путём изменения параметров реакции, таких как мощность излучения, состав и скорости потоков газов, давление в камере, возможно получение наночастиц с заданными размерами, кристалличностью и состоянием поверхности [2, 3]. Также возможно получение легированных наночастиц путём введения дополнительных газов в область реакции.

Реакция протекала при соотношении C/Si 1,26 - 2. Плотность мощности излучения в области перетяжки составляла от 1 до 5 KW/cm². Давление в реакторе поддерживалось на уровне порядка P₀=600 torr. Все полученные образцы представляли собой мелкодисперсные порошки, состоящие из агрегатов наноразмерных частиц (Рис. 1). Частицы 8H-SiC, идентифицированные методом дифракции электронов и рентгенофазовым анализом, имеют размеры от 5 до 15 nm.

Распределение частиц по гидродинамическим радиусам измерялся методом динамического рассеяния света (ДРС). Результаты серии измерений показали средние гидродинамические радиусы частиц порядка 6 ± 2 и 63 ± 20 nm, а ряде случаев наблюдались также частицы размером порядка 800 nm. Меньшее значение радиуса соответствует размерам одиночных наночастиц, большие значения соответствуют агломератам.

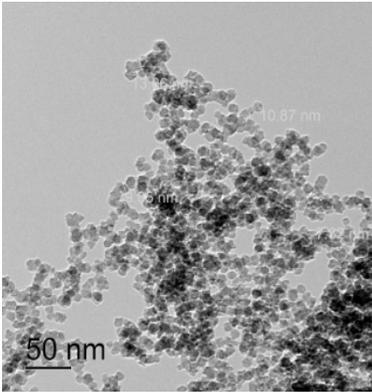


Рисунок 1 – ТЕМ-изображение образца

Результаты измерения спектров ЭПР и проведённые расчеты показали, что значение g-фактора отношения $2,0028 \pm 0,0005$, что соответствует оборванным связям углерода. Левая часть спектра имеет большую полуширину (FWHM), чем правая, т.е. наблюдается асимметрия, что может быть обусловлено еще одним сигналом ЭПР от оборванных связей кремния

($g=2,0050$), который слабее по интенсивности, перекрывается с мощным сигналом от оборванных связей углерода.

Методом лазерного пиролиза смеси моносилана и ацетилена при соотношении C/Si порядка 1,26 – 2. были синтезированы наночастицы 8H-SiC с оборванными углеродными связями и была проведена их характеристика.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН I.7P и грантом РФФИ 18-02-00786.

1. Haggerty J.S., Cannon W.R. Massachusetts Institute of Technology. Sinterable powders from laser driven reactions. 1979.
2. Shubenkov A.N.[и др.]. Modification of silicon nanoparticle surface with gold or silver attenuates its biocompatibility in vitro // Cell and Tissue Biology. 2014. № 5 (8). С. 384–388.
3. Vladimirov A.[и др.]. Synthesis of luminescent Si Nanoparticles using the laser-induced pyrolysis // Laser Physics. 2011. № 4 (21). С. 830–835.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И РАСЧЕТНЫЙ ПОДХОДЫ К ВАРЬИРОВАНИЮ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИАПАТИТА

Садецкая А.В., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Осмоловская О.М.,
Вознесенский М.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
anastasia.sadetskaya@gmail.com*

Гидроксиапатит ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_2$, НАр) представляет собой основной неорганический компонент костной ткани человека, обладающий остеоиндуктивной и остеокондуктивной функциями, а также способный продуцировать образование коллагена, что делает его востребованным материалом для инженерии костной ткани и косметологии. В последнее время особое внимание приковано к приданию НАр дополнительной функциональности – например, способности проводить электрический ток (для стимулирования роста клеток) или быть окрашенным (для производства мультифункциональных пигментов), что может быть достигнуто за счет изменения электронной структуры твердого тела путем допирования. Однако, в настоящее время в литературе отсутствуют и однозначное мнение о том, как корректно характеризовать эти изменения, и понимание того, как проводить допирование для получения объектов с заданными свойствами.

В настоящей работе в качестве допантов использовали двухзарядные ионы 3d элементов (Ni, Co, Cu). Синтез наночастиц проводили гидротермальным методом, фазовый состав, размер и форму наночастиц определяли с помощью методов РФА, Рамановской спектроскопии, ПЭМ и БЭТ. Состав поверхности наночастиц и наличие связей допант-кислород изучали методом ИК-спектроскопии. Значения оптической запрещенной зоны были рассчитаны из спектров поглощения

и использовались для верификации данных квантово-химических расчетов. Квантово-химические расчеты проводили при помощи программного комплекса Abinit в рамках метода функционала плотности (DFT) в приближениях локальной плотности (LDA) и обобщенного градиента (GGA) с использованием стандартного и оригинального подходов.

Было показано, что синтезированные наночастицы имеют размер около 26 нм в толщину и 54 нм в длину. Полученные наночастицы формируют следующий размерный ряд (по уменьшению размеров) – HAp , Co-HAp , Ni-HAp , Cu-HAp , что связано с особенностями химического поведения допантов в исходной реакционной среде. Для всех допированных наночастиц зафиксировано изменение параметров элементарной ячейки, а также уменьшение размеров кристаллитов относительно недопированного HAp , что указывает на успешность допирования. Установлено, что введение допанта позволяет уменьшить величину запрещенной зоны с 4.6 до 2.5 эВ.

Показано, что из двух неэквивалентных положений атома кальция в решетке наиболее выгодным для замещения атомами допантов является положение, обозначаемое в литературе Ca_2 . Применение оригинального подхода совместно с функционалом GGA позволяет добиться соответствия расчетного и экспериментального значения ширины запрещенной зоны. По данным парциальных плотностей состояний (вклады в плотность состояний отдельных атомов) показано, что введение допанта приводит к появлению дополнительных уровней в запрещенной зоне. Установлено, что уровень Ферми синтезированных образцов линейно зависит от электроотрицательности допанта, расчет плотностей состояний по высокосимметричным кристаллографическим направлениям позволил сделать вывод о том, что полученные материалы представляют собой прямозонные полупроводники.

Таким образом, впервые проведено полное квантово-химическое описание допированных наночастиц гидроксиапатита и показана возможность регулирования положения уровня Ферми и ширины запрещенной зоны путем выбора допанта по его электроотрицательности.

Исследования были проведены на базе Ресурсных центров Научного парка СПбГУ: Рентгенодифракционные методы исследования, Методы анализа состава вещества, Оптические и лазерные методы исследования, Нанофотоника.

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГРАФИТА В ПРОЦЕССЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Фазлитдинова А.Г., Тюменцев В.А.

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск
fazlitdinovaag@mail.ru

Особенности перехода «рентгеноаморфного» углеродного материала в графит при высокотемпературной обработке, а также аморфизации структуры графита в процессе нейтронного облучения или диспергирования были предметом многочисленных исследований. Получены данные по монотонному росту размеров областей когерентного рассеяния и уменьшению межслоевого расстояния d_{002} по мере повышения температуры или увеличения продолжительности изотермической обработки углеродных материалов. Вместе с тем в ряде работ показано, что по мере повышения температуры или продолжительности высокотемпературной обработки изменение d_{002} может развиваться ступенчато. В процессе диспергирования или нейтронного облучения графита на зависимостях увеличения межслоевого расстояния от условий обработки также наблюдаются плато при значениях, равных 3,36, 3,37, 3,40, 3,425 и 3,44 Å [1] и ~3,38, 3,40, 3,425, 3,44 и 3,55/3,68 Å [2]. Авторы полагают, что такое изменение d_{002} может быть обусловлено формированием метастабильных углеродных фаз, отличающихся значением межслоевого расстояния. Одновременное присутствие нескольких таких фаз в исследуемых углеродных материалах обуславливает асимметрию профиля экспериментально наблюдаемых дифракционных максимумов 002 и 004.

В работе методом рентгеноструктурного анализа изучено изменение тонкой структуры природного графита в процессе длительного (до 31 часа) диспергирования в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 6 в атмосфере воздуха. Дифракционные исследования проводили на фильтрованным $\text{CuK}\alpha$ излучении (дифрактометр D8 ADVANCE, Bruker). По мере продолжения диспергирования увеличивается асимметрия дифракционных максимумов 002, 004 и интегральная ширина, центр тяжести смещается в сторону меньших углов. Этот эффект обусловлен формированием дисперсных фаз, параметр структуры которых отличается от таковой графита. Разделение асимметричных максимумов 002 на минимальное количество симметричных, описываемых функцией Войта, проводили используя Origin. В таблице приведены значения межплоскостных расстояний компонент, сформировавшихся в процессе длительного диспергирования графита:

Продолжительность диспергирования, час	$d_1, \text{Å}$	$d_2, \text{Å}$	$d_3, \text{Å}$	$d_4, \text{Å}$	$d_5, \text{Å}$
0-1,5	3,37	3,40			
1,5-7	3,37		3,425		
7-10	3,37	3,40			3,50
10-15	3,38		3,425		3,55
15-31	3,39			3,44	3,60

Таким образом, в процессе диспергирования в углеродном материале формируются метастабильные состояния, значения межплоскостных расстояний которых согласуются с литературными данными.

1. Lachter J., Bragg R.M. Interstitials in graphite and disordered carbons. // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33. N. 12. P. 8903-8905.

2. Aladekomo J.B., Bragg R.H. Structural transformations induced in graphite by grinding: Analysis of 002 x-ray diffraction line profiles. // Carbon. 1990. V. 28. N 6. P. 897- 906.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА ПУТЕМ СОЗДАНИЯ СТРУКТУР $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SnO}_2$

Черепанова Н.Д., Абдуллин И.Р., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Вознесенский М.А., Осмоловская О.М.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
n-cherepanova27@yandex.ru

Наночастицы магнетита являются материалом, находящим применение в различных областях. Однако, из-за своего состава он подвержен воздействию агрессивной среды, что может отрицательно сказываться на агрегативной устойчивости и магнитных свойствах. В качестве защитных покрытий оптимально использовать неорганические непрерывные оболочки, которые, однако, могут влиять на характеристики ядра наночастицы. Поэтому важным является не только разработка метода получения оболочек различной толщины, но и исследование закономерностей их влияния на магнитные свойства с дальнейшей возможностью прогнозирования и регулирования функциональных свойств синтезируемых материалов. В данной работе в качестве оболочки предложено использовать диоксид олова, который в целом инертен, легко может быть получен путем гидролиза (что позволяет предположить, что

толщину оболочки будет легко регулировать), а также содержит на поверхности функциональные гидроксильные группы, которые легко поддаются модификации.

Синтез проводился двумя методами – осаждением и гидротермальным, содержание SnO_2 варьировали от 5 до 20 мол%. Фазовый состав, форму и размер характеризовали методами РФА, ПЭМ, БЭТ. Состав поверхности и наличие оболочки исследовали методами ИК спектроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, путем определения дзета-потенциала. Стабильность полученного покрытия изучали методом ТГА-ДСК. Для характеристики ядра использовали метод Мессбауэровской спектроскопии. Для всех образцов были исследованы зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля, а также сняты кривые ZFC-FC и рассчитаны температуры блокировки и константы анизотропии. Для наиболее полного описания магнитных характеристик полученных образцов было проведено компьютерное моделирование кривых ZFC-FC с учетом толщины оболочки и константы анизотропии. Полученные зависимости были проанализированы на предмет определения вкладов диполь-дипольного взаимодействия магнитных моментов и анизотропии частицы на температуру блокировки.

Было показано, что толщина формирующейся оболочки не превышает 10 нм, её размер и степень кристалличности зависят от условий проведения процесса. Согласно данным ТГА-ДСК, полученные образцы Fe_3O_4 стабильны во всём температурном интервале измерений вплоть до 800°C , что свидетельствует об однородном покрытии ядра оболочкой. Экспериментальным и расчетным методами показано, что температура блокировки в полученных образцах зависит от толщины оболочки и метода ее получения.

Таким образом, была показана возможность полноценной защиты поверхности магнетита без потери его функциональности, а также регулирования магнитных характеристик материала путем изменения параметров оболочки.

С использованием оптимального с точки зрения магнитных характеристик и толщины покрытия образца была изучена возможность модификации поверхности полученных наночастиц с помощью полиэтиленгликоля (ПЭГ) с различными молекулярными массами (ПЭГ-300 и ПЭГ-3000). Успешность модификации была подтверждена методом ИК-спектроскопии и уменьшением величины максимальной намагниченности.

Исследования были проведены на базе Научного парка СПбГУ: Рентгенодифракционные методы исследования, Методы анализа состава

вещества, Инновационные технологии композитных наноматериалов, Оптические и лазерные методы исследования, Вычислительный центр.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-03-01066.

СЕКЦИЯ 2

***Наноструктурные пленки и
покрытия в конструкционных и
функциональных материалах***

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА C_2H_4 И N_2 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПЛЁНОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ КАТОДА $TaSi_2-ZrSiB$

Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Сытченко, А.Д., Бондарев А.В.,

Курбаткина В.В., Пацера Е.И., Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, kiryukhantsev-korneev@yandex.ru*

Целью данного исследования является установление влияния расхода газовой среды N_2 и C_2H_4 при магнетронном распылении мишени $TaSi_2-ZrSiB$ на механические и трибологические свойства, а также жаростойкость покрытий.

Покрытия были получены с помощью метода магнетронного напыления. Распыляемая керамическая мишень $TaZrSiB$ (70,8% Ta, 18,6%Si, 7,4 %Zr, 2,9%B) диаметром 120 мм и толщиной 6 мм была получена по технологии горячего прессования. В качестве порошков использовались измельчённые продукты взаимодействия порошков Ta, Zr, Si и B в ходе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В качестве подложек применялись пластины оксида алюминия марки ВК-100-1 (поликор). Перед нанесением покрытия подложки подвергались ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте на установке УЗДН-2Т в течение 5 мин и очистке непосредственно в вакууме с помощью ионного источника щелевого типа (ионы Ar^+ , 2 кэВ) в течение 20 минут. В качестве рабочих газов использовались Ar (99,9995%), N_2 (99,999%) и C_2H_4 (99,95%). Расход реакционных газов варьировался от 0 до 40 мл/мин. Мощность на магнетроне поддерживались на уровне 1 кВт, рабочее давление 0,1-0,2 Па, время осаждения 40 минут.

Морфологию, элементный и фазовый состав покрытий определяли с помощью растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии на микроскопе Hitachi S-3400N с приставкой Noran 7 Thermo, рентгенофазового анализа (РФА) на приборе AXS D8 ADVANCE Bruker, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе Axis Supra Instrument и с помощью оптического эмиссионного спектрометра тлеющего разряда Profiler-2 (Horiba JY). Механические свойства покрытий определяли с помощью нанотвердомера Nano Hardness Tester (CSM Instruments), оснащенного индентором Берковича, при нагрузке 2 мН. Испытания по определению коэффициента трения покрытий проводили на трибометре CSM Instruments по схеме «стержень-

диск» при нагрузке 1 Н. Для оценки жаростойкости покрытий проводились их отжиги на воздухе при температурах 1000-1500⁰С с выдержками 10-60 мин.

Покрытия Ta-Zr-Si-B-N и Ta-Zr-Si-B-C, согласно данным РФА, обладали рентгеноаморфной структурой. При равных концентрациях С и N, образец, полученный в С₂Н₄, показал твердость на уровне 22 ГПа и упругое восстановление 73 %, в то время как твердость и упругое восстановление покрытия Ta-Zr-Si-B-N составили 15 ГПа и 70 % соответственно. Увеличение концентрации азота положительно сказывалось на трибологических свойствах покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-19-00117.

Приглашенный доклад

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕНИЯ

Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

av-mak@yandex.ru

В представленном обзорном докладе будет рассмотрена одна из наиболее актуальных и практически значимых проблем физического металловедения, связанная с изучением и использованием нанокристаллических структур трения (НКСТ). Формирование НКСТ в тонких поверхностных слоях металлов и сплавов происходит естественным путем и обусловлено спецификой напряженного состояния, возникающего в зоне фрикционного контакта. Микрообъемы металла поверхностного слоя трущихся тел подвергаются воздействию внешних контактных сдвиговых и сжимающих напряжений. Это создает условия для реализации в слое толщиной 1-10 мкм весьма больших величин пластической деформации, которые достижимы лишь в условиях действия ротационного механизма пластичности, который и приводит к образованию НКСТ. Прочностные характеристики (микротвердость, сопротивление сдвигу) и трибологические свойства (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) НКСТ определяются уровнем их дисперсности, условиями перемещения дислокаций через тело нанозерен, присутствием элементов внедрения (углерод, азот), наличием дисперсных упрочняющих фаз (карбидов, интерметаллидов), магнитным состоянием аустенита, а также воздействием воздушной среды, вызывающим разрушение НКСТ вследствие их охрупчивания кислородом.

Неоспоримая научная и практическая значимость изучения НКСТ обусловлена не только их определяющей ролью в формировании трибологических свойств сталей и сплавов. Заложенная в самой природе трения возможность получения НКСТ может быть эффективно использована для целенаправленного наноструктурирования поверхностных слоев изделий с целью увеличения их сопротивления изнашиванию, коррозии, механическим нагрузкам и высоким температурам. Это достигается применением относительно простых в реализации фрикционных и других поверхностных деформационных обработок, а также комбинированных способов. Будут представлены современные способы поверхностного наноструктурирования (фрикционные обработки, предложенная авторами ударно-фрикционная обработка – патент РФ №2643289, 2018 г. и др.); рассмотрено использование НКСТ в комбинированных деформационно-термических обработках сталей с мартенситными и аустенитными структурами, при формировании покрытий, а также в деформационно-химико-термических обработках для активизации процессов низкотемпературного азотирования, цементации, оксидирования [1, 2]. Ускоренной диффузии элементов по кристаллическим дефектам НКСТ способствует их высокий уровень дефектности – большая протяженность границ зерен и субзерен, экстремальная плотность дислокаций, дисклинаций и точечных дефектов (вакансий и внедренных атомов).

Проведенный в обзоре всесторонний анализ НКСТ, выполненный на основе результатов многолетних исследований авторов, не только послужит развитию на современном уровне металлофизических основ трения и изнашивания металлических сплавов, но и создаст предпосылки для совершенствования уже известных и появления новых методов деформационного и комбинированного упрочнения поверхности с элементами фрикционной нанокристаллизации.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-48-660065_p_a.

Литература:

1. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Металлофизические основы наноструктурирующей фрикционной обработки сталей // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. № 3. С. 327-336.
2. Макаров А.В., Саврай Р.А., Скорынина П.А., Волкова Е.Г. Развитие методов поверхностного деформационного наноструктурирования сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. №1. С. 62-69.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, СОЗДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЗРАЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ ДИФфуЗИИ АКЦЕПТОРНОЙ И ДОНОРНОЙ ПРИМЕСИ

Аракелян А.А., Овсепян Р.К., Агамалян Н.Р., Кафадарян Е.А.,
Мнацаканян Г.Г., Петросян С.И.

Российско-Армянский университет, Ереван, Республика Армения

ariga@inbox.ru

Разработана методика локального диффузного легирования определенных участков пленки ZnO донорной (Ga) и акцепторной (Li) примесями для получения пленок с топологическим рисунком легирующей примеси. Исследованы процесс диффузии, электрофизические и фотоэлектрические свойства диффузно-легированных образцов планарных МПМ структур на основе Al-ZnO-Al, Al-ZnO:Ga-Al и Al-ZnO:Li-Al с металлическим алюминием в качестве контактов. Показано, что диффузное введение примеси галлия подавляет fotocувствительность, а диффузное введение лития в пленки ZnO повышает fotocувствительность по сравнению с нелегированными участками той же пленки. Исследуемые пленки оксида цинка были получены методом электронно-лучевого вакуумного напыления с энергией электронов порядка 6 кэВ и температурой подложки 250°C, скорость роста пленки составляла 1,45 нм в секунду. В качестве подложки использовались пластины из монокристаллического сапфира с ориентацией [001]. Термодиффузия проведена при температуре 700°C в атмосфере воздуха или вакуума. Затем пленки отжигались в вакууме или на воздухе, при температуре 350°C для изменения концентрации кислорода.

Диффузное легирование в технологии полупроводниковых интегральных микросхем на кремнии используется как основная операция получения слоев *p*- и *n*-типов проводимости в объеме полупроводниковой пленки. Однако диффузное легирование почти не исследовано для полупроводников типа A^{II}B^{VI}И, в частности, для пленок ZnO. Целью настоящей работы является исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик пленок ZnO, диффузно-легированных галлием или литием, для создания нелинейных электрических элементов.

Показана возможность использования технологии диффузного легирования пленок оксида цинка акцепторной (Li) или донорной (Ga) примесью для управления электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами. Разработана методика локального диффузного легирования определенных участков пленки ZnO, т.е. получены пленки с топологическим рисунком легирующей примеси.

Исследования проведены на планарной структуре Al-ZnO-ZnO:Ga-

ZnO–Al. Проведены измерения пространственного распределения потенциала на переходе анод (Al-ZnO) и катод (Al-ZnO) в этих структурах. Показано возрастание проводимости на участке структуры с диффузно-легированной донорной примесью галлия ZnO:Ga и понижение проводимости на участке структуры с диффузно-легированной акцепторной примесью лития ZnO:Li. На границе электрод-пленка имеет место скачок потенциала U , который вызван сопротивлением барьера Шоттки. Создание в области барьера Шоттки металл (Al)-полупроводник (ZnO) дополнительного слоя с высокой концентрацией электронов позволит снизить удельное сопротивление перехода в 10-20 раз.

Показана принципиальная возможность использования диффузной технологии для создания многоэлементных микросхем прозрачной электроники.

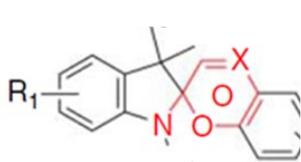
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ФОТОХРОМНЫХ НАНОЧАСТИЦ

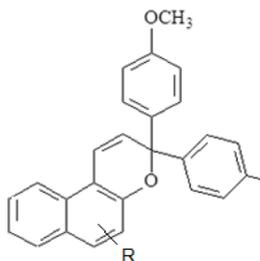
Барачевский В.А.

Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
barva@photonics.ru

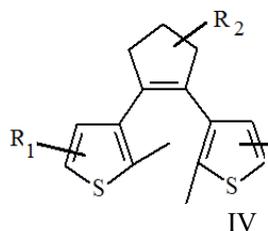
В докладе представлен анализ результатов собственных спектрально-кинетических исследований фотохромных наночастиц типа «ядро-оболочка», в которых в качестве ядра были использованы наночастицы различного типа: благородных металлов (серебра и золота), алмаза, диоксида кремния, фуллерена, графена и диоксида графена, квантовых точек (CdSe, CdSe/ZnS). Оболочку образовывали молекулы фотохромных органических соединений из классов, спиропиранов (I), спирооксазинов (II), хроменов (III) и диарилэтенов (IV), химически или физически сорбированные на поверхности наночастиц.



X=C: спиропиран I
X=N: спирооксазин II



III



IV

В результате сравнительного спектрально-кинетического исследования взаимодействия фотохромных молекул с неорганическими наночастицами в растворах и твердых слоях установлена зависимость механизма их адсорбции от функционализации фотохромных соединений и свойств поверхностных групп.

Взаимодействие фотоиндуцированных изомеров спиропиранов с поверхностью наночастиц диоксида кремния и нанодIAMONOV приводит к образованию протонных комплексов. Поверхности наночастиц графена и оксида графена функционализируются тиол-замещенными молекулами фотохромных спирооксазинов и диарилэтенев. Эффективность фотохромизма синтетически полученных гибридных соединений фуллерена с молекулами спиропиранов и диарилэтенев зависит от структуры фотохромных фрагментов и спейсера между компонентами. Наблюдаемые явления объяснены с привлечением квантово-химических расчетов.

Особый интерес представляют результаты исследования обратимой модуляции электрических и флуоресцентных свойств фотохромных наночастиц на основе наночастиц серебра, а также квантовых точек и квантовых ям (CdSe/ZnS и CdSe). Показано, что обратимая фотоиндуцированная модуляция интенсивности флуоресценции квантовых точек фотохромными превращениями хроменов и диарилэтенев обусловлена, в основном, индуктивно-резонансным переносом энергии фотовозбуждения от квантовых точек на фотоиндуцированные изомеры фотохромных соединений, поглощающих в области излучения полупроводниковых кристаллов. В результате исследований получены образцы твердотельных наноструктурированных оптических элементов, которые испытывают обратимое фотоиндуцированное изменение абсорбционных, люминесцентных и электрических свойств вследствие превращений фотохромных компонент наночастиц.

В заключении рассмотрены перспективы применения фотохромных наночастиц в оптико-электронных устройствах и информационных технологиях, а также в создании покрытий с динамическим адаптивным изменением окраски.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 18-03-00650 и № 20-53-00048).

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПРОВОДОВ $\text{Fe}/(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$

Дворецкая Е.В.¹, Кравчук К.С.², Усейнов А.С.², Коплак О.В.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Москва*

dvoretskaya95@yandex.ru

Процессы перемангничивания магнитомягких микропроводов достаточно чувствительны к воздействию механических напряжений, что потенциально может быть использовано для создания сенсоров механических напряжений на их основе [1]. В случае получения микропроводов из многокомпонентного сплава RE-TM-B происходит расслоение на аморфную оболочку $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ и микрокристаллическое ядро $\alpha\text{-Fe}$ [2]. Поэтому RE-TM-B микропровода могут стать новым классом сенсоров с необходимыми функциональными свойствами [3]. Нами были исследованы микропровода, полученные методом экстракции висящей капли расплава $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$, радиусом 25-50 мкм и длиной до 10 мм. Микропровода демонстрировали квадратную петлю гистерезиса с полем переключения намагниченности 105 Ое. Механические свойства микропровода были измерены в двух ориентациях на торце: в направлениях сканирования №1 и №2 (рис.1. а) и вдоль оси по направлению №3 (рис.1. б) с помощью инструментального вдавливания на нанотвердомере «NanoScan-4D».

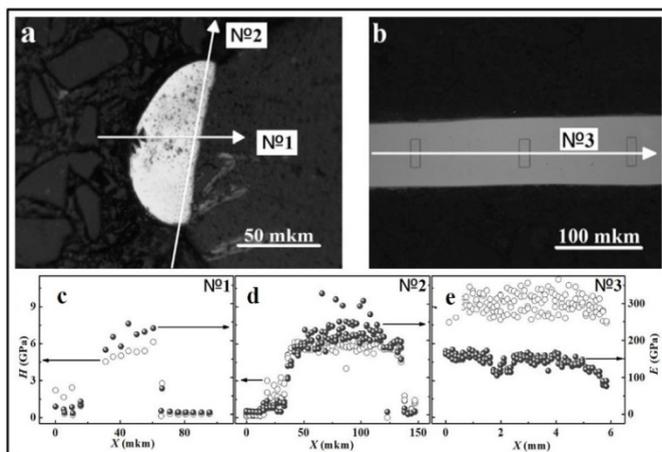


Рисунок 1 – Направления наноиндентирования на торце (а) и оболочке (b) микропровода; Профиль микротвердости H модуля упругости E в направлениях сканирования №1(с), №2(д) и №3 (е).

Установлено взаимосвязь структурных и механических свойств ядра и оболочки. Показано, что микротвердость ядра вдвое меньше твердости оболочки, которые равны $H = 5.85 \pm 0.35$ GPa и $H = 9.3 \pm 0.8$ GPa соответственно. При этом модуль Юнга напротив имеет более высокое значение $E = 207$ GPa для ядра, а для оболочки микропровода $E = 140$ GPa. Это связано с перераспределением переходных и редкоземельных элементов в процессе получения микропроводов методом экстракции висящей капли расплава.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ 20-32-70025 «Стабильность»)

Список литературы:

1. Н. Peng, F. Qin, M. Phan. Springer, 2016
2. R.V. Morgunov, et al., JMMM, 497 (2020) 166004.
3. О.В. Коплак, и др., ФТТ 61 (2019) 2090.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ СУБСТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ $\alpha \rightarrow \beta$ ПРЕВРАЩЕНИЯ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ Pd-Cu

Иевлев В.М.^{1,2}, Прижимов А.С.^{1,3}, Донцов А.И.^{1,3}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Россия, Москва.

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва

³Воронежский государственный университет, Россия, Воронеж
rmileme@mail.ru

Для твердого раствора Pd-Cu состава, близкого к эквиатомному, характерны высокие коррозионная стойкость, электропроводность и каталитическая способность, что позволяет использовать его как основу резистивного сплава и в качестве катализаторов. В отличие от палладия он не гидридуется, а фольга определенного состава, обеспечивающего обратимость процессов $\alpha \rightleftharpoons \beta$ превращений, реализующихся как в процессе прокатки, так и необходимых в технологическом процессе очистки водорода. С учетом особенностей диффузии водорода, проявляющихся во временной адсорбции атомов водорода на внутренних поверхностях раздела [1], целесообразна оценка диспергирования субструктуры мембранной фольги. Методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что механизм $\alpha \rightarrow \beta$ превращения лежит в основе первой стадии диспергирования вследствие кратности ориентационных соотношений между β и α фазами.

Методом молекулярной динамики установлено, что в процессе аккомодации кристаллических решеток двух фаз происходит вторая стадия диспергирования субструктуры посредством образования антифазных границ в β -фазе, компенсирующих структурное и размерное несоответствие на межфазной границе α - β . Средняя линейная плотность следов антифазных границ (межфазных «дислокаций несоответствия») по направлениям $\langle 110 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ β -фазы, составляет $\sim 4 \times 10^7 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 6 \times 10^7 \text{ см}^{-1}$ соответственно.

Из анализа парной функции радиального распределения атомов следует, что происходит увеличение радиуса первой координационной сферы (r_1) β -фазы до величины 2.64 Å, практически совпадающей с остающейся без изменения величиной r_1 α -фазы, т.е. межатомные расстояния в плотноупакованных направлениях обеих фаз в процессе релаксации сближаются. Второй максимум, соответствующий межатомным расстояниям в направлении базисного вектора, сильно размыт и сдвинут влево как следствие уменьшения базисного вектора

$a < 001 >$ β -фазы, что приводит к уменьшению величины размерного несоответствия базисных векторов фаз β и α .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00232).

Список литературы:

1. Взаимодействие атомов водорода с границей зерен в бикристаллах палладия / В.М. Иевлев, А.С. Прижимов, А.В. Болдырева // Неорганические материалы, 2018. Т. 54, С. 440-445.

МЕМРИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ВИСМУТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Зотов А.В.¹, Колесников Н.Н.², Борисенко Д.Н.², Трофимов О.В.¹,
Тулин В.А.¹

¹*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых
материалов РАН, Черноголовка, taba@iptm.ru*

²*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка*

В настоящее время проводится интенсивный поиск приборов микроэлектроники на основе новых физических принципов, которые потенциально будут иметь более высокую степень интеграции. В качестве таких приборов предлагается использовать мемристоры, которые демонстрируют большой потенциал для их применения в элементах памяти и в качестве аналоговых элементов в нейроморфных цепях. Способность аккумулировать входящие импульсы и пороговый эффект - ключевые свойства нейронов, которые создают саму возможность их организации в крупные "мыслящие" комплексы. Мемристор можно определить как пассивный элемент электрической цепи, сопротивление которого зависит от прошедшего через него заряда. После отключения напряжения в цепи мемристор не изменяет свое состояние, т.е. "запоминает" последнее значение сопротивления (метастабильные On, Off состояния). В основе этих исследований лежат эффекты резистивного переключения в структурах металл-изолятор-металл. Для реализации резистивных переключений применяют разные функциональные материалы: диэлектрики, сегнетоэлектрики, ферромагнетики и полупроводники, которые, по существу, являются оксидами или халькогенидами. Несмотря на большой прогресс в разработке разнообразных мемристорных структур, их применение ограничено из-за отсутствия полного понимания механизма наблюдаемых явлений, в частности механизма образования проводящих каналов (филаментов) и

связи этих процессов с базовыми, фундаментальными свойствами материалов, лежащих в основе работы мемристоров. Изучение БЭРП (биполярный эффект резистивных переключений) в гетероструктурах на основе селенида висмута Bi_2Se_3 интересно прежде всего с точки зрения наблюдения БЭРП в не оксидных структурах. В этой работе мы исследовали БЭРП в микроконтактных структурах типа "flake" и пленочных гетеропереходах планарного типа, ставилась задача выявить главные функциональные свойства селенида висмута в проявлении мемристорных свойств и разработать технологический маршрут для получения мемристорных мезоскопических структур на основе пленок селенида висмута с воспроизводимыми мемристорными характеристиками.

Микрообразцы, типа "flake", получали путем шелушения макрообразцов легированных монокристаллов Bi_2Se_3 . Получены чешуйки с планарными размерами порядка единиц микрон и толщиной около 30-60 нм (рис.1). На рис.2 показан пример БЭРП мемристорной структуры на основе "flake" легированных монокристаллов Bi_2Se_3 .

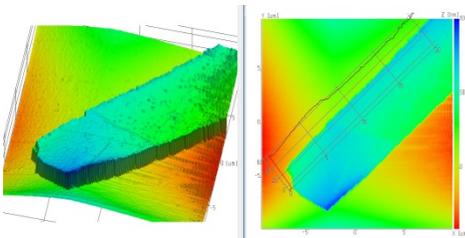


Рисунок 1

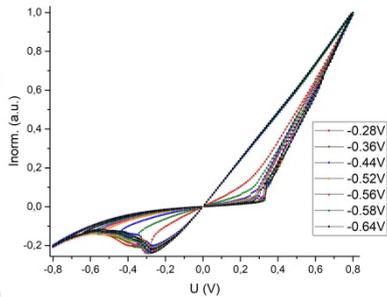


Рисунок 2

Работа поддержана грантом РФФИ №19-29-03011 мк, а также в части государственных заданий Института физики твердого тела РАН.

**БИНАРНЫЕ И СЛОЖНЫЕ ХЕМОСТИМУЛЯТОРЫ И
МОДИФИКАТОРЫ В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК
НА INP И GAAS**

Томина Е.В., Сладкопепцев Б.В., Ильсова Н.А., Кострюков В.Ф.,
Миттова И.Я.

Воронежский государственный университет, Воронеж

Ilyasova_1997@mail.ru

Хемостимуляторы увеличивают темп роста пленок при термоокисидировании InP и GaAs, одновременно подавляя негативные реакции и деградацию поверхности; модификаторы изменяют состав, структуру и свойства пленок [1-3]. Модифицирующее действие без хемостимулирования в процессе синтеза пленок на InP оказывает $AlPO_4$, имеющий в своем составе «инертный» катион, не обуславливающий ни транзитного, ни каталитического воздействия на процесс, и фосфат-анион, увеличение концентрации которого в пленках на InP, улучшает их электрофизические характеристики. Как правило, оксиды элементов, способных к транзитному взаимодействию с компонентами подложки, одновременно являются и хемостимуляторами, и модификаторами. Однако термоокисидированием гетероструктур SnO_2/InP с магнетронно нанесенными слоями SnO_2 обнаружено практическое отсутствие хемостимулирующего воздействия при явной модифицирующей роли оксида олова, заключающейся в изменении состава и структуры образующихся пленок по сравнению с собственным оксидом, что приводит к их полупроводниковым свойствам в отличие от собственных оксидов с омической проводимостью. Эффективно использование комбинаций оксидов с возможностью синергизма их воздействия. Установлено положительное влияние композиции $Co_3O_4+MnO_2$ на скорость роста, состав и морфологию пленок, синтезированных термоокисидированием гетероструктур $(40\%Co_3O_4+60\%MnO_2)/InP$ с магнетронно нанесенным слоем сложного состава, при этом объемная доля включений неокисленного индия в них не превышает 1%; механизм роста пленок – транзитно-каталитический. Особенность процесса термоокисидирования GaAs под воздействием композиций $Sb_2O_3+Y_2O_3$ – инертность одного из ее компонентов (Y_2O_3), не проявляющего хемостимулирующего либо модифицирующего действия. Использование таких композиций позволяет прецизионно управлять составом, а, следовательно, и свойствами тонких пленок, формируемых на поверхности полупроводников. Полученные пленки обладают газочувствительными свойствами в атмосфере аммиака с максимальной

величиной сенсорного сигнала для состава 80 мол.% Sb_2O_3 + 20 мол.% Y_2O_3 при 250 °С, составляющей 1,5 усл. ед. На примере $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ показана эффективность воздействия сложных соединений с катионом-хемостимулятором и анионом-модификатором на скорость оксидирования и свойства пленок на рассмотренных подложках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-03-00354 а.

Литература:

1. Синтез диэлектрических пленок термооксидированием MnO_2/GaAs / И. Я. Миттова, Б. В. Сладкопечев, Е. В. Томина, А. А. Самсонов, Н. Н. Третьяков, С. В. Пономаренко // Неорганические материалы. – 2018. – Т. 54, № 11. – С. 1149–1156

2. Кострюков В. Ф. Газочувствительные свойства тонких пленок, полученных методом термооксидирования поверхности монокристаллов InP / В. Ф. Кострюков, И. Я. Миттова, Сауд Али // Неорганические материалы. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 69–75.

3. Кострюков В. Ф. Хемостимулированный синтез тонких газочувствительных пленок на поверхности GaAs / В. Ф. Кострюков, И. Я. Миттова, А. А. Димитренко // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53, №5. – С. 451–456.

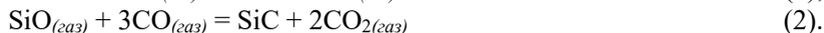
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРОЗИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МАХ ФАЗЫ Ti_3SiC_2 В ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЕ CO

Истомин П.В., Истомина Е.И., Надуткин А.В., Грасс В.Э.
Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
istomina-ei@yandex.ru

Конструкционная керамика на основе МАХ фазы Ti_3SiC_2 считается одним из наиболее перспективных материалов для жёстких условий эксплуатации. Помимо термической стабильности и высоких прочностных характеристик, такая керамика должна иметь хорошие антикоррозионные свойства, в частности, она должна быть устойчива к действию агрессивных газов при высоких температурах. В этой связи возникает необходимость в изучении высокотемпературной химической устойчивости Ti_3SiC_2 в различных газовых средах.

В данной работе проведено исследование высокотемпературной коррозии конструкционной керамики на основе МАХ фазы Ti_3SiC_2 в атмосфере газа CO . Установлено, что в результате циклической

экспозиции керамических образцов в газовой атмосфере, содержащей CO, при температуре 1300 – 1500 °С и продолжительности каждого цикла 10 – 15 мин на поверхности образцов происходит формирование коррозионного слоя. Показано, что коррозионный слой имеет сложное строение с чётко выраженным внешним плотноспечённым подслоем, состоящим из частиц β -SiC и TiC субмикронного размера, и внутренним пористым подслоем, содержащим только микрочастицы TiC. Показано, что коррозия сопровождается выделением газа SiO, который в последующем участвует в образовании фазы β -SiC во внешнем подслое. С ростом внешнего подслоя скорость коррозии замедляется. Предложенный механизм коррозии включает два химических процесса – десилицирование МАХ фазы Ti_3SiC_2 по реакции (1) и рост β -SiC из газовой фазы по реакции (2):



На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о низкой химической устойчивости МАХ фазы Ti_3SiC_2 к действию газа CO при температурах выше 1300 °С. Соответственно, важным практическим результатом проведённого исследования является заключение об ограниченном применении керамики на основе МАХ фазы Ti_3SiC_2 в узлах и агрегатах технических систем, подверженных воздействию газовых сред с высоким содержанием газа CO при высоких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19-08-00131 а.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК, ВЫРАЩЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Me_xO_y/GaAs$ И Me_xO_y/InP

Ковалёва А.С., Миттова И.Я., Сладкопевцев Б.В., Чернышова Н.В.

Воронежский государственный университет, Воронеж

nkovaleva.vsu@yandex.ru

Магнетронно нанесённые наноразмерные слои оксидов-хемостимуляторов способствуют изменению механизма оксидирования полупроводников GaAs и InP, ускоряют процесс роста плёнок по сравнению с собственным оксидированием, изменяют их состав, морфологию поверхности и структуру и, следовательно, свойства.

Для практических применений необходимо формирование плёнок с заданными значениями толщины, удельного сопротивления и определённой морфологией поверхности. Гетероструктуры (ГС) MnO_2/GaAs и $\text{V}_2\text{O}_5/\text{GaAs}$ с различной ориентацией подложки ((100) и (111)) и начальной толщиной наноразмерного слоя оксида 35 нм термооксидировали при различных режимах до достижения целевой толщины плёнок ~ 80 и ~ 250 нм. Нанесенные оксиды модифицируют состав выращенной пленки (РФА). Для сформированных в процессе оксидирования плёнок толщиной не более 90 нм выявлена хорошая корреляция значений толщин, определённых методами лазерной и спектральной эллипсометрии. Установлено, что время формирования плёнки заданной толщины в случае ГС $\text{V}_2\text{O}_5/\text{GaAs}$ зависит от ориентации подложки (на подложках (111) процесс протекает в 2 раза быстрее), для ГС MnO_2/GaAs такой зависимости не выявлено.

Для плёнок толщиной более 130 нм имеет место заметное различие в данных СЭ и ЛЭ, связанное с заметно большей развитостью поверхности плёнок при увеличении времени процесса оксидирования (максимальная высота рельефа по данным АСМ достигает значений 150 нм для образцов MnO_2/GaAs). Термооксидирование ГС $\text{V}_2\text{O}_5/\text{GaAs}$ в течение 50 мин. приводит к образованию плёнок с ярко выраженной структурой и высотой рельефа не более 10 нм. Для ГС MnO_2/GaAs меньшее время оксидирования способствует образованию более гладких плёнок (высота рельефа 3 нм), а увеличение времени процесса закономерно ведёт к увеличению толщины плёнки и одновременно высоты рельефа до 40 нм, плёнки характеризуются ярко выраженной зернистой структурой со средним диаметром зерна 300 нм. Предварительные исследования показывают, что подавляющее большинство синтезированных образцов обладает диэлектрическим характером. Для ГС $\text{V}_2\text{O}_5/\text{InP}$ до термооксидирования характерна гладкая поверхность нанесенного слоя, высота рельефа - не больше 5–10 нм (СТМ). Через 30 мин от начала термооксидирования при 500°C латеральный размер кристаллитов составляет $\sim 150\text{--}200$ нм (высота ~ 25 нм), через 60 мин он уменьшается до 25–30 нм (высота ~ 10 нм, СТМ и АСМ). Динамика изменения для температуры 530°C аналогична. Магнетронно нанесенные слои MnO_2 имеют достаточно гладкую поверхность с высотой рельефа, не превышающей 15 нм (АСМ). После оксидирования в режиме 530°C , 60 мин высота рельефа не превышает 20 нм и поверхность характеризуется зернистой структурой со средним размером 55 нм.

При нанесении менее эффективных хемостимуляторов, способных, однако, модифицировать состав растущих пленок (SnO_2 , TiO_2) на InP с образованием фосфатов вводимого элемента (РФА) при $500^\circ\text{--}550^\circ\text{C}$ за 60

мин. формируются достаточно крупнозернистые пленки с диаметром зерен 100-700 нм, в зависимости от режима синтеза, и высотой рельефа 20-40 нм.

Таким образом, введение на поверхность GaAs и InP наиболее эффективных хемостимуляторов-модификаторов (V_2O_5 , MnO_2) термоокисливания по сравнению с менее эффективными (SnO_2 , TiO_2) обуславливает формирование более гладких пленок с нанодисперсной структурой поверхности. Целенаправленный выбор таких соединений, способов и методов их введения, ориентации подложки и режима окисливания позволяет варьировать толщину и морфологию поверхности плёнок.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-03-00354а).

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ SN-МАТРИЦЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ НАНОРАЗМЕРНЫМ ПОРОШКОВЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ $Al-CuO_x$, ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
Лебедев Е.А.^{1,2}, Сорокина Л.И.¹, Камолов А.Р.¹, Рязанов Р.М.², Сыса А.В.²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград

²Научно-производственный центр «Технологический Центр», Зеленоград

dr.beefheart@gmail.com

Технический прогресс в микро- и нанoeлектронике требует решения новых задач, связанных с технологией соединения поверхностей. Реакционный бондинг или пайка с использованием тонких слоев энергетических материалов, выступающих в качестве локальных источников тепла, уже сейчас позволяют эффективно решать целый ряд технологических задач. Энергетические материалы, изготавливаемые в виде многослойных структур или слоев порошковых материалов, состоят из двух или более компонентов и способны поддерживать в своем объеме самораспространяющуюся экзотермическую реакцию в режиме волнового горения после первичного инициирования. Температура фронта реакции может значительно превышать 1000 °C и достигает этого значения за миллисекунды. Для пайки слой энергетического материала помещается между слоями припоя, а инициирование происходит с помощью электрической искры или малоомощного лазера. Тепло, выделяющееся в ходе реакции, плавит припой, который смачивает соединяемые поверхности и после застывания образует надежное соединение.

В ходе выполнения работы была произведена оптимизация процесса создания матрицы с высокой удельной площадью поверхностью из олова,

формируемая с помощью электрохимического осаждения. Влияние плотности тока на морфологию осаждаемых слоев исследовалось с помощью растровой электронной микроскопии. Снижение плотности тока с 10 до 5 мА/см² привело к изменению преимущественной ориентации структуры осадка с горизонтальной на вертикальную.

Исследование кинетики процесса электрофоретического осаждения позволило выявить зависимость скорости осаждения от напряженности электрического поля. Кроме того, была установлена зависимость химического состава осадка от состава исходной суспензии, что позволило с высокой точностью управлять стехиометрическим соотношением Al:CuO_x в формируемом энергетическом материале. Тепловые свойства материалов исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа. Особенности процесса волнового горения сформированных слоев энергетических материалов исследовались с помощью высокоскоростной видеосъемки.

Экспериментально была показана возможность заполнения матрицы с высокой удельной площадью поверхности из олова энергетическим порошковым материалом Al-CuO_x. Характер заполнения изучался с помощью растровой электронной микроскопии. Скорость распространения фронта волнового горения энергетического материала в матрице в 1,7 раз превосходила аналогичное значение, зафиксированное для слоя материала такой же толщины, но сформированного на чистой титановой фольге.

Таким образом, в работе продемонстрирована принципиальная возможность комбинации электрофоретического и электрохимического осаждения для создания композитного материала, состоящего из припоя и энергетического материала. Дальнейшее развитие этого направления позволит усовершенствовать технологию реакционного соединения поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-1262.2019.8)

ПОДХОДЫ К МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНОК

Мелихов И.В., Аджиев С.З., Рудин В.Н., Савинов В.П.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
melikhov@radio.chem.msu.ru

Как известно, наука о полимерах привела к возможности составить систему уравнений, характеризующих кинетику процессов, приводящих к объединению мономеров в агрегаты макроскопического размера. Такая возможность использована нами применительно к полимерным плёнкам, составленным из наночастиц модельного вещества с заданным потенциалом взаимодействия его атомов. При этом рассмотрен плоскодонный реактор, в который введён раствор модельного вещества в виде слоя на дне реактора. Введённый раствор испаряется при преимущественном уходе растворителя, при полном удалении которого на дне реактора сохраняется слой частиц модельного вещества в виде плёнки. Рассмотрение показало, что систему уравнений, описывающих процессы в таком реакторе, целесообразно представить как ряд краевых задач, каждая из которых характеризует реактор в условиях, при которых на свойства плёнки преимущественно влияет один процесс. При этом решения краевых задач могут быть встроены в общую систему уравнений, описывающих образование плёнки, с указанием на воздействия на реактор, при которых решения краевых задач являются оптимальными. Учитывая это, общую систему уравнений следует рассматривать как молекулярно-кинетическую модель образования плёнок модельного вещества при возможности использования её модифицированных свойств при изучении других веществ.

Целесообразность такого рассмотрения была доказана с помощью экспериментального изучения образования плёнки поливинилформала (ПВФ) как модельного вещества в результате испарения его раствора в дихлорэтаноле (ДХЭ) при быстром удалении пара из реактора. Эксперименты показали, что при образовании плёнки в растворе формировались агрегаты наночастиц разных видов, причём функция распределения $\varphi_j(\vec{X}, t)$ агрегатов каждого j вида по параметрам их состояния \vec{X} при полном удалении растворителя совпадала с той, к которой приводила кинетическая модель при соответствующем подборе потенциалов взаимодействия атомов ПВФ и ДХЭ. Это совпадение указывает на то, что разрабатываемая кинетическая модель доступна для использования при изучении кинетики образования полимерных плёнок.

При изучении плёнки ПВФ разрабатываемая кинетическая модель, использованная лишь частично, привела к установлению важных фактов. Например, установлено, что при испарении раствора ПВФ в реализованных условиях в его объёме происходило многостадийная агрегация при морфологическом самоподобии стадий, проявляющемся в том, что на каждой стадии функция $\varphi_j(\vec{X}, t)$ изменялась в соответствии с уравнением Фоккера–Планка без произвольных допущений.

Литература:

1. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твёрдого вещества. Москва: Бином. Лаборатория знаний. 2006. 309 с.
2. Мелихов И.В., Рудин В.Н., Козловская Э.Д., Аджиев С.З., Алексеева О.В. Морфологическая память полимеров и возможности её использования при разработке технологий новых материалов // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 3. С. 268–277.
3. Adzhiev S.Z., Melikhov I. V., Vedenyapin V.V. Approaches to determining the kinetics for the formation of a nano-dispersed substance from the experimental distribution functions of its nanoparticle properties // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2019. Vol. 10, № 5. P. 549–563.

УПРАВЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЕЙ И СОСТАВОМ ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ h-BN И ИХ СВОЙСТВА

Меренков И.С.

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
merenkov@niic.nsc.ru

Размерность, ориентация и химическая модификация нанослоев гексагонального нитрида бора (h-BN) являются перспективными инструментами по созданию и управлению их уникальными свойствами для различных приложений. Однако реализация низкотемпературного синтеза нанослоев h-BN с контролируемыми ориентацией и составом до сих пор является нерешенной проблемой. В этом докладе будет представлен подход, позволяющий реализовать низкотемпературный синтез допированных углеродом наностенок h-BN (БННСт) с различной ориентацией, морфологией и составом. Данный подход объединяет плазменную активацию и борорганические соединения как исходные вещества в процессах химического осаждения из газовой фазы. БННСт могут быть получены как с лабиринтной, так и с волнистой морфологиями. Простой и эффективный контроль морфологического типа БННСт может

быть осуществлен с помощью температуры осаждения. Концентрация атомов углерода, образующих графеновые домены в решетке h-BN, успешно контролировалась соотношением борорганического соединения и аммиака в исходной газовой смеси. Будет представлен предполагаемый механизм роста наностенок h-BN, демонстрирующий влияние атомов углерода и объясняющий разницу в морфологии и структуре наностенок. Будет продемонстрировано влияние структуры и состава БННСт на термическую стабильность, люминесценцию и цитотоксические свойства. Будут также обсуждаться перспективы дальнейших исследований и применения допированных углеродом наностенок h-BN.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 19-53-45012.

ТЕРМИТНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Мягков В.Г., Быкова Л.Е., Жигалов В.С.

*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск
miagkov@iph.krasn.ru*

Магнитные плёночные наноконпозиты, состоящие из ферромагнитных наночастиц встроенный в полупроводниковые (In_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SnO_2) и непроводящие (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , HfO_2 , ZrO_2) матрицы привлекают большое внимание, как с фундаментальной точки так и для их потенциальных применений. Магнитные и физико-химические свойства этих наноконпозитов сильно зависят от способа приготовления, размера частиц, концентрация и химической связи между наночастицами и матрицей. Многие подходы были разработаны для синтеза ферромагнитных наночастиц в полупроводниковых и изолирующие матрицах, такие как золь-гель метод, высокочастотное магнетронное распыление, термическое разложение, измельчение в шаровой мельнице и др.

Мы развиваем новый термитный метод для синтеза ферромагнитных наночастиц, вложенные в полупроводниковые и непроводящие плёночные матрицы. Хорошо известно, что термитные реакции между порошковыми топливами Al, Be, Mg, B, Hf, Li, Ta, Ti, Zr и окислителями SiO_2 , SnO_2 , WO_3 , MoO_3 , CuO , Bi_2O_3 , I_2O_5 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 реагирует с выделением большого количества тепла, могут иметь режим самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и

используются для синтеза материалов. В последние годы широко исследуются новый класс энергетических композитов, состоящих из топлива и окислителя, размеры частиц которых уменьшены до нануровня. Эти нанокompозитные термиты (также называемые наноструктурированные метастабильные межмолекулярные композиты, нанотермиты или супертермиты) часто имеют вид фольги, содержащие многослойные чередующиеся слои окислителя и топлива. Мы показали, что термитные реакции между плёночными оксидами ферромагнитных металлов Fe_2O_3 , Co_3O_4 и др. и Al, Zr In и др. инициируются при низких температурах. В частности, реакции Fe_2O_3 , Co_3O_4 оксидов с Al, Zr и In имеют температуры инициирования T_{in} равными 510°C , 250°C и 180°C , соответственно. Мы продемонстрировали синтез ферромагнитных $\text{Fe-In}_2\text{O}_3$, Fe-ZrO_2 , Co-ZrO_2 с использованием термитных реакций в $\text{In/Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Zr/Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{Zr/Co}_3\text{O}_4$ бислоях, соответственно [1-3]. Представленный термитный метод был расширен для получения высококоэффциентивных нанокompозитных пленок, содержащих высокоанизотропные CoPt , FePt кластеры, вложенные в Al_2O_3 и In_2O_3 матрицы используя плёночные $\text{Al/Fe}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ и $\text{In/Co}_3\text{O}_4 + \text{Pt}$ системы [4, 5].

Термитный метод открывает путь к легкому и высокоэффциентивному методу для изготовления широкого спектра функциональных нанокompозитных пленок, содержащих металлические кластеры, встроенные в оксидную матрицу и имеющих хорошую химическую стабильность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ совместно с правительством Красноярского края и Краевым научным фондом (грант № 19-43-240003) и на оборудовании Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература:

1. Быкова Л.Е., Жигалов В.С., Мягков В.Г., и др. $\text{Co-In}_2\text{O}_3$ нанокompозитные плёнки: синтез, структурные и магнитные свойства, Физика твердого тела 60 (2018) 2028-2032. М
2. Myagkov V.G., Bykova L.E., Zhigalov V.S., et al., Thermite synthesis, structural and magnetic properties of $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ nanocomposite films, J. Alloys Compd 724 (2017) 820-826.
3. Bykova L.E., Zharkov S.M., Myagkov V.G., et al., JOM, 2020, vol. 72 (In Press).
4. Жигалов В.С., Мягков В.Г., Быкова Л.Е., и др. Магнитные и структурные свойства композитных тонких пленок $\text{Fe}_{87}\text{Pt}_{13}\text{-Al}_2\text{O}_3$,

изготовленных с помощью твердофазных реакций, Физика твердого тела 59 (2017) 379-384.

5. Жигалов В.С., Быкова Л.Е., Мягков В.Г., и др., Нанокompозитные плёнки $\text{CoPt-Al}_2\text{O}_3$: синтез, структурные и магнитные свойства, Поверхность 2020, № 1, 60–67.

ВЛИЯНИЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ДОБАВОК НА МИКРОТВЁРДОСТИ ХРОМОВЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Насрауи М., Литовка Ю.В.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов;

nasraoui.mariem@gmail.com

Электролитическое хромирование является одним из наиболее важных гальванических процессов и широко используется в различных отраслях промышленности. он используется для увеличения микротвёрдости и, как следствие, износостойкости деталей. Если твёрдость стали Ст20 составляет 167 кг/мм^2 , то микротвёрдость традиционного хромового гальванического покрытия имеет значение $750 - 900 \text{ кг/мм}^2$. В то же время, микротвёрдость и износостойкость традиционного хромового покрытия уже не удовлетворяет современным требованиям машиностроительной индустрии. В настоящее время активно развивается направление использования наноуглеродных добавок (наноалмазов, однослойных и многослойных нанотрубок, оксида графена) в электролиты хромирования [1-3].



Рисунок 1 – Зависимость микротвёрдости хромового покрытия от нанодобавок

Исследование выявило тенденцию к увеличению микротвёрдости хромового покрытия путем добавления смеси углеродных наноматериалов

(наноалмазов, однослойных и многослойных нанотрубок, оксида графена) к стандартному хромовому электролиту. Наилучший результат был получен при использовании смеси наноалмазов и многослойных углеродных нанотрубок. Микротвердость наномодифицированного хромового покрытия повысилась на 27%. Это увеличение обусловлено сочетанием двух механизмов: введением наноалмазов в кристаллическую решетку металла покрытия и появлением дополнительных центров кристаллизации на дефектах в углеродных нанотрубках.

1. Литовка Ю.В., Насрауи М., Кузнецова О.А., Майстренко Н.В. Модифицированные однослойными углеродными нанотрубками хромовые гальванические покрытия// Упрочняющие технологии и покрытия// 2018, том 14, №10, с.463 – 465.

2. Литовка Ю.В., Насрауи М., Кузнецова О.А. Модифицированные смесью углеродных нанотрубок "таунит" и наноалмазов хромовые гальванические покрытия// современные технологии в машиностроении// 2019, с.38 – 42.

3. Пат. 2709594 Российская Федерация, МПК C01B 32/198, B82B 3/00, B82Y 40/00. Способ получения оксида графена. Ткачев А. Г., Мележик А.В., Осипов А.А., Ткачев М.А. /Заявитель и патентообладатель ООО "НаноТехЦентр" (RU). – № 2018134006; заявл. 26.09.18; опубл. 18.12.19, Бюл. № 35.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Насырбаев А.

Томский политехнический университет, Томск

arn1@tpu.ru

На сегодняшний день в промышленности все больше внимания уделяется конструкционным и функциональным материалам с высокими характеристиками. Широкое распространение получают технологии создания защитных и упрочняющих покрытий, которые позволяют повысить износостойкость, твердость, модуль Юнга, а также коррозионную стойкость промышленных изделий. Одним из перспективных материалов для упрочнения выступает карбид вольфрама, обладающий высокими механическими характеристиками [1]. Наиболее распространенными фазами карбида вольфрама являются гексагональные фазы WC и W₂C. Также, согласно фазовой диаграмме, в системе W-C существует метастабильная фаза кубического карбида вольфрама WC_{1-x}

[2]. Важными характеристиками кубического карбида вольфрама являются повышенная электро- и фотокаталитическая активности [3].

В работе показана возможность получения покрытия кубического карбида вольфрама плазмодинамическим методом с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя с графитовыми электродами [4]. В процессе нанесения покрытия достигаются необходимые условия синтеза WC_{1-x} , заключающиеся в сверхбыстрой кристаллизации частиц ($> 10^7-10^8$ К/с) [5].

Произведена серия экспериментов по нанесению покрытий WC_{1-x} на различные материалы подложек (медь, латунь, сталь). Электропитание к ускорителю подводилось от емкостного накопителя энергии ($C = 6$ мФ, $U = 3$ кВ). Эксперименты производились при нормальных температуре и давлении в камере-реакторе, заполненной аргоном. Нанесенные покрытия исследовались методами рентгеновской дифрактометрии (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM).

По результатам XRD было определено, что во всей серии экспериментов были получены покрытия, состоящие преимущественно из фазы кубического карбида вольфрама. Анализ данных SEM показал, что размеры покрытия составляют не менее 15 мкм.

Результатом работы является нанесение покрытий кубического карбида вольфрама на различные типы подложек плазмодинамическим методом. Исследовано влияние материала подложки на получаемое покрытие. Наибольший выход фазы WC_{1-x} (более 90 %) был получен при использовании медной подложки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-13-00120.

Список литературы:

1. Cardarelli F. Materials handbook. – London etc. : Springer, 2000. – С. 45-57.
2. Kurlov A. S., Gusev A. I. Phase equilibria in the W–C system and tungsten carbides //Russian Chemical Reviews. – 2006. – Т. 75. – №. 7. – С. 617.
3. Kim J. et al. Enhancement of electrocatalytic activity of platinum for hydrogen oxidation reaction by sonochemically synthesized WC_{1-x} nanoparticles //Journal of Power Sources. – 2009. – Т. 193. – №. 2. – С. 441-446.
4. Pak A. et al. Synthesis of ultrafine cubic tungsten carbide in a discharge plasma jet //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Т. 48. – С. 51-55.

5. Zhang F. G., Zhu X. P., Lei M. K. Microstructural evolution and its correlation with hardening of WC-Ni cemented carbides irradiated by high-intensity pulsed ion beam //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Т. 206. – №. 19-20. – С. 4146-4155.

КОМБИНИРОВАННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА-МАРАНГОНИ И ЕЕ РОЛЬ В ОБРАЗОВАНИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Невский С.А., Грановский А.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк
nevskiy.sergei@yandex.ru

Объектами исследования являются технически чистый титан и эвтектический силумин, поверхность которых подвергнута обработке гетерогенными плазменными потоками, созданными электрическим взрывом порошка иттрия и последующей электронно-пучковой обработке.

Цель работы – установление механизмов и создание математической модели формирования наноразмерных структурно-фазовых состояний в титановых и алюминиевых сплавах при обработке гетерогенными плазменными потоками и низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками.

В представленной работе изучен процесс возникновения наноразмерных структур при воздействии гетерогенных плазменных потоков, созданных электрическим взрывом порошка иттрия на подложки из титана и алюмо-кремниевое сплава и последующей электронно-пучковой обработки. Предполагалось, что образование ячеистых наноразмерных структур на поверхности иттриевого покрытия осуществляется за счет развития комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Марангони. Рассматривалось течение вязкой двухслойной теплопроводной несжимаемой жидкости в поле массовых сил. Первый слой является неподвижным, его занимает титан или силумин, а второй движется с постоянной скоростью, направленной параллельно границе раздела. Для каждого слоя записывались линеаризованные уравнения Навье-Стокса, теплопроводности, на границах раздела «плазма/покрытие», «покрытие/подложка» задавались кинематические и динамические условия, которые имеют вид:

«плазма/покрытие»:

$$z = h : -p_2 + 2\rho_2 v_2 \frac{\partial w_2}{\partial z} = \gamma_2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} = w_2$$

«покрытие/подложка»:

$$z = 0 : -p_1 + 2\rho_1 v_1 \frac{\partial w_1}{\partial z} + p_2 - 2\rho_2 v_2 \frac{\partial w_2}{\partial z} = \gamma_{12} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} = w_2, \quad \frac{\partial \eta_1}{\partial t} = w_1$$

$$z \rightarrow -\infty : w_1 = 0$$

Поиск решения в виде малого гармонического возмущения с амплитудой, зависящей от z , привел к дисперсионному уравнению. Решение дисперсионного уравнения позволило получить зависимости скорости роста возмущений от длины волны. Анализ этих зависимостей показал взаимное влияние двух неустойчивостей друг на друга. Установлено, что неустойчивость Кельвина-Гельмгольца при значении скоростей порядка 10 м/с приводит к подавлению термокапиллярной неустойчивости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента для государственной поддержки молодых ученых -кандидатов наук № МК-118.2019.2

МЕХАНИЗМЫ ИНАКТИВАЦИИ БАКТЕРИЙ НАНОЧАСТИЦАМИ Pt И Fe НА ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЯ TiCaPCON

Пономарев В.А., Швейко А.Н., Пермякова Е.С., Попов З.И.,

Штанский Д.В.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва,*

ponomarev.viktor1993@yandex.ru

Бактериальная инфекция, которая возникает в 1-4% случаев планового хирургического вмешательства при установке имплантатов и может достигать 30% при сложных переломах, представляет серьезную медицинскую проблему. Быстрое развитие резистентности бактерий к

антибиотикам делает применение традиционных методов лекарственной терапии малоэффективными. Целью настоящего исследования было выявление вклада наночастиц металлов (платины, железа или их комбинации), сформированных на поверхности керамического покрытия TiCaPCON, в различные механизмы деактивации бактерий.

Биологические исследования показали, что новые материалы эффективно подавляют рост восьми типов бактерий: *Escherichia coli* K261 и U20, *Klebsiella pneumoniae* B1079k/17-3, *Acinetobacter baumannii* B1280A/17, *Staphylococcus aureus* no. 839, *Staphylococcus epidermidis* i5189-1, *Enterococcus faecium* Ya-235: VanA и I-237: VanA, в том числе устойчивых к антибиотикам. Бактерицидный эффект достигается за счет того, что керамические покрытия, декорированные наночастицами Fe и Pt, являются активными фотокатализаторами и генерируют большое количество реактивных форм кислорода на протяжении 12 часов после стерилизации материалов ультрафиолетовым облучением. Впервые показано, что бактерии могут быть деактивированы при их непосредственном контакте с поверхностью имплантата за счет микрогальванического взаимодействия. С применением метода Кельвин-зондовой силовой микроскопии удалось продемонстрировать, что между наночастицами и окружающей их керамической матрицей в биологической среде возникает разность потенциалов, достигающая 60 мВ. При контакте бактерий с поверхностью происходит их гибель.

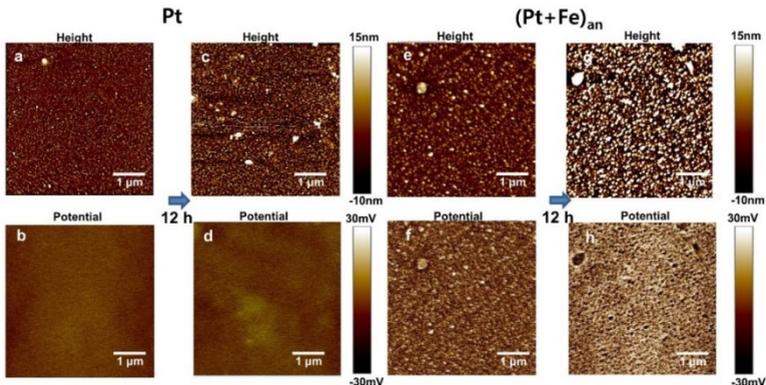


Рисунок 1 – АСМ (a,c,e,g) и КЗСМ (b,d,f,h) образцов с наночастицами Pt и (P+Fe)tan. Измерения до (a,b,e,f) и при 12 ч (c,d,g,h) в физиологическом растворе (0,9 мас.% NaCl).

Результаты расчётов на основе теории функционала плотности показали возможность перераспределения заряда между наночастицами и окружающей их керамической матрицей. Биологические исследования

также показали, что разработанные покрытия не являются токсичными для лимфоцитов и не оказывали влияния на их способность активироваться в ответ на митоген. Таким образом, выполненное исследование дает новое понимание механизмов деактивации бактерий бактерицидными и биологически безопасными покрытиями.

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ WC-AG

Романов Д.А., Московский С.В., Соснин К.В., Филяков А.Д., Громов В.Е.
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк
romanov_da@physics.sibsiu.ru

Настоящей публикацией сообщаем о проведении тестового электровзрывного напыления покрытий системы WC-Ag и последующем контроле формирования покрытий визуальными методами и с использованием тринокулярного цифрового микроскопа Saike Digital SK2009U-500W с небольшими увеличениями (до 4 – 10 крат). Этот метод первоначального анализа электровзрывных покрытий используется для предварительного контроля. Поверхность медных образцов после электровзрывного напыления в различных режимах представлена на рисунке.

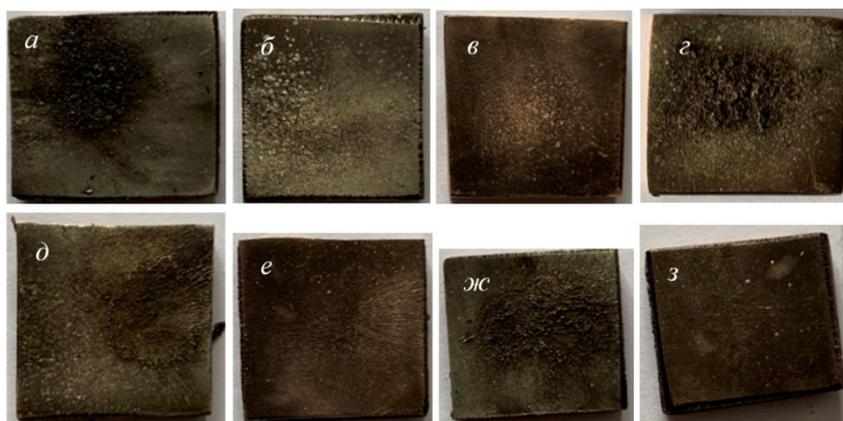


Рисунок 1 – Поверхность электровзрывных покрытий системы WC-Ag, напыленных в различных режимах. Медная подложка имела форму параллелепипеда с размерами 20×20×5 мм

Режимы электровзрывного напыления отличаются поглощаемой поверхностью плотностью мощности, массами используемых для напыления серебра и монокарбида вольфрама. В настоящее время режимы не разглашаются в целях обеспечения патентной чистоты. Покрытия формировали на медной подложке, которая имела форму параллелепипеда с размерами 20×20×5 мм. Видно, что поверхность покрытий имеет разные структурные составляющие. Так на рисунках б, г, д, ж присутствует капельная фракция импульсной плазменной струи продуктов электрического взрыва проводников. Ее содержание составляет от 25 до 40 % площади поверхности образца. На рисунках а, в, е, з преимущественно формируется структура с гладким рельефом поверхности. Эксперименты по напылению покрытий для каждого из представленных на рисунке образцов повторяли 10 раз. На рисунке представлены наиболее характерные образцы. Предварительные исследования позволяют выбрать оптимальный вариант развития направлений исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-486.2020.8, а также исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00044.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЁНОК ДИОКСИДА ТИТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕАКЦИЙ ГИДРОЛИЗА ПАРАМИ АММИАКА И ОКИСЛЕНИЯ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА

Скворцова И., Гулина Л.Б.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
irina_98nis@outlook.com*

Плётки на основе диоксида титана широко используются для создания функциональных материалов с контролируемой смачиваемостью поверхности, антибактериальной активностью, фотоактивных и защитных покрытий [1].

В настоящей работе проведено исследование особенностей формирования плёнок на основе диоксида титана в результате реакций гидролиза и окисления на поверхности водного раствора соли титана (III) в атмосфере воздуха, насыщенного парами аммиака. Синтез проводился в стационарном или проточном режимах по методикам [2,3]. Показано, что в зависимости от условий синтеза, таких как концентрация и pH растворов,

состав воздушно-газовой смеси, длительность и режим обработок, возможно получить на поверхности раствора пленки толщиной от 10 нм до 2 микрон. Важной особенностью сформированной пленки является выраженный градиент морфологии: со стороны воздуха пленка имеет более плотную, гладкую поверхность (Рис. 1 а), чем со стороны раствора, где отчетливо проявляется её глобулярное строение (Рис. 1 б). Определены условия, при которых наблюдается формирование градиентной пленки с толщиной 200-600 нм, способной при высушивании трансформироваться в микросвитки с диаметром 10-30 мкм и длиной до 200 мкм. Важной особенностью развиваемого метода синтеза является возможность получения плёнок и свитков на основе диоксида титана, содержащих в своем составе катионы других металлов или органические компоненты. В докладе приводятся результаты синтеза материалов на основе оксида титана, содержащих в своем составе катионы Fe^{3+} и/или анионы аскорбиновой кислоты. Исследование выполнено методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), оптической микроскопии, рентгенофазового анализа (РФА), оптической и ИК- спектроскопии. Установлено влияние состава растворов на морфологию и оптические свойства синтезированных материалов. Проведено исследование термических превращений синтезированных материалов, определены температуры фазовых переходов и кристаллическое строение продуктов реакций.

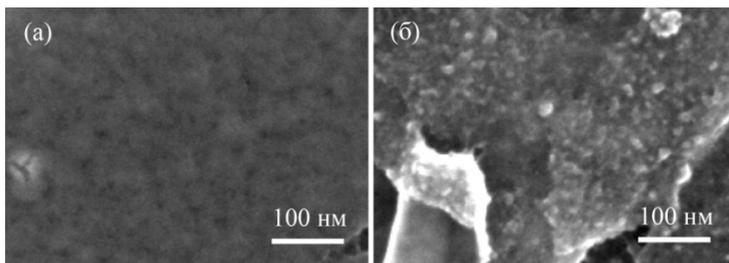


Рисунок 1 – СЭМ изображение поверхностей плёнки со стороны воздуха (а) и со стороны раствора (б).

Сделан вывод о перспективах использования метода синтеза на границе раздела водный раствор – газообразный реагент для получения материалов на основе диоксида титана с планарной и тубулярной морфологией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-13-10223-П.

Литература:

1. Chen, X.; Mao, S. S., Chem. Rev. 2007, 107, 2891-2959.
2. Tolstoy, V. P.; Gulina, L. B., Langmuir 2014, 30, 8366-8372.
3. Gulina, L. B.; Tolstoy, V. P.; Lobinsky, A. A.; Petrov, Y. V., Part. Part. Syst. Charact. 2018, 35, 1800186.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ УДАРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ БОРНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ Zr-B-(N), Mo-B-(N), Cr-B-(N) И Ti-B-(N)

Сытченко А.Д., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Погожев Ю.С.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, alina-sytchenko@yandex.ru

Покрытия были получены методом магнетронного распыления мишеней ZrB₂, MoB, CrB₂, TiB и TiB₂ в среде Ar и газовых смесях Ar+15% N₂. Процесс проводили в одинаковых условиях, сила тока и напряжение составляли 2 А и 400–500 В. Давлении рабочего газа 0.1–0.2 Па. В качестве подложек для нанесения покрытий использовали диски из твердого сплава ВК6М.

На первом этапе были проведены исследования методами РФА и наноиндентирования, а также определены коэффициенты трения и износостойкость покрытий. При соотношении Me/B>1 основу покрытий составляли фазы с орторомбической (TiB) или тетрагональной структурой (MoB), а при Me/B~0,5 формировались преимущественно фазы с гексагональной решеткой (TiB₂, CrB₂). Введение азота не приводило к образованию дополнительных кристаллических фаз, однако в случае образца Ti-B-(N) (мишень TiB₂) наблюдалось уменьшение размера кристаллитов. В системе Ti-B-(N) были получены сверхтвердые покрытия с твердостью 40 ГПа с высоким упругим восстановлением W = 64-72%. Для покрытий MoB и CrB₂ твердость находилась в диапазоне 14-39 ГПа, величина W составляла 48-61%. Низким коэффициентом трения и лучшей износостойкостью обладали азотсодержащие покрытия Ti-B-N, Mo-B-N и Cr-B-N [1].

Для практического применения борнитридных покрытий важна их стойкость к циклическим ударно-динамическим нагрузкам, которая ранее не была изучена. На втором этапе работы были проведены исследования по определению стойкости покрытий Zr-B-(N), Mo-B-(N), Cr-B-(N) и Ti-B-(N) к циклическим ударно-динамическим воздействиям. Образцы были испытаны на приборе Impact Tester SemeCon при нагрузке 1000 Н. Для определения геометрических размеров кратеров использовали оптический профилометр WYKO-NT1100. Результаты показали, что введение азота

положительно влияло на стойкость к ударно-динамическим нагрузкам: в случае Ti-B-(N) (мишень TiB₂) и Mo-B-(N) площадь поперечного сечения кратера *S* уменьшилась в 1,3 и 6,5 раз соответственно. В тоже время износостойкость образцов Zr-B-(N), Cr-B-(N) и Ti-B-(N) увеличивалась с увеличением концентрации N. Максимальным диаметром кратера *D* обладало покрытие Zr-B-N, а максимальной глубиной *H* – образец Ti-B-N. Минимальные значения *D*, *H* и *S* были характерны для образца Ti-B. Стойкость покрытий к циклическим ударно-динамическим нагрузкам возрастала в ряду Ti-B → Cr-B → Mo-B-N → Cr-B-N → Ti-B-N (TiB₂) → Ti-B (TiB₂) → Zr-B → Mo-B → Zr-B-N → Ti-B-N.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00187).

Список литературы:

1. Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, А.В. Новиков и др. // ФММ. 2017. Т. 118. С. 1202–1213.

НЕРАВНОВЕСНОЕ ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПЛАВОВ FeTiB, FeZrN В ПЛЁНКАХ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Теджетов В.А.¹, Шефтель Е.Н.¹, Харин Е.В.¹, Усманова Г.Ш.¹

Кирюханцев-Корнеев Ф.В.²

¹ИМЕТ РАН, Москва, ²НИТУ МИСИС, Москва

vtedzhetov@imet.ac.ru

Высокоиндукционные магнитомягкие нанокристаллические плёнки на основе Fe являются перспективными материалами для создания миниатюрных высокочувствительных датчиков слабых магнитных полей широкого спектра применения. Основными требованиями к таким материалам являются высокая индукция насыщения (*B_s*), низкая коэрцитивная сила (*H_c*), высокая механическая твёрдость и износостойкость, а также термическая стабильность. Для получения требуемых свойств авторами ранее был разработан физико-химический подход, который состоит в подборе состава и условий формирования структуры сплавов FeMe_v-X (X = C, N, B) [1]. Данный подход позволил получить, как было показано на примере сплавов (Fe-9,5%Si-5,5%Al)–TiB₂ [2], получаемых через слиток уникальный комплекс магнитных и механических свойств, отвечающих требованиям микроэлектроники, за счет формирования нанокристаллической структуры, представляющей

собой фазу на основе α -Fe, обладающей одним из наиболее высоких значений Bs, дисперсно упрочненную, высокотвердыми, термодинамически стабильными фазами MeX(бориды, оксиды, нитриды металлов IVb группы периодической системы). В представленной работе было выполнено исследование процессов формирования неравновесной структуры в нанокристаллических пленках систем Fe-Ti-B и Fe-Zr-N и поиск составов и условий получения плёнок, обеспечивающих формирование двухфазной структуры α Fe-ZrN/TiB₂.

Для решения поставленной задачи методом магнетронного осаждения были получены плёночные сплавы тройных систем FeTiB и FeZrN с содержанием легирующих элементов 0-14,3 ат.% (Ti), 0-28,9 ат.% (B) и 0-35 ат.% (Zr), 0-31.6 ат.% (N), соответственно. Все полученные пленки подвергались одночасовому вакуумному отжигу в диапазоне температур 200-500 °C (FeTiB) и 300-750 °C (FeZrN). Методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии изучены закономерности формирования кристаллической структуры пленок в зависимости от их химического состава и особенностей методики напыления.

Установлено, что в системах Fe-Ti-B и Fe-Zr-N, при напылении, в зависимости от содержания легирующих элементов и их соотношения, формируются однофазные (твёрдый раствор Ti или N в α Fe), двухфазные (α Fe+ α Ti/TiB₂/FeTi/Fe₂B/Fe_xN_{1-x}/ZrO₂/ZrN) или рентгеноаморфные (фаза α Fe с размером зерна менее 2 нм) пленки, характеризующиеся нанокристаллической структурой. Изучены закономерности растворимости Ti, B, Zr и N в α Fe и дан их количественный анализ. Показано, что с увеличением суммарного содержания в плёнках легирующих элементов размер зерна основной ОЦК фазы уменьшается от 46 нм до величин менее 1 нм. Рассмотрены механизмы, определяющие измельчение зерна при напылении и отжиге пленок. При увеличении температуры отжига: фазовый состав пленок приближается к равновесному; уменьшается микродеформация зерен ОЦК-фазы; остаточные макронапряжения изменяется от сжимающих к растягивающим и проходят нулевые значения при соответствующих температурах; развивается процесс дегазации, что приводит к уменьшению содержания азота в пленках. Дано физико-химическое обоснование существованию метастабильных фазовых равновесий в пленках и сформулированы рекомендации по выбору условий напыления и подбору состава мишеней для получения структуры типа α Fe-ZrN/TiB₂.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (18-03-00502 А).

Список источников:

1. В.К. Григорович, Е.Н. Шефтель, Р.Е. Струг, И.Р. Полюхова, Металлы, 1993, №6, с.173-177
2. О.А. Банных, Е.Н. Шефтель, В.К. Григорович, Р.Е. Струг, А.Мкртумов, И.Р. Полюхова, А.В. Евдокимов, Магнитомягкий сплав // Патент 4775860/02, 30.09.92 Бюл. № 36

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК SiO_x ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ

Терехов В.А.¹, Теруков Е.И.², Ундалов Ю.К.², Барков К.А.¹,
Минаков Д.А.¹, Занин И.Е.¹, Сербин О.В.¹, Середин П.В.¹,
Голощاپов Д.Л.¹, Трапезникова И.Н.²

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
terekhov@phys.vsu.ru

Диэлектрические пленки SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 с нанокластерами и нанокристаллами кремния вызывают большой интерес, т.к. благодаря размерному квантованию такие пленки могут обладать фото- и электролюминесценцией [1]. С целью изменения области люминесценции можно преобразовать аморфные пленки $\alpha\text{-SiO}_x$ с нанокластерами в аморфные пленки с нанокристаллами кремния путем высокотемпературного отжига, при этом люминесцентные свойства данных пленок будут определяться размерами и концентрацией нанокристаллов кремния.

В рамках данной работы были исследованы 3 образца $\alpha\text{-SiO}_x\text{:H+nCl-Si}$ [2] с содержанием нанокластеров кремния около 15 мол.%, 50 мол.% и 53 мол.%. Эти образцы были отожжены в вакууме с помощью импульсного фотонного отжига (ИФО). Анализ образования нанокристаллов кремния проводилось с помощью рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре PANalytical Empyrean B.V. с монохроматизированным $\text{Cu K}\alpha_1$ излучением, в ЦКПНО ВГУ. Кроме того, для одновременного контроля как кристаллических, так и аморфных фаз на основе кремния, пленки анализировались с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света на спектрометре Raman Microscope RamMics M532 EnSpectr в области $360\text{-}560\text{ см}^{-1}$ с использованием лазера с длиной волны 532 нм, а также с помощью уникального метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) на спектрометре РСМ-500 [3]. Для более точного определения фазового состава исследуемого образца по данным УМРЭС согласно методике, описанной в работе [4], проводится компьютерное моделирование экспериментальных

рентгеновских эмиссионных Si L_{2,3} спектров на основе эталонных спектров. Спектры оптического поглощения были получены в диапазоне 6.5–1.4 эВ на спектрометре LAMBDA 650 фирмы Perkin Elmer, а спектры фотолюминесценции на оптико-волоконном спектрометре USB4000-VIS-NIR фирмы Ocean Optics при возбуждении лазером с $\lambda=405$ нм, так же, как и в работе [2].

Результаты рентгенодифрактометрических исследований фазового состава пленок SiO_x с нано-кластерами кремния показывают, что ИФО данных пленок приводит к образованию нанокристаллов кремния со средними размерами ~10 нм, ~50 нм и крупных кристаллитов с размерами >100 нм, а также к кристаллизации по крайней мере части оксидной фазы в гидроксид кремния H₂O₇Si₂. В тоже время по данным Раман-спектроскопии в пленках с содержанием ncl-Si ≥50 мол.% после ИФО формируются массивы нанокристаллов Si со средними размерами ~1-2 нм и 3,5 нм. Причем в пленках с содержанием кластеров чистого кремния ≤50 мол.% при отжиге часть кремния уходит на формирование оксида, а часть на образование нанокристаллов кремния, а в пленке с концентрацией кластеров кремния ≥53 мол.%, наоборот при отжиге происходит частичный переход кремния из оксидной фазы в рост нанокристаллов Si.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90234.

1. Ю.К. Ундалов, Е.И. Теруков, Физика и техника полупроводников, 2015, 49, 887.
2. В.А. Терехов и др., Физика и техника полупроводников, 2016, 50, 212.
3. Т.М. Зимкина, В.А. Фомичев Ультратягкая рентгеновская спектроскопия (Изд-во Ленинградского университета) 132 с. (1971)
4. V.A. Terekhov et. al., J. Electr. Spectr. and Rel. Phen., 2001, 114-116, 895-900.

СИНТЕЗ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФАЗ В СИСТЕМЕ Cu-Sn-S ОТЖИГОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ В ПАРАХ СЕРЫ

Буданов А.В.¹, Власов Ю.Н.¹, Котов Г.И.¹, Руднев Е.В.², Терновая В.Е.²

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж

²Воронежский государственный университет, Воронеж
ternovaya@phys.vsu.ru

Тройные полупроводниковые соединения в системе Cu-Sn-S представляются перспективными для использования их в качестве фотоактивных слоев тонкопленочных солнечных элементов. Наибольший интерес с этой точки зрения представляют фазы Cu_2SnS_3 , Cu_3SnS_4 и Cu_4SnS_4 [1].

В работе формирование тонкопленочных фаз медь-олово-сера проводилось при отжиге в парах серы металлического слоя заданного состава. В исходной металлической плёнке толщиной 150 нм соотношение компонентов Cu:Sn изменялось в диапазоне от 2:3 до 3:2 в атомных долях. Состав контролировался методом рентгено-спектрального микроанализа. Температура отжига в парах серы составляла 430 °С, время отжига 80 минут при давлении паров серы ~ 0,2 мм.рт.ст., которое определялось температурой источника серы. Детали технологии синтеза плёнок сульфида Cu-Sn-S изложены в работе [2].

Методами растровой электронной микроскопии (Рисунок) и атомно-силовой микроскопии установлено, что характерный размер неоднородности поверхности возрастает от 50 нм до 700 нм при изменении состава сульфида от Cu:Sn:S = 2:3:5 до 3:2:5. Это вызвано формированием кристаллитов соединения Cu_2SnS_3 в составе пленки, что подтверждено рентгено-фазовым анализом, электронографией на отражение и спектроскопией оптического пропускания в видимой области спектра и ближнем ИК диапазоне.

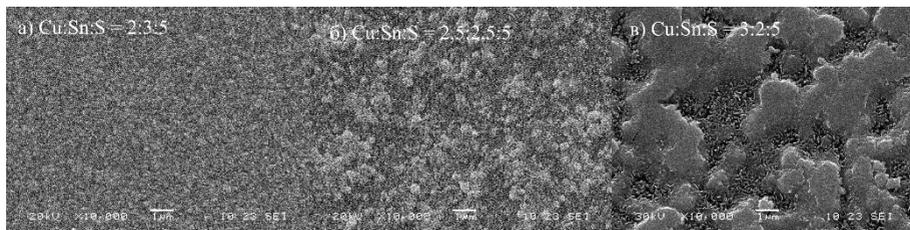


Рисунок 1 – РЭМ-изображения поверхности пленок сульфидов, сформированных из металлического слоя различного состава: а) Cu:Sn = 2:3; б) Cu:Sn = 1:1; в) Cu:Sn = 3:2.

Температурная зависимость удельного сопротивления плёнок сульфидов измерялась вблизи комнатной температуры с помощью четырёхзондового метода. Удельное сопротивление плёнок состава Cu:Sn:S = 2:3:5 линейно нарастает с увеличением температуры с коэффициентом $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Однако, для плёнок состава Cu:Sn:S = 3:2:5 сопротивление убывает экспоненциально с энергией активации 0,02 эВ. Во всех случаях методом Холла обнаружен p-тип электрической проводимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-32-00971 - мол_a.

1. Reddy V. R. M. Review on Cu_2SnS_3 , Cu_3SnS_4 , and Cu_4SnS_4 thin films and their photovoltaic performance / V. R. M. Reddy et al. // Journal of Industrial and Engineering Chemistry - 2019. - V. 76. - Pp. 39–74.

2. Budanov A. V. Synthesis of a Cu_2SnS_3 ternary compound by thermal annealing of a metal layer in sulfur vapor / A. V. Budanov et al. // Journal of Physics: Conference Series - 2019. - V. 1347. - P. 012105.

НОВЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ И ИХ СИНТЕЗ МЕТОДОМ ИОННОГО НАСЛАИВАНИЯ

Толстой В.П., Канева М.В., Левшакова А.С., Федотова Н.А.

*Институт Химии Санкт-Петербургского государственного университета,
Санкт-Петербург
v.tolstoy@spbu.ru*

Как известно, одним из основных методов получения водорода в промышленности является электролиз воды. Данной теме в настоящее время уделяется повышенное внимание в связи с созданием на основе электролизеров систем преобразования и аккумулирования энергии. Анализ литературы показывает, что если в 2010 году по этой теме было опубликовано около 500 статей, то в 2019 уже более 1000, причем большинство работ посвящено созданию новых электрокатализаторов, не имеющих в составе благородных металлов, которые позволяют снизить перенапряжение реакций выделения кислорода (РВК) и водорода (РВВ) на электродах и, тем самым, понизить энергозатраты.

В докладе дается краткий обзор наиболее значимых современных результатов в области создания новых электрокатализаторов для электролиза воды как в кислой, так и щелочной среде и рассматриваются некоторые тенденции развития данной тематики. Основное внимание

уделяется их послойному синтезу с использованием приоритетного метода ионного наплавления (ИН) и синтезу с его использованием слоёв сложных оксидов иридия и оксигидроксида NiFeOH как электрокатализаторов в РВК, соответственно, в кислой и щелочной средах. Приводятся экспериментальные результаты, которые дали возможность сформулировать новый подход к поиску высокоэффективных электрокатализаторов, основанный на анализе их электрохимических характеристик в рядах слоёв, полученных в результате различного числа циклов ИН и выборе среди них оптимального числа [1, 2]. В качестве примера приводятся условия синтеза слоёв $\text{Cu}_{0,3}\text{IrO}_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$, которые характеризуются при электролизе в 1М растворе HClO_4 и токе 10 mA/cm^2 значением перенапряжения равным 256 мВ, а также слоёв $\text{Ni}_{0,2}\text{Fe}(\text{OOH})_x$ со значением перенапряжения при электролизе в 1 М растворе KOH и отмеченном токе равным 237 мВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 18-19-00370.

Литература:

1. Tolstoy V.P., Kuklo L.I., Gulina L.B., J. of Alloys and Comp., 2019, 786, 198-204.
2. Tolstoy V.P., Lobinsky A.A., Kaneva M.V., J. of Mol. Liq., 2019, 282, 32-38.

СТАТИЧЕСКИЕ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК СИСТЕМЫ Fe-Ti-B

Шефтель Е.Н.¹, Харин Е.В.¹, Теджетов В.А.¹, Усманова Г.Ш.¹,
Бобровский С.Ю.², Зезюлина П.А.², Розанов К.Н.²,
Кирюханцев-Корнеев Ф.В.³

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

²*Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва*

³*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

ekharin@imet.ac.ru

В настоящее время большое внимание исследователей направлено на создание магнитно-мягких плёнок для высокочастотных применений. Помимо высокой намагниченности насыщения M_s , такие плёнки должны иметь высокие значения магнитной проницаемости μ на высоких частотах вплоть до ГГц интервала. В этой связи важной характеристикой магнитно-мягких плёнок является поле магнитной анизотропии в плоскости плёнки

H_{eff} , от которого зависит значение частоты естественного ферромагнитного резонанса (еФМР) $f_r \sim (M_s H_{eff})^{1/2}$. Увеличив частоту f_r , можно увеличить диапазон с высокой μ .

В работе исследованы статические и высокочастотные свойства плёнок сплавов Fe-Ti-B и оценена роль параметров стохастической магнитной структуры в формировании высокочастотной магнитной проницаемости. Плёнки Fe-Ti-B получены магнетронным осаждением из мишеней, представлявших собой Fe диск с равномерно распределенными по нему чипами TiB₂, занимавшими 0, 5, 8 или 11% поверхности мишени. Осаждение велось в газовой атмосфере Ar при давлении 0,2 Па в течение 7-10 мин, напряжение на катоде 600 В, сила тока 1,5 А. В качестве подложек использовали пластины из покровного стекла. Все исследованные плёнки являются нанокристаллическими и содержат фазы α Fe и α Ti (2-3 об.%) с размером зерна 9-48 нм в зависимости от условий получения.

Коэрцитивная сила H_c и намагниченность насыщения M_s равны 18-53 Э и 950-1700 Гс, соответственно, в зависимости от условий получения (таблица 1). Статические магнитные свойства нанокристаллических ферромагнетиков объяснены в рамках модели случайной магнитной анизотропии [1, 2]: при размере ферромагнитного зерна $2R_c$ меньше длины обменного взаимодействия R_L , локальная (внутризеренная) эффективная энергия магнитной анизотропии K_{eff} становится подавленной на масштабе R_L , а свойства материала в слабых магнитных полях определяют образующиеся стохастические магнитные домены размером $2R_L$. Из кривых намагничивания в сильных полях определены параметры стохастической доменной структуры по методу корреляционной магнитометрии [2].

Полосковым методом [3] измерена комплексная магнитная проницаемость на частотах до 5 ГГц. Действительная магнитная проницаемость μ' плёнок сохраняет высокую величину на частотах f до нескольких сотен МГц. По частоте f_r рассчитано эффективное поле H_{eff} магнитной анизотропии, величина которого коррелирует с величиной среднеквадратичной флуктуации поля анизотропии стохастического домена $D^{1/2} \langle H_a \rangle$ (таблица 1). Этот факт косвенно означает, что еФМР возникает при колебаниях отдельных стохастических доменов.

Таблица 1. Параметры высокочастотной магнитной проницаемости исследованных плёнок

TiB ₂ , %	Время осад., мин	f_r , ГГц	μ'	f , ГГц	H_{eff} , Э	H_c , Э	$D^{1/2} \langle H_a \rangle$, Э	M_s , Гс

0	10	0,5	60	0,2	1,6	22±3	4,4±2,3	1460±1
0	7	3,1	50	1,3	52,7	53±3	4,2±3,9	1725±3
5	7	0,8	78	0,4	6,4	25±3	0,8±0,7	946±4
8	7	0,5	70	0,4	1,8	18±3	3,4±3,1	1287±2

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-03-00502а).

1. G. Herzer, Acta Materialia, 61 (2013) 718-734.
2. S.V. Komogortsev, R.S. Iskhakov, J. Magn. Magn. Mat., 440 (2017) 213-216.
3. S.N. Starostenko, K.N. Rozanov, J. Commun. Technol. Electron., 58 (2013) 1076-1084.

**АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ,
ЛЕГИРОВАННЫЕ ХРОМОМ – НАНОКОМПОЗИТНАЯ
СТРУКТУРА И ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ В
УСЛОВИЯХ СУХОГО И ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ**

Хрущов М.М.¹, Буяновский И.А.¹, Марченко Е.А.¹, Самусенко В.Д.¹,
Антонова О.С.^{1,2}

¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
michel_x@mail.ru*

Приведены результаты изучения вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий, легированных хромом, направленных на выявление механизмов, определяющих особенности трения и износа в условиях сухого и частично смазанного фрикционного контакта. Показано, что в легированных углеродных покрытиях значительное влияние на трибологическое поведение в условиях сухого трения оказывают особенности микро- и нанокomпозитной структуры и характер распределения углеродной фазы, как, например, в случае алмазоподобных покрытий, легированных хромом (рис. 1).

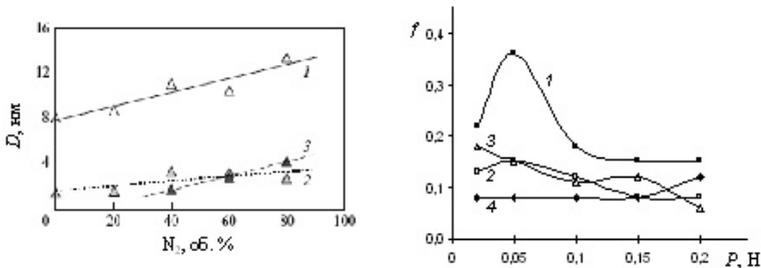


Рис. 1. Зависимости: (а) размера областей когерентного рассеяния металлической (1), карбидной (2) и нитридной (3) фаз хрома, образующихся в покрытиях, от объемного содержания азота в смеси ацетилен-азот; (б) коэффициента трения от нагрузки в покрытиях, полученных в чистом ацетилене (1) и смеси, содержащей 20 (2), 60 (3) и 80 (4) об. % азота.

В условиях же граничной смазки основная роль легирующих элементов связана с особенностями их трибохимического взаимодействия со смазочной средой [1].

Проведенные трибологические испытания покрытий, легированных хромом показали (рис. 2), что в отличие от покрытий, легированных Мо и W, введение в базовое масло присадок, в том числе химически активных (ДФ-11) не приводит к снижению трения, что можно связать с отсутствием у хрома халькогенидов с низким сопротивлением сдвига.

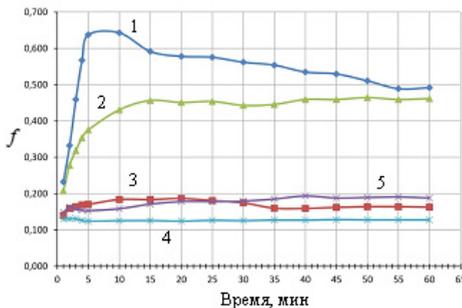


Рис. 2. Результаты трибологических испытаний стальных роликов с алмазоподобным покрытием, легированным хромом, на машине трения КТ-2 в паре со сталью ШХ-15:

1 – покрытие без смазки, 2 – материал основы (сталь ШХ-15) без покрытия со смазкой ПАО-4; 3 – покрытие со смазкой ПАО-4; 4 – покрытие со смазкой ПАО-4 + 1 % олеиновой кислоты, 5 – покрытие со смазкой ПАО-4 + 2 % ДФ-11.

Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку (проект № 19-08-01011).

1. Колубаев А.В., Белый А.В., Буяновский И.А. и др. // Изв. ВУЗ. Физика. 2019. Т.62. № 8. С.52-83.

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ СВЕРХУПРУГОГО
ТВЕРДОГО УГЛЕРОДА ИЗ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ
ФУЛЛЕРИТОВ ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Черногорова О.П., Дроздова Е.И., Лукина И.Н., Екимов Е.А.,

Прокопенко Д.А., Апостолова М.О.

ИМЕТ РАН, Москва, tchern@ultra.imet.ac.ru

Структура и свойства продуктов превращения фуллерита C_{60} при нагреве под давлением 8 ГПа в интервале температур, соответствующих области перехода из полимеризованного состояния в сверхупругую твердую нанокластерную графеновую фазу (750 - 850°C), исследованы методами оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа, высокоразрешающей спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и динамического микроинdentирования. Предварительная обработка фуллеритов C_{60} в шаровой мельнице в течение 8 и 12 час способствует измельчению порошка и повышает его удельную поверхность от ~3 до ~10 и 13 г/м³, соответственно. Значительное уменьшение областей когерентного рассеяния на рентгенограммах механоактивированного порошка наблюдается уже после обработки продолжительностью один час; с увеличением времени обработки средний размер областей когерентного рассеяния практически не меняется, тогда как величина микродеформации существенно возрастает. Повышение времени механоактивации от 8 до 12 часов снижает температуру окончательного коллапса фуллереновых молекул от 850 до 800°C при кратковременной выдержке (30 сек.) под давлением. Механоактивация исходных фуллеритов C_{60} в течение 12 час повышает твердость indentирования H_{IT} углеродных частиц, армирующих композиционные материалы на основе Со (синтез при температурах 800-850°C под давлением 8 ГПа), от 16-18 до 31-39 ГПа, а модуль indentирования E_{IT} соответственно возрастает от 105 до 277 ГПа. При этом сохраняется сверхупругость углеродной фазы: упругое восстановление при indentировании снижается незначительно, от 88-90 до 79-84%. Сверхупругое сверхтвердое состояние углеродной фазы достигается только при полном исчезновении полимеризованных фуллеритов в структуре углерода и, соответственно, при полном отсутствии фуллереновых пиков на спектрах КРС. Установлено, что зарождение нанокластерной графеновой фазы в фуллеритах C_{60} преимущественно начинается в областях наибольшей плотности дефектов кристаллической решетки, то есть в полосах сдвига исходного ГЦК кристалла.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРА
НАНОКРИСТАЛЛА ТАНТАЛА

Магомедов М.Н.

*Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал
объединенного института высоких температур РАН, Махачкала
mahmag4@mail.ru*

Для изучения свойств нанокристалла тантала (Ta), имеющего объёмно-центрированную кубическую (ОЦК) структуру, и состоящего из N атомов использовался формализм RP-модели предложенный в [1]. Для реализации этого формализма необходимо определить параметры парного межатомного потенциала Ми-Леннард-Джонса, который имеет вид:

$$\varphi(r) = \frac{D}{(b-a)} \left[a \left(\frac{r_0}{r} \right)^b - b \left(\frac{r_0}{r} \right)^a \right], \quad (1)$$

где D и r_0 – глубина и координата минимума потенциала, $b > a > 1$ – численные параметры.

В данной работе предложена новая методика определения параметров потенциала (1) D , b и a , при фиксированных значениях r_0 и молярной энергии сублимации (L_{00}) макрокристалла. Методика была проверена на ОЦК-Fe и ГЦК-Au и показала хорошие результаты. Для ОЦК-Ta при $L_{00} = 785.608 \pm 4.184$ [2] были получены значения (k_B – постоянная Больцмана): $r_0 = 2.8648 \times 10^{-10}$ м, $D/k_B = 23701.02$ К, $b = 7.92$, $a = 3.13$.

Использование этих параметров при расчете свойств макрокристалла ОЦК-Ta показало хорошее согласие с экспериментальными данными. Были рассчитаны следующие свойства макрокристалла: $P(v, T)$ – термическое уравнение состояния, Θ – температура Дебая, $\gamma = -[\partial \ln(\Theta)/\partial \ln(v)]_T$, $q = [\partial \ln(\gamma)/\partial \ln(v)]_T$ и $z = -[\partial \ln(q)/\partial \ln(v)]_T$ – первый, второй и третий параметры Грюнайзена, $B_T = -v(\partial P/\partial v)_T$ – модуль упругости, $B'(P) = (\partial B_T/\partial P)_T$ – производная модуля упругости по давлению вдоль изотермы, C_v – изохорная и C_p – изобарная теплоемкости, $\alpha_p = [\partial \ln(v)/\partial T]_p$ – коэффициент теплового расширения, σ – удельная (на единицу площади) поверхностная энергия грани (100), $\sigma'(T)_v$ – изохорная и $\sigma'(T)_p$ – изобарная производные σ по температуре, μ_p – коэффициент Пуассона. Здесь T – температура, $v = V/N$ – удельный объем, $c = (6k_p v/\pi)^{1/3}$ – среднее расстояние между центрами ближайших атомов, k_p – коэффициент упаковки структуры: $k_p(\text{ОЦК}) = 0.6802$.

Показано, что при изобарическом ($P = 0$) переходе от макро- к нанокристаллу ОЦК-Та уменьшаются значения следующих свойств:

Θ , q , z , B_T , $\sigma(100)$, а также и величина температуры плавления T_m .

При этом увеличиваются значения других свойств:

$$\nu, \gamma, B'(P), \alpha_p, C_\nu, C_p, \Theta'(P) = (\partial\Theta/\partial P)_T, |C_\nu'(P)|, |\alpha_p'(P)|, |C_p'(P)|, \\ X_{sc} = \sigma/(c \cdot B_T), \mu_p, |\sigma'(T)_\nu|, |\sigma'(T)_P|, \sigma'(P)_T = (\partial\sigma/\partial P)_T.$$

Замечено, что при переходе от макро- к нанокристаллу слабо изменяются свойства:

$$\nu, \gamma, z, B'(P), \alpha_p \cdot B_T = (\partial P/\partial T)_\nu, C_\nu, C_p, C_\nu'(P), \sigma(100), \mu_p,$$

поэтому в расчетах при $P = 0$ можно не учитывать размерную зависимость указанных свойств, и использовать их значения, полученные для макрокристалла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 18-29-11013_мк и Программы Президиума РАН (программа б, грант 2-13).

1. Magomedov M.N. Change in Thermodynamic Properties of a Germanium Nanocrystal with a Decrease in its Size under Various P - T -conditions // Nanotechnologies in Russia. 2019. Vol. 14. N 1-2. P. 21-32. DOI: 10.1134/S1995078019010063

2. Электронная база данных: <http://www.chem.msu.su/cgi-bin/tkv.pl>.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИНДИЯ

Норченко Е.К., Семенча А.В., Батурова Л.П.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, lpbat@yandex.ru

Покрытия на основе оксида индия и олова (ИТО), обладая высокой электропроводимостью и прозрачностью в видимом диапазоне длин волн, находят широкое применение в качестве прозрачного проводящего подслоя при изготовлении различных датчиков или электрохромных индикаторных устройств.

Методом циклической вольтамперометрии в работе проведено сравнение электрохимических и оптических свойств ИТО покрытий, нанесенных на стеклянные подложки методом магнетронного распыления, в растворах с различным значением рН в широком интервале потенциалов. Коэффициенты пропускания $T(\lambda)$ определяли по спектрам пропускания с помощью компактного спектрометра USB-650 Red Tide в диапазоне длин

волн от 150 до 1000 нм на длине волны $\lambda=550$ нм. Коэффициент пропускания T_0 исходных пленок ИТО толщиной 0,21 мкм и сопротивлением 20 Ом/см² составлял 83%.

Снятие катодной ветви вольтамперной кривой (ВАК) в безводном 1 М растворе КОН в этаноле в интервале потенциалов от $E_{исх}$ до -2.0 В со скоростью развертки потенциала 10 мВ/с показало, что пленки ИТО устойчивы в данном интервале потенциалов и характеризуются широкой областью идеальной поляризуемости. Коэффициент пропускания пленок ИТО после катодной поляризации имеет исходное значение и составляет 83%. Добавка воды (6 г H₂O на 100 мл раствора) в 1 М раствор КОН в этаноле привела к появлению на катодной ветви ВАК области, связанной с разрядом ионов водорода, и окрашиванию пленок ИТО в темно-коричневый цвет при потенциале -1,8 В. Коэффициент пропускания пленок T_x в состоянии окрашивания составил 7,6%.

В водном 1М растворе КОН окрашивание пленок ИТО в условиях катодной поляризации наблюдается при более положительном потенциале (-1,45 В) и сопровождается резким возрастанием сопротивления пленки и замедлением релаксационных процессов, обеспечивающих обесцвечивание пленки ИТО. Коэффициент пропускания T_x пленок ИТО в состоянии окрашивания в водном растворе КОН составил 18,4%. Добавка в 1М раствор КОН фуллеренола (0,2% C₆₀ОН) привела к повышению проводимости пленок ИТО, формируемых в условиях окрашивания при катодной поляризации вследствие внедрения углерода и фуллеренсодержащих частиц (фуллеритов и C₃₂H₄₈O₉) в пленку. Коэффициент пропускания пленки T_x снизился примерно в два раза до 9,8%. Обесцвечивания пленок ИТО на анодной ветви ВАК не происходит. Пленки ИТО в водном в 1М растворе КОН не обладают электрохромными свойствами.

В нейтральных растворах (в 3%-ном растворе NaCl; pH6,8) пленки ИТО в условиях катодной поляризации окрашиваются в коричневый цвет при потенциале -1,36 В, а обесцвечиваются на анодной ветви ВАК при 1,49 В, т.е. проявляют электрохромные свойства. Коэффициент пропускания пленки ИТО в 3%-ном растворе NaCl в состояниях окрашивания и обесцвечивания составил 6,8 и 64,4% соответственно.

Таким образом, природа и состав электролита оказывают существенное влияние на функциональные свойства ИТО покрытий.

**ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПОТМЕХАНИЗМУ ФРАНКА–ВАН ДЕР МЕРВЕ**

Войцеховский А.В., Лозовой К.А., Винарский В.П., Дирко В.В.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск*

lka@sibmail.com

Графеноподобные материалы с двумерной шестиугольной решеткой привлекают повышенное внимание исследователей последние несколько лет в связи с их экзотическими электронными и оптическими свойствами, обусловленными практически нулевой запрещенной зоной, малостью эффективных масс и такой же симметрией как у графена [1]. Уникальные свойства графеноподобных 2D-материалов делают возможным создание на их основе совершенно новых типов приборов: топологических транзисторов, высокочувствительных газовых сенсоров, энергоемких источников питания, термоэлектрических генераторов, квантовых компьютеров [2, 3].

Основным методом синтеза двумерных материалов является их формирование из неравновесных гетероэпитаксиальных систем в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии [4]. Для всевозможных применений в современной нано- и оптоэлектронике необходимо создавать гетероструктуры с двумерными слоями с различными свойствами. В случае формирования двумерных кристаллов определяющее значение имеют толщина слоя материала, шероховатость поверхности, распределение упругих напряжений, наличие или отсутствие дефектов. При этом критически важным оказывается именно количество и качество осажденных монослоев, так как это определяет, например, возможность реализации в таком материале сверхпроводимости и топологических свойств [5]. Поэтому в настоящее время работы по созданию приборов нового поколения на основе двумерных кристаллов находятся на стадии отработки технологии получения таких двумерных структур, выбора подложки, сурфактантов, последовательности нанесения слоев.

В настоящей работе проводится анализ особенностей эпитаксиального синтеза двумерных материалов на различных подложках по механизму Франка–ван дер Мерве. Рассматриваются различные стадии формирования двумерного слоя толщиной от одного до нескольких монослоев, а также появления двумерных островков. Особое внимание уделяется установлению возможностей преодоления нуклеации островков и предотвращения нежелательного перехода от двумерного к трехмерному росту. Результаты работы непосредственно применимы для оптимизации условий синтеза таких структур и создания на их основе новых приборов с необходимыми характеристиками для наноэлектроники и нанофотоники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-72-00019.

1. Cahangirov S., Sahin H., Lay G.L., Rubio A. Introduction to the Physics of Silicene and other 2D Materials. Springer, 2016. 96 p.

2. Ezawa M., Le Lay G. Focus on silicene and other 2D materials // New Journal of Physics. – 2015. – V. 17. – P. 090201 (1–3).

3. Tao L., Cinquanta E., Chiappe D., Grazianetti C., Fanciulli M., Dubey M., Molle A., Akinwande D. Silicene field-effect transistors operating at room temperature // Nature Nanotechnology. – 2015. – V. 10. – P. 227–231.

4. Molle A., Goldberger J., Houssa M., Xu Y., Zhang S.-C., Akinwande D. Buckled two-dimensional Xene sheets // Nature Materials. – 2017. – V. 16. – P. 163–169.

5 Li X., Tao L., Chen Z., Fang H., Li X., Wang X., Xu J.-B., Zhu H. Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics // Applied Physics Review. – 2017. – V. 4. – P. 021306 (1–31).

МНОГОСЛОЙНЫЕ УНИПОЛЯРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ HgCdTe ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Войцеховский А.В.¹, Несмелов С.Н.¹, Дзядух С.М.¹, Дворецкий С.А.^{1,2}, Михайлов Н.Н.², Сидоров Г.Ю.², Каширский Д.Е.¹, Горн Д.И.¹, Лозовой К.А.¹, Дирко В.В.¹

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, Томск, yav43@mail.tsu.ru*

²*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, ifp@isp.nsc.ru*

Полупроводниковые детекторы инфракрасного диапазона, необходимые для решения ряда военных и гражданских задач, можно разделить на тепловые и фотонные детекторы. Достоинством тепловых детекторов (например, микроболометров) является чувствительность в широком спектральном диапазоне и относительно низкая стоимость. Лучшие пороговые характеристики обеспечивают фотонные детекторы, которые обычно требуют глубокого охлаждения для уменьшения некоторых видов шумов. Важной задачей разработчиков инфракрасной техники является повышение рабочей температуры фотонных детекторов, поскольку необходимость создания фотоприемных устройств третьего поколения предъявляет повышенные требования к массогабаритным показателям таких приборов. Новые возможности повышения рабочей

температуры предоставляет реализация униполярных барьерных детекторов, в которых формируется наноразмерный потенциальный барьер для носителей заряда только одного типа. Наибольшие практические достижения при создании таких детекторов достигнуты при использовании материалов III-V с постоянной решеткой 6.1 Å (например, на основе систем InAsSb/AlAsSb, InAs/GaSb), что связано с благоприятной структурой энергетических зон. Униполярные барьерные детекторы на основе HgCdTe имеют ряд потенциальных преимуществ, но для их практической реализации необходимо решить ряд технологических проблем, поэтому попыток создания таких детекторов пока немного.

В докладе описана технология создания униполярных барьерных систем на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из GaAs(013), а также представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик и адмиттанса изготовленных приборных *nVn*-структур. При эпитаксиальном выращивании формировались заданные распределения компонентного состава и концентрации донорной примеси. Состав в барьерном слое толщиной 210 нм был близок к 0.84. Состав в поглощающем слое ($x=0.36$) обеспечивал возможность детектирования в спектральном диапазоне окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм. Для пассивации использованы пленки Al₂O₃, полученные методом плазменного атомно-слоевого осаждения. Изготовленные *nVn*-структуры имели различные меза диаметры – от 20 до 500 мкм, что позволило определить доминирующие компоненты темнового тока в различных условиях. Установлено, что в диапазоне температур 180–300 К реализуется диффузионное ограничение темнового тока, а экспериментальные значения темнового тока хорошо согласуются с результатами расчета в рамках эмпирической модели «Rule07». Значения темновых токов для изготовленных *nVn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe оказались близки к значениям темновых токов для лучших детекторов на основе материалов III-V или MOCVD HgCdTe. Показано, что измерения адмиттанса очень информативны при изучении свойств реальных многослойных униполярных систем на основе МЛЭ HgCdTe.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00135).

ИМПЕДАНС ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ С ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЕЙ

Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Копылова Т.Н.,
Дегтяренко К.М.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет.
Томск*

vav43@mail.tsu.ru

Для практической реализации потенциальных преимуществ ряда приборов органической электроники [1] необходимо детальное изучение электрических свойств многослойных органо-неорганических систем, поэтому актуальной является развитие электрофизических методик применительно к новым объектам исследования. Одним из неразрушающих и высокоинформативных методов изучения свойств многослойных систем является измерение импеданса (или адмиттанса) в широком диапазоне условий [2]. При создании эффективных органических светоизлучающих диодов (ОСИД) перспективно использование новых типов слоев с термически активированной замедленной флуоресценцией (TADF-слоев) [3].

В докладе представлены результаты исследования импеданса многослойной структуры ITO/PEDOT:PSS/ α -NPD/TADF-слой/BCP/LiF/Al), в которой в качестве анода используется смесь диоксидов индия и олова (ITO), слой PEDOT:PSS и α -NPD предназначены для инжекции и транспорта дырок, органический материал BCP использован для формирования электрон-транспортного и холл-блокирующего слоя, катод состоит из слоев LiF и Al, а эмиссионный TADF-слой толщиной 50 нм создавался из материала Як-203 [4, 5]. Измерения импеданса проводились при использовании автоматизированной установки на основе неоптического криостата Janis, контроллера температуры Lake Shore и измерителя иммитанса Agilent E4980A. Измерения импеданса проводились в частотном диапазоне от 100 Гц до 2 МГц при температурах от 10 до 310 К.

Измерения вольт-фарадных характеристик показали, что исследованные ОСИД-структуры являются приборами, действующими на носителях заряда обоих типов. При помощи графиков Коула-Коула, построенных при различных температурах и напряжениях, установлено, что при больших прямых смещениях импеданс ОСИД-структуры определяется только одним релаксационным процессом, а при малых смещениях – несколькими релаксационными процессами. Экспериментальные частотные зависимости импеданса хорошо

согласуются с результатами расчета при использовании метода эквивалентных схем. При моделировании использовалась эквивалентная схема типа CR-CR-CR-CR, в которой отдельные CR-контура отражают свойства квазинейтральных и обедненных слоев в ОСИД-структуре. При различных температурах определены зависимости значений CR-элементов эквивалентной схемы от напряжения смещения. Найденны зависимости толщин обедненных и квазинейтральных слоев от напряжения смещения. Полученные результаты хорошо согласуются с данными теоретической работы [6]. Разработанные способы электрофизической диагностики могут использоваться для оптимизации технологических циклов создания многослойных систем для эффективных ОСИД.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проекта № 18-43-700005.

Список литературы:

1. Wu S., Li S., et al. // Sci. Reports. 2016. V.6. P.25821.
2. Voitsekhovskii A.V., et al. // Thin Solid Films. 2019. V.692. P.137622.
3. Endo A., Ogasawara M., et al. // Adv. Mater. 2009. V.21. P.4802.
4. Voitsekhovskii A.V., Nsmelov S.N., et al. // Russ. Phys. J. 2019. V.62. P.306.
5. Voitsekhovskii A.V., et al. // Phys. Stat. Sol. A. 2020. 10.1002/pssa.201900847.
6. Nguyen N.D., Schmeits M. // Phys. Stat. Sol. A 2006. V.203(8). P.1901.

ТОНКИЕ ФОЛЬГИ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЯ С САМАРИЕМ ДЛЯ ДИФУЗИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

Горбунов С.В., Г.С. Бурханов, Кольчугина Н.Б., Рошан Н.Р.,
Филимонов Г.А.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, roshanat@mail.ru; merciles@mail.ru

Сплавы палладия с самарием представляют несомненный научный интерес с точки зрения влияния специфической структуры самария (утроенная примитивная гексагональная типа Sm) на свойства палладия. Образование широкой области твердых растворов на основе палладия (до 12 ат. %) делает их перспективными материалами для мембранных катализаторов и мембран глубокой очистки водорода и разделения газовых смесей.

В работе исследованы механические свойства и водородопроницаемость фольги толщиной 50 мкм сплавов палладия с самарием в области твердого раствора. Результаты исследований представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Вариации представленных характеристик обсуждаются с точки зрения того, что показатели прочности, пластичности и водородопроницаемости тонких металлических фольг особенно чувствительны к изменениям концентрационной неомогенности сплава на уровне наноструктуры материала, а гидрирование тонких фольг приводит к изменению этих характеристик за счет возникновения областей упорядочения, активизации диффузионных перемещений атомов и миграции границ зерен. С увеличением содержания самария в сплаве повышается его прочность при сохранении пластичности и растет скорость переноса водорода [1].

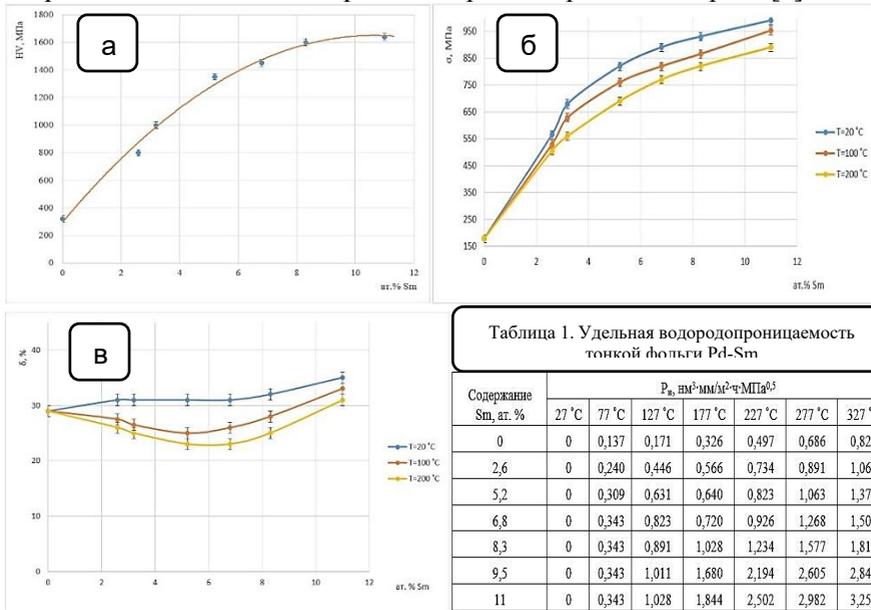


Таблица 1. Удельная водородопроницаемость тонкой фольги Pd-Sm

Содержание Sm, ат. %	$P_2, \text{nm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{MPa}^{0.5}$						
	27 °C	77 °C	127 °C	177 °C	227 °C	277 °C	327 °C
0	0	0,137	0,171	0,326	0,497	0,686	0,823
2,6	0	0,240	0,446	0,566	0,734	0,891	1,063
5,2	0	0,309	0,631	0,640	0,823	1,063	1,371
6,8	0	0,343	0,823	0,720	0,926	1,268	1,508
8,3	0	0,343	0,891	1,028	1,234	1,577	1,817
9,5	0	0,343	1,011	1,680	2,194	2,605	2,845
11	0	0,343	1,028	1,844	2,502	2,982	3,257

Рисунок 1 – Зависимости (а) твердости, (б) предела прочности и (в) относительного удлинения от состава сплавов Pd-Sm.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, Соглашение № 075-15-2019-1871 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0244).

[1] О.В. Акимова, Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2020, №1, СС. 68-73.

ВЛИЯНИЕ РАЗРУШАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НАНЕСЕНИИ ЗАЩИТНЫХ НАНОПЛЕНОК

Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Гылымбеков М.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

kiruhancev-korneev@yandex.ru

В процессе эксплуатации солнечных элементов (СЭ) подвергаются воздействию абразивных микрочастиц. Для их защиты могут быть применены оптически-прозрачные твёрдые износостойкие покрытия. Покрытия с повышенными эксплуатационными характеристиками является перспективным направлением в области материаловедения. Однако при нанесении подобных покрытий тонкая структура СЭ может быть повреждена на различных технологических стадиях подготовки поверхности и осаждения слоя, таких как ультразвуковая обработка, нагрев и ионная бомбардировка. Данная работа посвящена установлению закономерностей таких воздействий и поиску наиболее мягких режимов, сохраняющих нанорельеф и состав в СЭ.

В работе применялись пластины СЭ на основе Si и Ag площадью 2x2 см. Ультразвуковые воздействия осуществлялись в диспергаторе типа УЗДН-2Т при следующих режимах: 1-10 циклов по 10 минут, частота 22 кГц, среда C₃H₈O. Ионную очистку образца проводили на установке УВН-2М, оснащённой магнетронами и ионным источником щелевого типа. Время очистки 1-60 мин, сила тока 60-70 мА, напряжение 2-2,5 кВ, ионы Ag⁺. Исследования СЭ на стойкость к высоким температурам проводились с помощью нагрева в муфельной печи марки Snol 7,2/1200 при температурах 20-300°C. После испытаний на абразивный износ и отжигов образцы СЭ взвешивались на весах AND GR-202 и исследовались в режимах plan-view и cross-section на растровом электронном микроскопе марки Hitachi S-3400, оснащённом энерго-дисперсионным спектрометром Noran-7 Thermo. Оптическая микроскопия проводилась в универсальном флуоресцентном микроскопе Zeiss Axio Imager A1.

После испытаний в режимах ультразвуковых воздействий и ионной бомбардировки наблюдалось незначительное снижение массы. После ультразвука общая потеря массы составила 0,262 мг. В то же время после ионной очистки масса образца снизилась на 5,32 мг. Большее снижение массы в случае ионной очистки обусловлено существенным воздействием на поверхность образца ионов Ag⁺. Скорость потери массы составила в случае ультразвука 0,0029 мг/мин, для ионной очистки - 0,0886 мг/мин.

Таким образом потеря массы не превышает 1,5%. Испытания на отжиг показали хорошую стойкость образца к температурам 20-300°C. Установлено, что при температуре 300°C структура и состав СЭ не изменяется. Было отмечено, что после ионной очистки цвет СЭ образца изменился от синего до бледно серого. Это было связано с изменением состава: в исходном слое SiO₂ фиксировалась концентрация кислорода на уровне >13 ат. %, тогда как после травления содержание его было ниже предела обнаружения электронного микроскопа. При исследовании поперечных изломов было установлено, что высота токосъёмников из серебра после ионной очистки в среднем уменьшилась с 13-15 до 10-12 мкм, при том, что их ширина не изменилась. Слой оксида кремния толщиной 2-3 мкм полностью протравился после ионной очистки. Установлено также, что при ультразвуковой обработки оксид кремния остается на поверхности СЭ. В качестве рекомендаций выбран режим: оптимальное время ультразвукового воздействия 2-5 мин и ионной очистки 2-3 мин. Показано, что для каждого типа СЭ необходима отдельная оптимизация времени и условий обработки в зависимости от толщины и состава поверхностных структур СЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00187).

ЭФФЕКТ ОЧИСТКИ И НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕМБРАННОЙ ФОЛЬГИ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Иевлев В.М.¹, Донцов А.И.^{2,3}, Морозова Н.Б.², Рошан Н.Р.¹,
Прижимов А.С.², Горбунов С.В.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

²*Воронежский государственный университет, Воронеж*

³*Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

DontAlex@mail.ru

Наряду с элементарным составом, структурой и субструктурой фольги следует учитывать состояние ее поверхности (элементарный состав, морфология), которое в большинстве работ не обсуждается. Задачи очистки мембранной фольги и поиск способов оперативного контроля состояния ее поверхности следует признать актуальными.

Цель работы – оценить эффективность ионно-лучевого распыления в очистке поверхности мембранной фольги твердого раствора системы Pd-Cu, полученной методом прокатки.

Образцы фольги толщиной 20 мкм твердого раствора состава Pd-52 ат.% Cu, обеспечивающего обратимость процессов упорядочение-разупорядочение [1], получены методом холодной прокатки с последующим отжигом при 850С. Ионно-лучевую обработку (ИЛО) поверхности фольги проводили в течение 30 минут в среде Ar (10^{-1} Па), исходный вакуум – 10^{-3} Па. Элементный состав поверхности образцов оценивали методом оже-электронной спектроскопии (анализатор DESA-100) [2]. Морфологию поверхности исследовали методом атомно-силового микроскопии (АСМ, Solver Pro EC). Оценку эффективности обработки фольги проводили методом циклической вольтамперометрии.

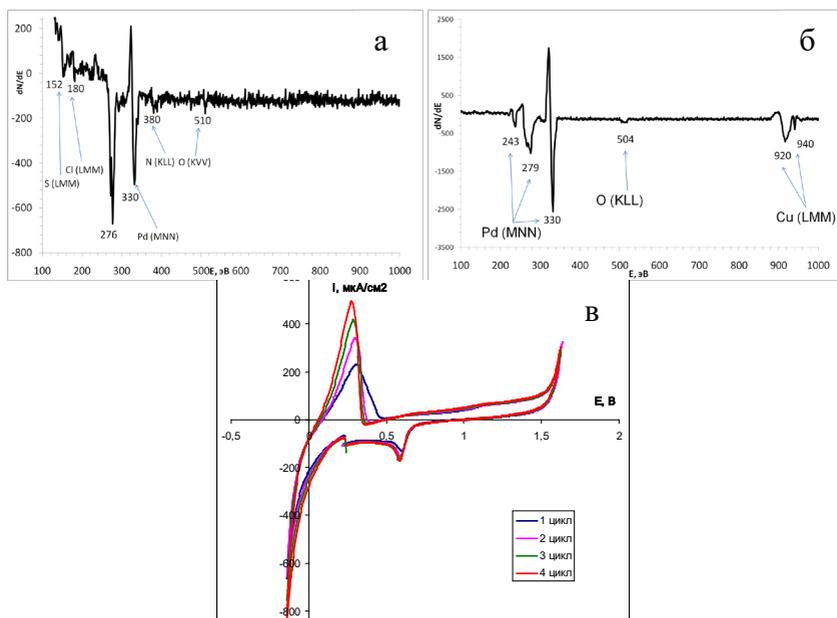


Рисунок 1 – Оже-электронные спектры и вольтамперограммы исходной поверхности фольги (а) после ИЛО (б,в).

Рельеф поверхности отражает следы деформации, а так же наличие на ней других артефактов процесса прокатки и последующей термообработки, регистрируемых методом оже-электронной спектроскопии. По данным вольтамперометрии поверхность нечувствительна к циклированию потенциала, коэффициент диффузии при инъекции водорода не превышает $D - 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В результате ИЛО происходит полное освобождение поверхности от артефактов прокатки, увеличение шероховатости, средней и максимальной

высоты рельефа. Выход к элементному составу фольги достигается на глубине более 0,3 мкм. Оценка коэффициента диффузии показывает, что он увеличивается в 1,5 раза ($D = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), что можно объяснить увеличением концентрации активных центров сорбции водорода вследствие очистки поверхности и увеличением эффективной площади поверхности фольги на 50%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00232).

Список литературы:

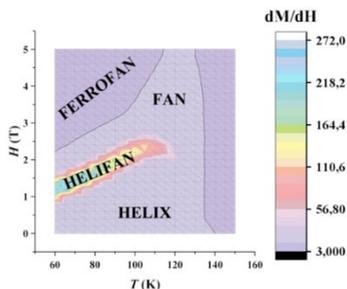
1. Иевлев В.М. и др., // Неорганические материалы, – 2017, – Т. 53, № 11, с. 1181–1188.
2. L. E. Davis, N. C. MacDonald, P. W. Palmberg, G. E. Rich and R. E. Weber (Eds.), Handbook of Auger Electron Spectroscopy, Physical Electronics Industries, Inc., 1976.

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ГОЛЬМИЯ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Коплак О.В., Дремова Е.В.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

При исследовании тонкой пленки гольмия на сверхпроводящем квантовом интерферометре при поле, ориентированном вдоль оси легкого намагничивания, были обнаружены, кроме перехода второго рода - из парамагнитного состояния в ферромагнитное, еще несколько переходов второго рода (рис. 1).



Рисинук 1 – Фазовая диаграмма

Для детального изучения был выбран переход FAN -> FERROFAN с помощью методов модифицированных кривых Арротта (МАР) и Коуля-Фишера, которые заключаются в определении критических показателей перехода. МАР заключается в нахождении критических показателей β , γ непосредственно через их связь с спонтанной намагниченностью и обратной начальной магнитной восприимчивостью

$$M_s = (-\tau)^\beta, \chi_0^{-1} = \frac{h_0}{M_0} \tau^\gamma,$$

где $\tau = \frac{(T-T_c)}{T_c}$. Метод Коуля-Фишера считается более точным, так как применяется дифференцирование

$$M_s(T) \frac{dM_s}{dT} = \frac{T - T_c}{\beta}, \chi_0^{-1}(T) \left(\frac{d\chi_0^{-1}}{dT} \right)^{-1} = \frac{T - T_c}{\gamma}$$

В результате проведенных вычислений (рис.2) критические показатели оказались приближенными к трикритической Лифшицевской модели.

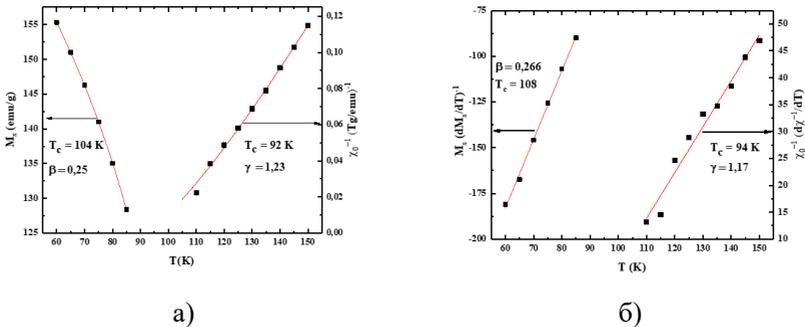


Рисунок 2 – а) метод МАР, б) метод Коуля-Фишера

Расчет критического показателя изотермы с помощью нескольких методов $d(d > 5)$ подтвердил полученные данные.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПЛЕНКАХ НИОБАТА
ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ВЧМР**

Дыбов В.А.¹, Касьянов А.К.², Белоногов Е.К.^{1,3}

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж

²АО "Корпорация НПО "РИФ", Воронеж

³Воронежский государственный университет, Воронеж

dybovvlad@gmail.com

В настоящее время пленки ниобата лития (НЛ) являются перспективным функциональным материалом для применения в различных типах устройств (таких как: оптические устройства на основе волноводов, акустические устройства на ПАВ, ячейки энергонезависимой памяти и др.), при условии внедрения их в современную планарную технологию, базирующуюся на Si [1]. Для таких применений к пленкам НЛ предъявляется множество требований, основное из которых целостность пленки. Для создания кристаллических текстурированных пленок НЛ, напыление проводят при высоких температурах, предположительно, нарушение целостности пленки наступает вследствие разницы величин ТКЛР пленки и подложки. Цель работы - установление природы возникновения трещин и количественной оценки возникающих напряжений в процессе наращивания пленок НЛ на подогреваемой подложке в условиях ВЧМР.

В работе получены пленки НЛ толщиной 300 нм в процессе высокочастотного магнетронного распыления (ВЧМР) мишени из монокристаллического НЛ и последующего осаждения на подложки из монокристаллического Si и НЛ при $T=550^{\circ}\text{C}$. Мощность на мишени ВЧМР составляла 50 Вт, в качестве рабочего газа использовался Ag. После нанесения образцы остывали со скоростью $\sim 20^{\circ}\text{C}$ в мин. Рельеф поверхности пленок исследовали методом растровой электронной микроскопии.

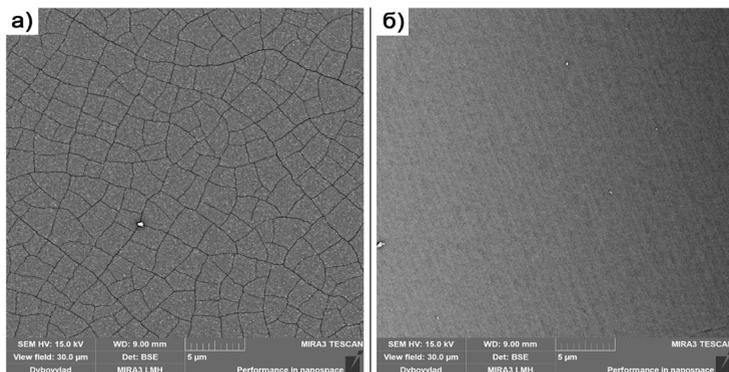


Рисунок 1 – РЭМ изображение поверхности покрытий, полученных в процессе ВЧМР мишени ниобата лития и нанесения на монокристаллические подложки (001) Si (а) и (Z-срез) ниобата лития (б) при $T=550^{\circ}\text{C}$

Было установлено (сравни рисунки а, б):

- на монокристаллической подложке НЛ рельеф пленки НЛ повторяет исключительно рельеф подложки без дополнительных неоднородностей морфологического характера;

- на монокристаллической подложке Si рельеф пленки НЛ характеризуется сеткой трещин с линейной плотностью $0,55 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Исходя из размера трещин и их плотности для известной толщины слоя, проведена оценка предельной прочности пленки НЛ на поверхности Si, которая не превышает $\sim 0,6 \times 10^9$ Па. По данным рентгеновской дифрактометрии, в пленках НЛ на обоих подложках отсутствуют макро- и микронапряжения. Таким образом, формирование трещин обусловлено исключительно большой разницей величин ТКЛР пленки и кремниевой подложки. Вместе с тем, открывается возможность использования дефектного (с трещинами) подслоя из НЛ для наращивания на нем нового слоя НЛ, для которого вероятность растрескивания будет меньше.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11062 мк).

Литература:

1. Sumets M.P., Dybov V.A., Ievlev V.M. LiNbO3 films: Potential application, synthesis techniques, structure, properties // Inorg. Mater. 2017. Т. 53. № 13. С. 1361–1377.

ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ БЕЛЫХ СЛОЁВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ

Жаворонкова Е.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк
gromov@physics.sibsiu.ru, sarychev_vd@mail.ru,
katerina.zhavoronkova@mail.ru

Белый слой – наноструктурное покрытие (размерный диапазон: 50 нм – 4 мкм [1]), которое образуется на рельсовой поверхности при её эксплуатации. В статье [2] подробно описаны возможные гипотезы образования этих слоёв, но их природа образования пока остается мало изученной. В данной работе приведен литературный обзор современного состояния вопроса, касающийся природы формирования белых слоёв при эксплуатации рельсов.

Белый слой [3–7], возникающий в результате контакта рельс / колесо, является общей микроструктурной особенностью, сформированной на поверхности рельса, и часто связан с повреждением от усталости при контакте качения. Во время эксплуатации рельса часть исходной перлитной микроструктуры на его поверхности превращается в мартенситную. Под оптическим микроскопом после травления шлифа раствором азотной кислоты в этаноле новая структура обычно выглядит как белый слой толщиной 10–20 мкм.

В работе [1] был проведен анализ белого слоя с помощью просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии, после чего была обнаружена сложная многослойная структура белого слоя. Микроструктура, включающая белый слой вблизи поверхности рельса, состоит из мартенсита с нано-двойниковым соединением с высокой плотностью дислокаций. Нижняя сторона белого слоя (с высокой плотностью дислокаций) состоит из феррита и нетрансформированного цементита.

Деформация играет второстепенную роль в формировании белого слоя. Это было выяснено после того, как сравнили [1] ближний порядок непосредственно в белом слое и перлите сразу же под белым слоем. По мнению [1], природа образования белого слоя происходит посредством мартенситного фазового превращения. При этом температура рельса может достигать 900 °С.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-32-60001.

Библиографический список:

1. Wu J., Petrov R.H., Kolling S. et. al. Micro and Nanoscale Characterization of Complex Multilayer-Structured White Etching in Rails // Metals. 2018. Vol. 8. P. 749 – 768.
2. Сарычев В.Д., Жаворонкова Е.Ю., Кормышев В.Е. Механизм формирования поверхностных наноструктурных и аморфных слоев при интенсивной пластической деформации // сб. науч. тр. Всерос. науч. конф. молод. уч. 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2019. С. 263 – 266.
3. Österle W., Rooch H., Pyzalla A., et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction // Mater. Sci. Eng. 2001. No. 303. P. 150 – 157.
4. Wild W. L., Hasse B., Wroblewski T., et al. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // Wear. 2003. No. 254. P. 876 – 883.
5. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., et.al. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // Mater. Sci. Eng. 2006. No. 421. P. 191 – 199.
6. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface // Acta Mater. 2010. No. 58. P. 3602 – 3612.
7. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G. et.al. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Mater. Sci. Eng. 2001. No. 303. P. 197 – 208.

ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ, ТОПОГРАФИИ И СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ППК – CdS С РОСТОМ СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ

Иванова О.П.¹, Криничная Е.П.¹, Кривандин .А.В.¹, Завьялов С.А.²,
Журавлева Т.С.¹

¹ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

²ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва

olga@deom.chph.ras.ru

Изучение свойств пленочных полимерных нанокмозитов на основе полимерной матрицы поли-*n*-ксилилен (ППК) и наполнителя – полупроводниковые наночастицы сульфида кадмия (CdS), обладающие

высокой фоточувствительностью в видимом диапазоне и широко использующиеся в оптоэлектронике, сенсорной технике и фотовольтаике, представляет большой интерес. В работе при комнатной температуре проведены исследования оптических спектров поглощения, топографии поверхности (АСМ-метод) и структуры (рентгеновская дифракция в больших углах) пленок полимерных нанокомпозитов ППК-CdS в зависимости от содержания наполнителя CdS ($C \sim 0-100$ об. %). Пленки получены методом твердофазного криохимического синтеза на подложках из оптического кварца и их толщина составила $d \leq 0.2$ мкм.

Измерения спектров оптического поглощения проведены в интервале длин волн 200-900 нм. При увеличении содержания наполнителя в нанокомпозитах наблюдается немонотонный сдвиг спектров в длинноволновую область с максимумом при концентрации $C_0 \approx 11$ об.%. Сдвиги спектров поглощения, по-видимому, обусловлены размерными эффектами, которые также приводят и к структурным изменениям.

Методом АСМ в режиме контактной моды была установлена перестройка структуры поверхности с ростом концентрации наполнителя: фибриллярная структура переходит фибриллярно-глобулярную, а потом - в глобулярную. Приведены изменения характеристик шероховатости (R_q и R_{max}), а также из гистограмм дифференциального распределения получены зависимости распределения глобул матрицы по размерам. Показано, что с увеличением концентрации наполнителя CdS наблюдались немонотонные изменения размеров глобул матрицы с экстремальными значениями при концентрации $C \sim C_0$.

Согласно рентгеноструктурным исследованиям с ростом концентрации наполнителя происходят изменения как структуры матрицы - потеря кристалличности, так и наночастиц - переход из аморфной фазы в гексагональную структуру вюрцита, характерную для крупнокристаллического сульфида кадмия. Эти изменения структуры полимерных нанокомпозитов происходили при $C \sim C_0 \geq 10.5-11$ об.% CdS. Образующаяся структура в пленках ППК-CdS при $C \sim C_0 \geq 10.5$ об.% CdS совпадает со структурой вюрцита в пленке 100 об.% CdS толщиной $d \leq 0.2$ мкм//.

Проведенные исследования указывают на корреляцию изменений в спектрах поглощения с изменениями поверхности и структуры нанокомпозитов ППК-CdS.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-03-00582) в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253312).

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПЛЁНОК СИЛИЦИДОВ ВА И ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ В Si(111) И Si(100)

Комилов Т.С.¹, Клечковская В.В.², Рысбаев А.С.¹, Хужаниязов Ж.Б.¹, Игамов Б.Д.¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан, rysbaev@mail.ru, tulkyn@mail.ru

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, klechvv@crys.ras.ru

Одним из приоритетных направлений развития науки и современных технологий является создание наноматериалов, обладающих уникальными физическими свойствами, что открывает широкие возможности для создания новых эффективных функциональных приборов и сенсорных систем. Благодаря таким востребованным свойствам структур силицидов: высокой термической стабильности, стойкости к химическим обработкам, технологической совместимости силицидов с кремнием (это позволяет создавать на их основе быстродействующие элементы электронных приборов) в настоящее время силициды являются объектом изучения в крупнейших мировых исследовательских центрах. В том числе особый интерес представляют пленки силицидов, формируемые непосредственно на поверхности кремния, что обеспечивает возможность управления толщинами силицидных слоев в диапазоне нано размеров.

Наряду с традиционными методами получения тонких пленок силицидов:

- нанесение металла на кремний путем испарения, распыления или электролитического осаждения и последующей термообработки;
 - химическое осаждение металла из газовой фазы/из растворов;
 - вбивание атомов металла из нанесенной на поверхность Si металлической пленки ионами Si^+ или инертных газов;
- существуют и сравнительно новые способы:
- молекулярно – лучевая эпитаксия (МЛЭ);
 - ионная имплантация, ионный синтез и др.

Однако если МЛЭ, позволяющий получать наиболее совершенные пленки, требует использования дорогостоящего оборудования, то метод ионной имплантации, с нашей точки зрения, является одним из наиболее перспективных технологических направлений для формирования тонких пленок силицидов. Более того использование низкоэнергетической ($E_0 < 5$ keV) ионной имплантации позволяет создавать на поверхности Si наноразмерные пленки.

Исследования изменения поверхностной структуры образцов Si, имплантированных ионами щелочных элементов (Li, Na, K, Rb и Cs), показали, что в результате термического прогрева в зависимости от типа иона наблюдается формирование различных поверхностных структур. Так при прогреве образцов Si(100), имплантированных ионами Na⁺, Rb⁺, K⁺ и Cs⁺ с E₀ = 1 keV нами обнаружены следующие поверхностные сверхструктуры: Si(100)–4x4Na; Si(100)–2x4Rb; Si(100)–2x1K; Si(100)–2x8Cs; Si(100)–2x2Ba. Кратковременный термический прогрев ионно–имплантированных образцов при соответствующих температурах приводит к образованию тонких (толщиной ≤ 10 nm) пленок силицидов: LiSi, BaSi, NaSi, KSi, RbSi, CsSi.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части получения электронно-микроскопических данных и частичной финансовой поддержке Министерства инноваций Республики Узбекистан.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ Zr-Mo-Si-B-(N) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ HR ТЕМ

Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Логинов П.А., Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, kiryukhantsev-korneev@yandex.ru*

Работа посвящена комплексному исследованию покрытий Zr-Mo-Si-B, включая in-situ исследования структуры и механических свойств в колонне просвечивающего электронного микроскопа, в том числе в процессе нагрева. Покрытия осаждались с использованием метода магнетронного распыления. Катод-мишень (90MoSi₂-10MoB) + 80%ZrB₂ с нижним несущим слоем из Mo, диаметром 120 мм и толщиной 10 мм был получен методом горячего прессования. Композиционный порошок для прессования производился путём измельчения продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), выполненного с использованием порошков циркония, молибдена и бора. Распыление мишеней проводилось с помощью вакуумной установки на базе откачивающей системы УВН-2М при следующих условиях: ток 2 А, напряжение 500 В, атмосфера Ar (99,9995%), азот (99,9995%), и газовые смеси Ar-N₂, рабочее давление в вакуумной камере 0,1–0,2 Па. В качестве подложек использовались пластины из поликора ПК-100-1 (Al₂O₃). Перед

нанесением покрытий подложки подвергались очистке в вакууме с использованием ионного источника щелевого (ионы Ag^+ , 2-3 кэВ, 60-80 мА) в течение 20-40 мин.

Исследование структуры и фазового покрытий проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 JEOL, оборудованного модулем для нагрева образцов и энерго-дисперсионным спектрометром, а также устройствами для индентирования, сжатия и растяжения. При анализе в режиме in-situ проводилась съёмка образцов при нагреве и охлаждении в колонне микроскопа с шагом 200°C в диапазоне температур 20-1000 $^\circ\text{C}$. Полученные данные анализировались также в сравнении с результатами исследований в стационарных условиях для термически-обработанных при аналогичных температурах образцов.

Комплексное исследование включало в себя также определение морфологии покрытий с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащённого ЭДС приставкой Noran 7 Thermo. Химический состав покрытий и их толщина определялись с помощью метода оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда на приборе Profiler 2 Horiba Jobin Yvon. Рентгеноструктурный анализ выполнялся на дифрактометре D2 PHASER Bruker с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Исследования методом Рамановской спектроскопии были проведены на приборе NTEGRA NT-MDT при использовании лазера с длиной волны 633 нм. Исходные образцы покрытий были подвергнуты продолжительным отжигам при температурах 20-1100 $^\circ\text{C}$ и кратковременным при 1500 $^\circ\text{C}$. Далее для отожженных образцов покрытий были проведены исследования с использованием выше перечисленных методов изучения структуры. Твердость, модуль упругости и упругое восстановление определялись с помощью нанотвердомера Nano Hardness Tester CSM Instruments, оснащенного индентором Берковича. Установлено, что разрабатываемые покрытия имеют высокие термическую стабильность структуры и жаростойкость при температурах 1000-1500 $^\circ\text{C}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания 0718-2020-0034.

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИ - *n* - КСИЛИЛЕНА
С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ**

Клименко И.В.¹, Криничная Е.П.¹, Завьялов С.А.², Журавлева Т.С.¹

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской Академии
Наук, Москва, inna@deom.chph.ras.ru

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Москва, zavyalov_sa@mail.ru

В вакуумных условиях соконденсацией паров мономера (*n*-ксилилена) и металлов (Fe, Co, Ni и Sn) на охлаждаемые (77 К) подложки из ситалла и кремния получены пленки полимерных нанокомпозитов (толщина пленок ~ 0.5 мкм, концентрация наночастиц (*C*) от 2 до 100 об. %). Для пленок с различным содержанием наночастиц определена темновая проводимость при комнатной температуре. Установлено, что с ростом концентрации наночастиц до $C=8\div 14$ об. % сопротивление пленок $R(C)$ уменьшается для всех нанокомпозитов. Максимальное уменьшение составляет ~10-12 порядков для композитов с наночастицами Fe и Sn. Сопротивление пленок наночастиц ($C=100$ об. %) уменьшается на ~10 порядков в ряду $Co>Sn>Ni>Fe$ и для пленок наночастиц Fe и Ni ($C=100$ об. %) того же порядка, что и сопротивление композитов с содержанием наночастиц металла $C=10$ об. %, а для Sn и Co – больше на 7 и 4 порядков, соответственно.

Методом сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ) была исследована структура и морфология поверхности полученных нанокомпозитных пленок ППК-Sn с концентрацией наночастиц Sn $C=4\div 12$ об. %. Определены размерные характеристики и форма поверхностных наноструктур, среднеквадратичная шероховатость и распределение наночастиц по размерам. Структурные изменения поверхности свидетельствуют о перестройке полимерной матрицы нанокомпозитов. Показано, что элементами структурной организации поверхности изученных ППК-Sn пленок являются наноглобулы с характерными размерами ~150÷280 нм (Рис.1).

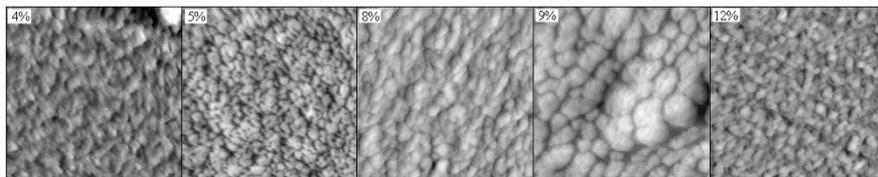


Рисунок 1 – Влияние концентрации наночастиц Sn (в об. %) на морфологию поверхности пленок нанокompозитов ППК-Sn. Область сканирования 5×5 мкм.

На основании данных АСМ сделан вывод о том, что наночастицы Sn оказывают влияние на полимеризацию *n*-ксилилена при нагревании подложки от 77 К до 300 К с образованием глобулярной поверхностной структуры пленок ППК-Sn. Результаты количественного анализа шероховатости поверхности пленок подтверждают, что концентрации ~ 8÷10 об. % оказываются критическими для модификации поверхности нанокompозитных пленок ППК-Sn.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№ гос. регистрации 01201253304)

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГИБРИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК ППК–PbSe И ППК–ZnSe

Криничная Е.П.¹, Иванова О.П.¹, Завьялов С.А.², Журавлева Т.С.¹

¹ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

²ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

elkrina@mail.ru

Композиционные материалы, содержащие наноразмерные неорганические наполнители, проявляют уникальные физико-химические свойства и представляют большой интерес для создания высокоэффективных устройств в области микро-, опто- и нанoeлектроники. Важным аспектом при создании композитных наноматериалов является хорошо контролируемый процесс их формирования на поверхности в виде тонкопленочных покрытий методом сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Цель работы – синтез гибридных нанокompозитов на основе поли-*n*-ксилилена (ППК) и исследование влияния концентрации и природы

наполнителя на формирование структуры поверхностного слоя, исследование их поверхностных характеристик.

Композитные наноструктурированные пленки ППК–PbSe и ППК–ZnSe (толщиной ~500 нм) получены полимеризацией из газовой фазы на поверхности (ГПП) – совместной конденсацией паров мономера *n*-ксилилена и наночастиц PbSe ($C_{\text{PbSe}} = 10, 15, 20, 30$ и 50 об. %) и ZnSe ($C_{\text{ZnSe}} = 6, 10, 15$ и 30 об. %) на охлаждаемые до температуры жидкого азота подложки из ситаллового стекла с последующей полимеризацией соконденсата при разогреве до комнатной температуры в специальной вакуумной установке [1]. Этим же методом для сравнительного анализа морфологии и структуры поверхности были синтезированы чистые пленки ППК, PbSe и ZnSe. Процессы формирования тонкопленочных нанокompозитов на поверхности подложек и анализ надмолекулярной структуры приповерхностного слоя полученных образцов изучены с помощью микроскопа СММ–2000 (Россия) и программного обеспечения Scan Master.

В результате проведенных исследований определены оптимальные условия синтеза сплошных наноструктурированных композиционных пленок ППК–PbSe и ППК–ZnSe, выявлены особенности изменения морфологии поверхности от процентного содержания наполнителя и характерные элементы сформированных наноструктур приповерхностного слоя (форма и размеры). Обнаружено, что введение наночастиц PbSe и ZnSe ($C=15$ об. %) в ППК–матрицу приводит к упорядоченности поверхности нанокompозитных пленок и появлению надмолекулярных структур в виде выступающих нанокристаллитов пластинчатой структуры с четкими границами. Построены гистограммы дифференциального распределения частиц по размерам, получены интегральные кривые гранулометрического состава и вычислены значения среднеквадратичной шероховатости поверхности.

Установлено, что концентрация диспергированных наночастиц PbSe и ZnSe в ППК–матрице оказывает существенное влияние на морфологию и структуру приповерхностного слоя нанокompозитных пленок, а, следовательно, и на механизм полимеризации и степень кристаллизации поли–*n*-ксилиленовой матрицы.

Методом ГПП продемонстрирована возможность синтеза тонкопленочных гибридных нанокompозитов ППК–PbSe и ППК–ZnSe с разной структурой поверхности, которая определяется концентрацией и природой наполнителя. Полученные нанокompозитные пленки являются перспективными для дальнейшего изучения их структурных, электрофизических и оптоэлектронных свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253304) и при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-03-00582).

1. Zavyalov S., Pivkina A., and Schoonman J. // *Solid State Ionics*. 2002. V. 147. P. 415–423.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ИНТЕРКАЛИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОНОСЛОЕВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Криничная Е.П.¹, Иванова О.П.¹, Голубь А.С.², Лененко Н.Д.²,
Журавлева Т.С.¹

¹ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

²ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова
РАН, Москва

elkrina@mail.ru

Наноструктурированные гетерослоистые соединения на основе дисульфида молибдена представляют интерес для создания высокоэффективных устройств в области наноэлектроники и электрокатализа.

Цель работы – исследование процессов формирования структуры поверхности тонких нанокompозитных пленок на основе интеркалированного дисульфида молибдена. Для синтеза гетерослоистых соединений MoS_2 использовали монослоевое диспергирование [1]. В результате совместной упаковки из жидкой среды отрицательно заряженных монослоев MoS_2 и гостевых слоев гидроксокомплексов Co , Ni , Zn и CdS были получены интеркалированные соединения MoS_2 : $[\text{Ni}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$, $[\text{Co}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$ и $[\text{Zn}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$ и $\text{Cd}_{0.2}\text{MoS}_2$. Сформировавшиеся частицы нанодисперсного материала выделяли, промывали, суспендировали в ацетонитриле и наносили на подложки из кварца в виде пленок методом послойного полива. Толщина пленок составляла $0.30 \div 0.34$ мкм. Морфология и особенности структурной организации рельефа поверхности пленок интеркалированного MoS_2 исследованы методом сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе СММ–2000 (Россия). Поверхности изученных пленок представляют собой достаточно плотные «упаковки» ступенчато-слоистых структур, произвольно ориентированных по отношению к плоскости подложки. Расположенные на поверхности структурные элементы – нанокристаллиты - имеют четкую огранку и отличаются друг от друга размерами. В зависимости от природы

интеркалата (гостевого слоя) наблюдается неоднородность структурных изменений поверхности, которую можно объяснить зависимостью особенностей процесса образования поликристаллических структур при формировании пленки на подложке. Следует отметить, что в отличие от неинтеркалированного MoS_2 [2] на поверхности пленок $[\text{Ni}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$, $[\text{Co}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$ и $[\text{Zn}(\text{OH})_x(\text{H}_2\text{O})_y]_{0.5}\text{MoS}_2$ наблюдается укрупнение частиц из нанокристаллических образований. На основании АСМ–данных построены гистограммы распределения наблюдаемых на поверхности нанокристаллитов по размерам и оценена величина среднеквадратичной шероховатости пленок интеркалированного MoS_2 . Как следует из полученных экспериментальных данных, механизм формирования нанокристаллических пленок в целом аналогичен предложенному нами ранее для пленок неинтеркалированного MoS_2 [2]. Показано, что элементами структурной организации поверхности пленок интеркалированного MoS_2 являются нанокристаллиты.

Таким образом, в результате проведенных исследований нанокристаллических пленок интеркалированного MoS_2 выявлены закономерности их сборки, а также изменение морфологии поверхности (степени кристалличности) в зависимости от природы интеркалата, что дает возможность направленно модифицировать характеристики поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253304).

1. Голубь А.С., Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л., Новиков Ю.Н. // Успехи химии. 2003. Т. 72. №2. С. 138.

2. Криничная Е.П., Иванова О.П., Журавлева Т.С., Лененко Н.Д., Голубь А.С., Новиков Ю.Н. // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. №3–4, С. 24–28.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК ПОВЕРХНОСТИ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Лежнин Н.В.¹, Чалина М.А.¹, Макаров А.В.¹, Осинцева А.Л.²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

av-mak@yandex.ru

Рассмотрены возможности поверхностного упрочнения метастабильной аустенитной хромоникелевой стали методами

фрикционной обработки (ФО) скользящим индентором в безокислительной газовой среде и ультразвуковой ударно-фрикционной обработки (УЗУФО) [1] с ударным воздействием под углом к обрабатываемой поверхности. В отличие от традиционной ультразвуковой ударной финишной обработки в результате УЗУФО достигается усиление фрикционной составляющей взаимодействия индентора с металлом и, как следствие, увеличение сдвиговой составляющей пластической деформации в зоне контакта. Это позволяет в большей степени реализовать потенциал упрочнения материала.

Так при стандартной ультразвуковой ударной обработке микротвердость стали увеличивается от 200 до 385 HV 0,025, среднее квадратичное отклонение профиля поверхности Ra находится на уровне 0,6 мкм. Толщина сильнодиспергированного слоя составляет всего 4-6 мкм.

ФО и УЗУФО повышают микротвердость поверхности до 760-800 HV 0,025 и 870-900 HV 0,025, а шероховатость поверхности Ra составляет 0,08 мкм и 1,3 мкм, соответственно. В обоих случаях толщина сильнодеформированного слоя возрастает до десятков микрон с плавным переходом к исходной крупнокристаллической структуре. Наблюдается интенсивное развитие фазовых превращений с формированием α' -мартенсита деформации, доля которого в структуре превышает 80 объем. %. Общая глубина упрочненного слоя достигает 400 мкм.

Преимуществом ФО является высокая чистота обработки (низкая шероховатость) получаемой поверхности, однако для получения требуемого уровня упрочнения необходима многократная обработка одного и того же участка. УЗУФО является более производительной технологией по сравнению с ФО, так как даже за один проход позволяет получить более высокую степень упрочнения, однако снижается качества обработанной поверхности.

Продемонстрировано положительное влияние сформированного в результате таких обработок наноструктурированного приповерхностного слоя с градиентной структурой на эффективность низкотемпературного плазменного азотирования. Диффузионно-активная нанокристаллическая структура способствует эффективному насыщению азотом поверхности материала вплоть до температуры азотирования 350°C. Большая протяженность границ и высокий уровень сжимающих остаточных напряжений препятствуют образованию грубого микрорельефа азотированной поверхности, характерного для крупнокристаллического состояния. Кроме того, за счет градиента упрочнения, происходит плавный переход от твердого и хрупкого азотированного слоя к мягкому материалу

подложки, что повышает стойкость азотированного слоя к контактными нагрузкам.

Таким образом, ФО и УЗУФО являются эффективными способами деформационного упрочнения, а также могут использоваться при подготовке поверхности метастабильной аустенитной хромоникелевой стали перед химико-термической обработкой.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура» в ИФМ УрО РАН № АААА-А18-118020190116-6 и тема в ИМАШ УрО РАН № АААА-А18-118020790148-1).

1. Патент РФ № 2643289. Способ ультразвуковой упрочняющей обработки деталей / А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина, С.В. Буров, Р.А. Саврай. – Опубл. в БИМП. – 2018. – № 4.

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ОТКЛИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ $Fe_{53,3}Ni_{26,5}B_{20,2}$ И

$Co_{28,2}Fe_{38,9}Cr_{15,4}Si_{0,3}B_{17}$ ПОСЛЕ ОТЖИГА

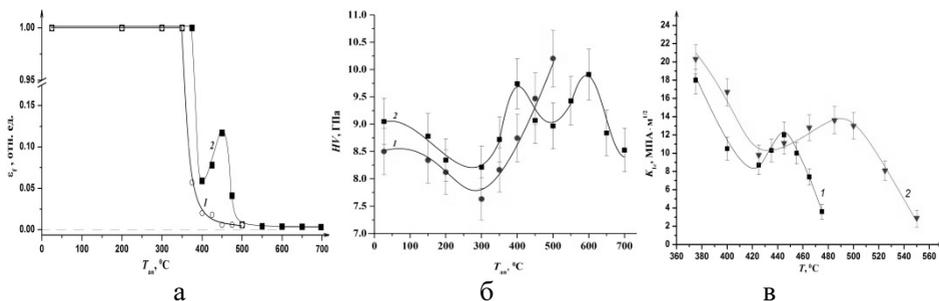
Пермякова И.Е.¹, Дмитриевский А.А.², Блинова Е.Н.¹

¹ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", Москва, inga_perm@mail.ru

²ТГУ им. Г.Р. Державина, Тамбов, admir@yandex.ru

В работе изучено механическое поведение лент аморфных сплавов (АС) на основе кобальта и железа после термической обработки в вакуумной печи с выдержкой 10 мин при каждой температуре. По данным ДСК переход АС $Fe_{53,3}Ni_{26,5}B_{20,2}$ в кристаллическое состояние происходит в два этапа при $T_{кр1} = 434^\circ C$, $T_{кр2} = 453^\circ C$; а для АС $Co_{28,2}Fe_{38,9}Cr_{15,4}Si_{0,3}B_{17}$ – в три этапа: $T_{кр1} = 483^\circ C$, $T_{кр2} = 588^\circ C$, $T_{кр3} = 660^\circ C$. Оба АС испытывают отпускную хрупкость: $T_{Г1} \approx 363^\circ C$ – $Fe_{53,3}Ni_{26,5}B_{20,2}$, $T_{Г2} \approx 388^\circ C$ – $Co_{28,2}Fe_{38,9}Cr_{15,4}Si_{0,3}B_{17}$ (рис. 1а). В сопоставлении с результатами ДСК, можно заключить, что сплавы охрупчиваются в процессе структурной релаксации при температурах ниже $T_{кр}$. Потеря пластичности ϵ_f АС системы Fe-Ni-B проходит одностадийно, а в АС системы Co-Fe-Cr-Si-B установлены две стадии спада с некоторым возрастанием параметра ϵ_f в интервале от 400 до 450°C. Разница между АС, относительно хода зависимостей ϵ_f связана с различной скоростью закалки в процессе их получения. Изменение микротвердости HV имеет немонотонный характер для обоих АС (рис. 1б). До 300°C поведение HV схоже, т.е. наблюдается снижение HV на 9-10 % относительно исходных значений. Выше 300°C для

АС $\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{B}_{20,2}$ установлен рост HV вплоть до полной кристаллизации. Для сплава $\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{0,3}\text{B}_{17}$ повышение T приводит к двум максимумам HV при 400°C и 600°C . АС присущ пластифицирующий эффект – рост параметра K_{1c} в диапазонах температур от 425°C до 445°C – для $\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{B}_{20,2}$ и от 425°C до 485°C – для $\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{0,3}\text{B}_{17}$ (рис. 1б). Явление пластификации обусловлено, по-видимому, эффективным торможением квазихрупких трещин, возникших и растущих в аморфной матрице в результате приложения внешней нагрузки. Последующее снижение K_{1c} с увеличением температуры обусловлено появлением в структуре боридов (табл. 1), оказывающих активное охрупчивающее воздействие на оба сплавы. Структурные превращения в АС после термической обработки исследованы с помощью ПЭМ, их последовательность представлена в табл.1.



Рисонок 1 – Изменение механических свойств АС $\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{B}_{20,2}$ (1) и $\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{0,3}\text{B}_{17}$ (2) при отжиге: пластичность ϵ_T (а), микротвердость HV (б), трещиностойкость K_{1c} (в).

Таблица 1. Изменение фазового состава АС после отжига.

Сплав	Температурный диапазон	Фазовые превращения
$\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{0,3}\text{B}_{17}$	$23^\circ\text{C} \leq T < 450^\circ\text{C}$	А (аморфная фаза)
	$450^\circ\text{C} \leq T < 500^\circ\text{C}$	А + α -Fe
	$500^\circ\text{C} \leq T < 525^\circ\text{C}$	А + α -Fe + α -Co
	$525^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}$	α -Fe + α -Co + β -Co + Co_2B + Fe_2B
$\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{B}_{20,2}$	$23^\circ\text{C} \leq T \leq 425^\circ\text{C}$	А
	$425^\circ\text{C} < T < 440^\circ\text{C}$	А + α -Fe
	$440^\circ\text{C} \leq T < 450^\circ\text{C}$	А + α -Fe + γ -Fe
	$450^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C}$	α -Fe + γ -Fe + Fe_2B + FeB

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-08-00341 «А»).

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ TRIP/TWIP СТАЛЕЙ

Просвирнин Д.В., Ларионов М.Д., Колмаков А.Г., Ларионова А.В.,
Пруцков М.Е., Пивоварчик С.В.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
dprosvirnin@imet.ac.ru*

Стали TRIP/TWIP обладают высокой прочностью на растяжение, пластичностью и намного более высоким пределом текучести, чем другие конструкционные стали [1, 2]. В настоящее время класс TRIP/TWIP сталей с аустенитно-мартенситной структурой используется в сильно нагруженных деталях, таких как торсионные стержни вертолетных винтов. Стали TRIP наиболее востребованы в автомобильной промышленности. Однако эта сталь имеет проблему усталостной прочности, поскольку мартенсит деформации (продукт превращения аустенит-мартенсит, вызванный пластической деформацией) является концентратором напряжений. Одним из путей улучшения эксплуатационных свойств это модификация поверхности приводящая к увеличению усталостной прочности, пластичности и коррозионной стойкости в агрессивных средах [3]. Предполагается оценить влияние конкретного химического элемента или химического соединения на взаимодействие со сталями с высоким содержанием аустенита и сделать первые шаги в направлении технологии модификации поверхности сталей TRIP/TWIP. В том числе, будет учитываться не только механические свойства наносимых поверхностей, соответствующие требованиям дизайна композитных материалов, но и термодинамическое взаимодействие и фазовое равновесие на границе раздела композит – наносимый материал. [4]

Исследования с помощью метода конечных элементов позволит произвести расчет скорости зарождения и роста трещины с последующим анализом влияния нанесенного покрытия, с помощью программ моделирующих термодинамические параметры.

В ходе работы на поверхность изделия будет наноситься слой толщиной до 500 мкм, что предположительно повысит комплекс эксплуатационных свойств (усталостная долговечность, пластичность, коррозионная стойкость и пр.) при незначительных дополнительных затратах при будущем массовом производстве. В качестве наиболее перспективных материалов для покрытия могут рассматриваться стали и сплавы, обладающие более высокими пластическими и антикоррозионными свойствами по сравнению с TRIP/TWIP сталям, например, аустенитные нержавеющие стали, алюминиевые сплавы и сплавы на основе Ni, Cr и/или Co. Устранение негативного влияния

поверхностных дефектов материала основы за счёт нанесённого защитно-функционального слоя, приводящее к улучшениям усталостных свойств, могут позволить продлить срок службы изделий из композита, что даст высокий экономический эффект, вследствие высокой стоимости производства TRIP/TWIP сталей, однако влияние того или иного элемента на совокупность свойств композита ещё предстоит определить.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00556 –А.

1. Nikhilesh. Chawla. Metal matrix composites. – Springer-Verlag New York, 2016.

2. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирнин Д.В. Проявление трип-эффекта в аустенитно-мартенситной стали ВНС9-Ш при различных скоростях деформации // Деформация и разрушение материалов. 2016. №1. С. 14-18.

3. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Сиротинкин В.П., Просвирнин Д.В., Кобелева Л.И., Елисеев Э.А., Рыбальченко О.С., Ашмарин А.А. Влияние удаления поверхностного слоя на фазовый состав тонколистовой трип-стали после статического растяжения с разной скоростью деформирования // Металлы, 2016, № 1, 40 - 45

4. Терентьев В.Ф., Слизов А. К., Просвирнин Д.В. и др. Влияние фазового состава поверхностного слоя на механические свойства тонколистовой трип-стали 23Х15Н5АМ3-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2015, № 7, с. 30-33.

ОЦЕНКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВНЕДРЕНИЕМ ИНДЕНТОРА ВИККЕРСА ДЛЯ КЕРАМИКИ

Колмаков А.Г., Просвирнин Д.В., Пруцков М.Е., Ларионов М.Д.,
Ларионова А.В., Пивоварчик С.В.

*Институт металлургии и материаловедения им.А.А. Байкова РАН, Москва,
dprosvirnin@imet.ac.ru*

В эпоху технического прогресса задача поиска новых лёгких материалов интерес к современной технической керамике непрерывно возрастает. Керамика на базе оксинитрида алюминия обладает уникальным комплексом свойств, востребованным в различных областях техники, таких как автомобилестроение, авиастроение, производство защитных средств и материалов и пр. [1] В настоящей работе для исследований использовались поликристаллические керамики на базе оксинитрида алюминия $Al_{23}O_{27}N_5$ синтезированные плазмохимическим

методом из исходной смеси порошков Al_2O_3 и AlN . Сами образцы для исследований получены в процессе спекания по двум схемам: реакционным спеканием и горячего спекания смеси порошков Al_2O_3 и AlN . поиска методов глубокого изучения природы зарождения поверхностных трещин и исследование характера их распространения. Наиболее простой из существующих методов изучения природы зарождения поверхностных трещин и исследование характера их распространения является метод индентирования поверхности изделия алмазной пирамидой Виккерса, так как существует зависимость между твердостью и трещиностойкостью керамических материалов. [2, 3] Преимущество метода индентирования это возможность использования керамических образцов произвольной формы, и при этом не происходит разрушение образцов, что в дальнейшем позволяет провести анализ остановившихся своё распространение трещин.

Результаты, полученные после проведенного сравнительного качественного и количественного анализа трещиностойкости керамик $Al_{23}O_{27}N_5$ позволяют дать оценку полученным данным по вязкости разрушения в сравнении с результатами из литературы в области исследования керамических материалов. [4] Для уплотненной керамики данный метод показал результат сравнимый с результатами, полученными в прошлых работах, однако для образцов с меньшим уплотнением такой метод непригоден. Развитие трещины напрямую зависит от уплотнения образца, так как поры являются преградами для распространения трещин. Полученные результаты исследования выявили, что данный метод для оксинитридной и других конструкционных керамик может быть предпочтителен в тех случаях, когда требуется срочное определение трещиностойкости и твердости, как взаимосвязанных параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00947-20-00.

1. Просвирнин Д.В., Ларионов М.Д., Колмаков А.Г., Алиханян А.С., Пруцков М.Е., Пивоварчик С.В. Комплекс свойств керамики для применения в нефтегазовой промышленности // Булатовские чтения. 2018. Т. 4. С. 103-108

2. Moradkhani A. et al. Determination of fracture toughness using the area of micro-crack tracks left in brittle materials by Vickers indentation test. Journal of Advanced Ceramics. - 2013. No. 1. - pp. 87-102.

3. Bashta A. V., Gogotsi G. A. The study of ceramics in the implementation of the Vickers diamond pyramid. - 1990.

4. Prosvirnin D V et al. 2017 Effect of reaction sintering conditions on properties of ceramics based on alumina oxynitride Materialovedenie 10 pp 45-48.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПЛЁНОК СИЛИЦИДОВ ВА И ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ В Si(111) И Si(100)

Камилов Т.С.¹, Клечковская В.В.², Рысбаев А.С.¹, Орехов А.С.²,
Хужаниёзов Ж.Б.¹, Игамов Б.Д.¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,
Узбекистан, rysbaev@mail.ru, tulkyn@mail.ru

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, klechvv@crys.ras.ru, andrey.orekhov@gmail.com

Нано – размерные силицидные плёнки, созданные на поверхности кремния привлекают сейчас большое внимание, что объясняется во – первых непрерывным сокращением размеров элементов микроэлектроники, во – вторых уникальными свойствами структур силицид – кремний, позволяющими создавать на их основе быстродействующие элементы электронных приборов. Одним из приоритетных направлений развития науки и технологии является создание наноматериалов, обладающих уникальными физическими свойствами, что открывает широкие возможности для создания новых эффективных функциональных приборов и сенсорных систем. Благодаря высокой термической стабильности и стойкости к химическим обработкам, технологической совместимости силицидов с кремнием, сейчас они являются объектом изучения крупнейших мировых исследовательских центров.

Существуют следующие традиционные и сравнительно новые способы получения тонких силицидных пленок:

- нанесение металла на кремний путем испарения, распыления или электролитического осаждения и последующая термообработка;
- химическое осаждение металла из газовой фазы (из растворов);
- вбивание атомов металла из нанесенной на поверхность Si металлической пленки ионами Si⁺ или инертных газов;
- молекулярно – лучевая эпитаксия (МЛЭ);
- ионная имплантация, ионный синтез и др.

Последние два способа получения силицидных пленок являются сравнительно новыми. Однако, если МЛЭ позволяет получать совершенные пленки, но требует использования дорогостоящего оборудования, то метод ионной имплантации не требует дорогостоящего оборудования и, по нашему мнению, является одним из наиболее перспективных технологических направлений для получения тонких пленок силицидов. Более того использование низкоэнергетической ($E_0 < 5$

keV) ионной имплантации позволяет создавать на поверхности Si наноразмерные силицидные пленки.

Исследования изменения поверхностной структуры образцов Si, имплантированных ионами щелочных элементов (Li, Na, K, Rb и Cs) показали, что в результате термического прогрева в зависимости от типа иона наблюдается формирование различных поверхностных структур. Так, при прогреве образцов Si(100), имплантированных ионами Na⁺, Rb⁺, K⁺ и Cs⁺ с E₀ = 1 keV нами обнаружены следующие поверхностные сверхструктуры: Si(100)–4x4Na; Si(100)–2x4Rb; Si(100)–2x1K; Si(100)–2x8Cs; Si(100)–2x2Ba.

Кратковременный термический прогрев ионно–имплантированных образцов при соответствующих температурах приводит к образованию тонких толщиной до 10 nm пленок силицидов: LiSi, BaSi, NaSi, KSi, RbSi, CsSi.

КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК Li-Nb-O В ПРОЦЕССЕ ВЧМР

Сериков Д.В.¹, Дыбов В.А.¹, Касьянов А.К.², Белоногов Е.К.^{1,3}

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж

²АО "Корпорация НПО "РИФ", Воронеж

³Воронежский государственный университет, Воронеж

dmitriy.tut@mail.ru

Установлена зависимость доли кристаллической фазы пленок Li-Nb-O от их толщины и определены кинетические параметры кристаллизации в процессе нанесения. Пленки Li-Nb-O наносили методом ВЧМР мишени LiNbO₃ на поверхность пластин Si (111) при постоянной температуре 350 °C, время напыления составляло 50, 100 и 150 минут, что соответствует 100, 200 и 300 нм толщины нанесенного слоя.

Долю кристаллической фазы определяли методом рентгеновской дифрактометрии (РД). Кинетику кристаллизации пленок Li-Nb-O от времени нанесения на термостатированные подложки, оценивали согласно модели Колмогорова-Аврами-Джонсона-Мела.

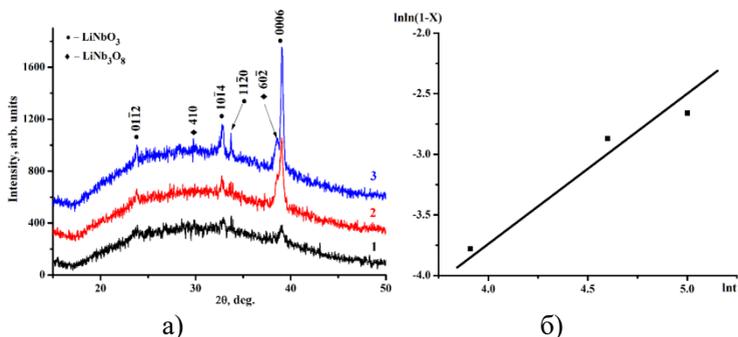


Рисунок 1 – а) Фрагменты РД пленок системы Li-Nb-O, нанесенных методом ВЧМР на нагретую до 350 °С пластину Si (111), толщиной: 1 – 100 нм.; 2 – 200 нм.; 3 – 300 нм; б) Изменение доли кристаллической фазы от времени напыления пленки

По данным РД (рисунок 1а) следует, что на кремниевых подложках при 350 °С в процессе ВЧМР формируются двухфазные аморфно-нанокристаллические пленки (LiNbO₃ и LiNb₃O₈). Высокая интенсивность РД пика 0006 LiNbO₃, свидетельствует о формировании аксиальной текстуры <0001>. По мере увеличения толщины слоя (с ростом времени нанесения) происходит увеличение доли кристаллической фазы: 2,3 - 5,5 - 6,9 % с ростом толщины слоя 0,1 – 0,2 – 0,3 мкм, соответственно.

Согласно модели Колмогорова-Аврами-Джонсона-Мела, кинетика изотермической кристаллизации имеет вид:

$$X(t) = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (1)$$

где K - эффективная скорость кристаллизации, n - показатель Аврами.

Объемная доля материала, кристаллизовавшаяся до времени t :

$$X(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi t^n}{3\tau^n}\right) \quad (2)$$

Характерное время кристаллизации:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_k}{kT}\right) \quad (3)$$

где E_k – энергия активации.

В таблице 1 представлены экспериментальные результаты измерения доли кристаллической фазы в пленках Li-Nb-O.

Таблица 1. Кинетические параметры кристаллизации по данным РД

Время напыления, минут	50	100	150
Толщина слоя, мкм	0,1	0,2	0,3
Доля кристаллической фазы, X	0,023	0,055	0,069
1-X	0,978	0,945	0,931
$\ln(1 - X)$	-0,022	-0,057	-0,071
$\ln \ln(1 - X)$	-3,8	-2,9	-2,7
lnt	3,9	4,6	5

Согласно (3), было установлено, что характерное время кристаллизации $\tau \sim 36$ ч, а энергия активации E_k составляет $\sim 0,3$ эВ. Из представленной на рисунке 1б зависимости, следует, что в случае тонких аморфных пленок Li-Nb-O, наносимых в процессе ВЧМР, кристаллизация протекает в соответствии с кинетическим показателем Аврами $n \sim 1$, что исключает механизм кристаллизации за счет разрастания трехмерного зародыша. Следовательно, кристаллизация стимулируется только в одном направлении – направлении поступления материала, т.е. направлении роста наращиваемого слоя, что приводит к формированию аксиальной текстуры <0001>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11062 мк).

СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ И ТВЕРДОГО СПЛАВА КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ В МАТРИЦЕ ОКСИДОВ КРЕМНИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Строгова А.С., Ковалевский А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь, strogova@bsuir.by

В настоящее время в качестве альтернативы пленкам SiO₂ исследуется большое количество диэлектриков с более высокой диэлектрической проницаемостью, чем для SiO₂, с целью уменьшения толщины туннельного диэлектрика и токов утечки в Flash EEPROM нового поколения. Наибольшее количество публикаций посвящено получению и исследованию пленок нитрида кремния (Si₃N₄), оксидов алюминия (Al₂O₃), гафния (HfO₂), циркония (ZrO₂), тантала (Ta₂O₅), титана (TiO₂), лантанидов (Ln₂O₃) [1–2]. Однако базовый диэлектрик для замены SiO₂ до настоящего времени не выбран. Существует ряд проблем с точки зрения дальнейших

исследований диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью.

В результате наших исследований, получены и изучены слоистые структуры на основе матриц диоксида кремния и оксидов редкоземельных элементов с внедренными в них нанокластерами кремния, германия и твердого раствора кремний-германий.

Перенос носителей заряда в структурах с кластерами и без них объясняется из измеренных вольтамперных характеристик (ВАХ) с помощью теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). В то же время для структур с кластерами перенос носителей осуществляется не только по механизму ТОПЗ, но также имеет место механизм туннельного переноса носителей между электронными уровнями кремниевых, германиевых и кремний-германиевых включений и зоной проводимости поликристаллической пленки кремния при приложении сильных электрических полей, порядка 10 В/мкм.

Динамические ВАХ, снятые в диапазоне от 1 до 100 кГц для структур с кластерами и без них, показали, что в структурах без кластеров максвелловское время релаксации (МВР) выше пролетного времени, поэтому для этих структур наблюдается более раннее заполнение ловушек и невозможность разрядить их, пока поле меняет знак. В структурах с кластерами МВР меньше, что, по-видимому, связано с тем, что состояния, которые создают кластеры, являются более быстрыми, и они успевают сбросить заряд, пока поле меняет знак. Также были сняты спектры оптического поглощения для обоих типов структур. Из них было определено, что поглощение света в диапазоне длин волн 350 – 1200 нм различается для структур с кластерами и без них. Установлено что для структур с нанокластерами значение оптического поглощения по сравнению со структурами без кластеров на 50 % больше. Для структур с кластерами максимум оптического поглощения имеет место на длине волны 530 нм, что, скорее всего, связано с поглощением в нанослое нанокластеров. Аналогичный максимум для структур без кластеров находится на длине волны 550 нм и имеет меньшее значение.

Электрофизические свойства самых новых диэлектрических пленок и границы раздела диэлектрик-кремний хуже, чем у SiO_2 и границы раздела SiO_2 -Si, так как пленки диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и граница раздела диэлектрик-кремний содержат большое количество дефектов. Очень высокое локальное поле в поликристаллических диэлектриках со слишком высокой диэлектрической проницаемостью TiO_2 ($\epsilon \sim 60\div 100$) и (Ba, Sr) TiO_3 ($\epsilon \sim 200$) приводит к снижению напряженности поля пробоя в пленках, а значит и к высоким токам утечек.

Исследования показали, что элементы памяти с толщиной

туннельнотонкого SiO_2 (2.3 нм) имеют приемлемые характеристики программирования с довольно низким напряжением программирования, но теряют до $\sim 25\%$ накопленного заряда в процессе работы. Другими словами, при увеличении быстродействия элементов памяти уменьшается время хранения заряда за счет токов утечек. Таким образом, улучшать одновременно характеристики, как программирования, так и хранения информации очень трудно, так как обе эти характеристики зависят от величины тока через туннельнотонкий диэлектрик. Поэтому при производстве элементов памяти отдается предпочтение той или другой характеристике, в зависимости от того, для каких целей предназначается память, или же ищется компромисс между этими характеристиками.

Для дальнейшего развития технологии производства Flash EEPROM необходимы поиск новых технологических решений и перспективных материалов для подзатворного диэлектрика, глубокие знания о природе границы раздела диэлектрик-полупроводник и зависимости электрофизических свойств данной границы от условий получения, которые определяют возможность управления свойствами этой границы [2].

Список литературы:

1. Новый элемент памяти на кремниевых нанокластерах в диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью ZrO_2 для электрически перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства / В. А. Гриценко [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т.39, № 9. – С. 748–753.

2. Строгова А.С. Получение и свойства тонких пленок с кремниевыми, германиевыми и кремний-германиевыми наноструктурами: монография / А.С. Строгова, А.А. Ковалевский, Д.Ф. Кузнецов. – Минск: Бестпринт, 2018. – 222 с.

КРАЙ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПЛЕНОК НИОБАТА ЛИТИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФОТОННОГО ОТЖИГА

Сумец М.П.², Белоногов Е.К.^{1,2}, Иевлев В.М.^{2,3}, Дыбов В.А.¹,
Сериков Д.В.¹

¹*Воронежский государственный технический университет, Московский пр.
14, Воронеж, Россия*

²*Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1,
Воронеж, Россия*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
maxsumets@gmail.com*

Гетероструктуры на основе пленок ниобата лития (LiNbO_3 , LN) из-за уникальной совокупности сегнетоэлектрических, электро- и акустооптических свойств этого материала [1] - основа элементной базы оптоэлектроники будущего. Высокочастотное магнетронное распыление (ВЧМР) мишени - эффективный способ синтеза пленок сложных оксидов, таких как LN [2]. Один из подходов к синтезу поликристаллических пленок LN, позволяющих уменьшить потери компонентов с высокой упругостью паров (в данном случае Li), это нанесение на непогреваемую подложку аморфной пленки с последующей фотонной обработкой (ФО), инициирующей её кристаллизацию - результативный подход в постдепозитной обработке аморфных пленок [3].

В данной работе исследован край оптического поглощения аморфных и поликристаллических пленок LN. Аморфные пленки LN наносили на непогреваемые пластины фторфлогопита методом ВЧМР в газовой смеси $\text{Ar}+\text{O}_2$. Кристаллизацию LN проводили ФО пленок на воздухе в течение 1с. Наблюдали оптические переходы, отвечающие прямой (E_g^{dir}) и непрямой (E_g^{indir}) запрещенным зонам LN. Для аморфных пленок LN E_g^{dir} близка соответствующей величине для массивного LN (4эВ). Установлено, что аморфные пленки, нанесенные в газовой смеси $\text{Ar}/\text{O}_2=60/40$ имеют на 5% меньшую ширину E_g^{dir} в сравнении с аморфными пленками, нанесенными в газовой смеси $\text{Ar}/\text{O}_2=90/10$. Напротив, ширина E_g^{indir} для пленок, нанесенные в газовой смеси $\text{Ar}/\text{O}_2=60/40$ превышает на 20% соответствующую величину для пленок, нанесенных в газовой смеси $\text{Ar}/\text{O}_2=90/10$. Не выявлено существенного различия в ширине E_g^{dir} для аморфных и поликристаллических пленок LN после ФО, а величина E_g^{indir} может быть неодинаковой. Замечено, что E_g^{indir} больше в кристаллических пленках в сравнении с аморфными, если они нанесены в газовой смеси с малой долей кислорода, тогда как в пленках, осажденных в газовой смеси $\text{Ar}/\text{O}_2=60/40$, эта величина становится меньше. Т.е. ширина непрямой запрещенной зоны поликристаллических пленок LN, синтезированных в процессе ФО, может быть больше или меньше E_g^{indir} исходных аморфных пленок, что предопределено составом реактивной плазмы Ar/O_2 ВЧМР при их нанесении.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-11062 мк).

Литература:

1. M. Sumets, Lithium Niobate-Based Heterostructures: Synthesis, Properties and Electron Phenomena, IOP Publishing Ltd, Bristol, UK, 2018.

2. M. Sumets, A. Kostyuchenko, V. Ievlev, S. Kannykin, V. Dybov, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 26 (2015) 4250–4256.
3. V.M. Ievlev, Russ. Chem. Rev. 82 (2013) 815–834.

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ Ge/Si СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ Si/SiO₂/Si (100)

Сушков А.А., Павлов Д.А., Денисов С.А., Чалков В.Ю.

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, sushkovartem@gmail.com*

Сформированы и исследованы буферные слои Ge/Si на подложках Si/SiO₂/Si (100) (КНИ) при разных температурах роста. Слой Si выращен с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, а слой Ge получен методом «горячей проволоки». Структурные исследования проведены с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEOL JEM-2100F (200кВ). Перспектива создания подобных структур сводится к наращиванию на них высокого кристаллического и оптического качеств лазерных структур, совместимых с кремниевой радиационно-стойкой КМОП-технологией.

Изображения поперечного среза гетероструктур КНИ, полученные с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), демонстрируют близкую к атомарно-гладкой поверхность приборного слоя Si. На ПЭМ-изображениях поперечного среза гетероструктур КНИ не было обнаружено контраста, связанного с дефектами. Эти результаты указывают на то, что кристаллическое качество гетероструктуры КНИ не уступает таковому для подложки Si, на которой уже создают лазерные структуры на основе полупроводников группы A³B⁵ через буферные слои Ge/Si [1]. В ходе работы продемонстрированы сложности, которые возникают в процессе роста Ge/Si слоев на КНИ. Радиационно-стойкая гетероструктура КНИ, по сравнению с объемной Si-подложкой, имеет приборный слой Si, который изолирован от подложки Si скрытым слоем SiO₂. Как известно, поверхность Si подвержена интенсивному окислению на воздухе с образованием аморфного материала – диоксида кремния. Для того чтобы убрать SiO₂ с поверхности подложки проводят ее отжиг и рост буферного слоя Si в вакууме. Экспериментальным путем была найдена оптимальная температура отжига подложки Si, которая составляет 1200°C. Хотя такой температурный режим способствует устранению оксида с поверхности, он отрицательным образом сказывается на скрытом слое SiO₂ гетероструктуры КНИ. Следовательно, температуру отжига КНИ следует

снижать. Исследование поперечного среза гетероструктур Ge/Si/КНИ показало, что отжиг подложки КНИ при температуре 900°C не полностью устраняет с поверхности КНИ диоксид кремния, но при этом сохраняет скрытый в КНИ слой SiO₂. Оставшийся после отжига на поверхности КНИ диоксид кремния способствует нарушению сплошности буферного слоя Si, выращенного на КНИ при температуре роста 800°C. Уменьшение температуры роста буферного слоя Si с 800°C до 600°C привело к формированию сплошного буферного слоя Si. Релаксация упругих напряжений в процессе эпитаксиального роста слоя Ge на Si происходила с образованием преимущественно таких дефектов как дислокации, которые прорастали к поверхности. Несмотря на то, что в данной работе удалось подобрать такие температуры отжига КНИ и роста буферного слоя Si, при которых сохраняется встроенный в КНИ слой SiO₂ и формируются сплошные Ge/Si буферные слои, тем не менее, требуются дальнейшие исследования, с целью уменьшить число дислокаций, зародившихся на гетерогранице Ge/Si и прорастающих к поверхности структуры Ge/Si/КНИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10061).

1. Aleshkin V.Ya. et al. Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 109, № 061111.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Zr-Si-B

Сытченко А.Д., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

alina-sytchenko@yandex.ru

Покрытия на основе диборида циркония являются перспективным материалом для защиты поверхности деталей аэрокосмической, военной техники и др. от воздействия высоких температур. В свою очередь покрытия ZrB₂ обладают твердостью на уровне 25 ГПа, коэффициентом трения $f = 0,6-0,75$ [1] и стойкостью к окислению до 700 °С. Стойкость покрытий ZrSiB к высоким температурам напрямую зависит от состава: увеличение концентрации кремния способствует снижению скорости окисления в 9 раз [2]. Для практического применения является немаловажным установление влияния свойств материала подложки на поведение поверхностного слоя в процессе эксплуатации. Материал подложки оказывает влияние на коэффициент трения, скорость и характер

износа, а также жаростойкость покрытий [3, 4]. Данная работа посвящена исследованию структуры и трибологических свойств покрытий Zr-Si-B, ранее изученных на модельных подложках из оксида алюминия, осаждённых методом магнетронного распыления на подложки из сплавов молибдена, хрома и твёрдого сплава.

Нанесение покрытий методом магнетронного напыления осуществляли с помощью установки на базе откачивающей системы УВН-2М с использованием мишени ZrSiB (25 ат.% Zr, 25 ат.% Si, 50 ат.% В) в атмосфере Ar (99,9995%). В качестве подложек использовались диски из твердого сплава ВК6М размером $\text{Ø}30 \times 5$ мм, диски из МЧ-1 размером $\text{Ø}18 \times 14$ мм и диски из сплава Х65НВФТ размером $\text{Ø}25 \times 5$ мм. Структура покрытий была исследована методом РФА на дифрактометре D8 Advance, а также растровой электронной микроскопии на приборе S-3400 Hitachi с ЭДС-приставкой Noran-7 Thermo. Элементные профили получали на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда Profiler-2 HORIBA JY. Трибологические испытания по определению коэффициента трения покрытий проводили на высокотемпературном трибометре CSM Instruments по схеме «стержень-диск» при нагрузке 1 Н. Испытание на динамическое воздействие осуществляли с помощью прибора Impact Tester CemeCon при нагрузках 100, 300 и 500 Н. Для определения геометрических размеров дорожек износа и кратеров использовали оптический профилометр WYKO-NT1100.

Все покрытия обладали равномерной структурой без выраженных столбчатых элементов. Покрытия ZrSiB однородны по составу, толщина покрытий составила 12 мкм. Покрытия, полученные на подложках из сплава Х65НВФТ и МЧ-1, показали схожие значения f на уровне 0,69-0,72. Однако, образец, осажденный на твердый сплав, на этапе приработки обладал низким $f < 0,2$ на протяжении 10 м дистанции. Для остальных образцов этапа приработки не наблюдалось. Испытания на стойкость к ударно-динамическим нагрузкам показали, что покрытия по сравнению с непокрытыми подложками имеют интенсивный латеральный износ, но при этом сокращают глубину деформации. Образец, полученный на ВК6М, обладал наименьшей глубиной кратера при нагрузках 100, 300 и 500 Н. Проведено сопоставление физико-механических свойств подложек и характера разрушения покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00187).

Список литературы:

1. Y. Dong, T.-G. Wang, B. Yan and others // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 26. P. 806.
2. F.V. Kiryukhantsev-Korneev, I.V. Yatsyuk // Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82. P. 1
3. R. Saha, W.D. Nix // Acta Materialia. 2002. Vol. 50. P. 23-38.
4. Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, М.И. Петржик. Нанотехнологии: наука и производство. 2018. Т. 1. С. 3-17.

СУБСТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР



Юраков Ю.А.¹, Пешков Я.А.¹, Ивков С.А.¹, Ситников А.В.²,
Домашевская Э.П.¹

¹*Воронежский государственный университет, Воронеж*

²*Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

yurakov@phys.vsu.ru

Интерес к многослойным наноструктурам (MLs) с гигантским магнитосопротивлением, спин-зависимым электронным туннелированием и аномальным эффектом Холла, недостижимыми в объемных материалах, за последние годы значительно возрос из-за применений в спинтронике и СВЧ электронике. В данной работе определяются периоды сверхрешетки MLs $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{In}_2\text{O}_3/\text{C}]_{46}$, где 46 - это количество повторений трёхслойной структуры.

MLs $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{In}_2\text{O}_3/\text{C}]_{46}$ с разными толщинами слоев в триадах, в сумме составляющих период сверхрешётки, были получены попеременным ионно-лучевым распылением трёх мишеней ионами аргона с осаждением на непогреваемую подложку из стекла. Первой мишенью была пластина аморфного сплава $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ с накладками из кварца SiO_2 , вторая мишень представляла собой керамическую пластину In_2O_3 , а третьей мишенью служила пластина графита.

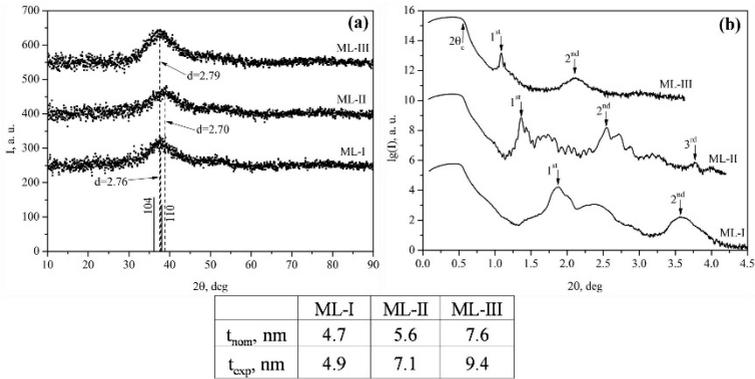


Рисунок 1 – Дифрактограммы (CoK α -излучение) многослойных наноструктур и штрих-диаграмма In₂O₃ (a); рефлектограммы (CuK α -излучение) MLs-I, II, III (b).

Таблица 1. Номинальные и экспериментальные значения периодов сверхрешёток исследованных MLs.

Дифрактограммы характеризуют рентгеноаморфное состояние ферромагнитных кластеров CoFeB, диэлектрической компоненты SiO₂ и углерода (рис. 1(a)). Положение широкой полосы отражений в области углов $2\theta=32-45^\circ$ соответствует аморфной фазе оксида индия In₂O₃, самые интенсивные линии ромбоэдрической фазы R-3c которого имеют межплоскостные расстояния $d=2.88 \text{ \AA}$ (104) и $d=2.74 \text{ \AA}$ (110). Данные рентгеновской рефлектометрии (рис. 1(b)) позволили определить периоды сверхрешёток MLs (Таблица 1), которые показывают существенное увеличение по сравнению с номинальными значениями. Кроме того, ML-I, обладающая наименьшими толщинами слоёв, демонстрирует широкие брэгговские максимумы, свидетельствующие о структурной неоднородности.

СЕКЦИЯ 3

Объемные наноматериалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ И ДЕФОРМАЦИИ

Аронин А.С., Абросимова Г.Е.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

aronin@issp.ac.ru

Одним из основных методов получения нанокристаллических материалов является контролируемая кристаллизация металлических стекол, как правило, с помощью термообработки. Таким образом наноструктура была получена в широкой группе сплавов. В последние годы наноструктуры из аморфного состояния были получены также и методами интенсивной пластической деформации. Применение деформационного воздействия позволило расширить группу сплавов, в которых была сформирована наноструктура. Установлены особенности такой структуры по сравнению с образованной при термообработке, в частности, различие характерного размера и расположения нанокристаллов. Нанокристаллы, образованные при деформации, являются более дисперсными по сравнению с нанокристаллами, образованными при термообработке. К особенностям наноструктуры, индуцированной деформацией, можно отнести связь образующихся нанокристаллов с местами локализации пластической деформации – полосами сдвига, в которых повышена концентрация свободного объема, показано, что полосы сдвига являются зонами пониженной плотности и повышенной подвижности атомов. С увеличением степени пластической деформации концентрация свободного объема увеличивается, что вызывает увеличение подвижности атомов. Вследствие этих причин в полосах сдвига облегчается образование нанокристаллов. Поскольку образование нанокристаллов в полосах сдвига при деформации происходит быстрее, чем формирование нанокристаллов при отжиге, их формирование зависит от температуры в полосе, величины деформации и скорости распространения полосы, а также физических параметров, определяющих тепловые характеристики аморфной фазы в области полосы сдвига. Важно отметить, что образование нанокристаллов в полосах сдвига может происходить и при комнатной температуре уже после деформации. В таких случаях образование нанокристаллов определяется не разогревом материала в полосах сдвига, а пониженной плотностью материала в этих зонах.

В настоящей работе приведены данные исследований образования нанокристаллов при термических, деформационных и комплексных воздействиях на аморфные сплавы на основе алюминия, железа в виде лент и массивных аморфных сплавов на основе циркония, а также их характеристик в зависимости от параметров внешних воздействий (вида и величины деформации, температуры обработки, состава и структуры аморфных сплавов). Получены данные по расположению нанокристаллов в деформированных образцах. Исследования структуры и состава проведены методами рентгенографии, просвечивающей, сканирующей и высокоразрешающей электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии. Деформация осуществлена методами многократной прокатки и кручения под давлением при комнатной температуре. Локальные особенности структуры и состава аморфных сплавов после деформации и при образовании нанокристаллов исследованы методами зондовой микроскопии и рентгеновского микроанализа (в геометрии на просвет и отражение).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 19-03-00355).

Приглашенный доклад

ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС СДВИГА В ОБЪЕМНОМ АМОРФНОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Хрипливец И.А., Глезер А.М., Сундеев Р.В.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, misshriplivets@mail.ru*

В последние годы активное развитие получили методы создания мегапластических деформаций, которые заметным образом изменили наши представления о структурных и фазовых превращениях при механических воздействиях. В случае, когда аморфные сплавы подвергаются, например, кручением под высоким квазигидростатическим давлением пластическое течение сопровождается заметным ростом объемной плотности полос сдвига и делокализацией пластической деформации. Деформация осуществляется, как правило, сильно локализованными полосами сдвига, имеющими толщину около 20-30 нм и реализующими локальную деформацию порядка 1000 %. Формирование и эволюция полос сдвига контролируют текучесть и пластичность почти всех металлических стекол при комнатной температуре, и во многих

случаях образование доминирующих полос сдвига быстро приводит к разрушению.

Сложно обнаружить и охарактеризовать в экспериментах сдвиговое преобразование, поэтому большое количество работ посвящены именно моделированию процесса формирования полос сдвига в аморфных сплавах.

В данной работе предпринята попытка исследования эволюции формирования полос сдвига в объемном аморфном сплаве на основе циркония ($Zr_{60}Ti_2Nb_2Cu_{18,5}Al_{10}$) в результате воздействия кручения под высоким давлением. С помощью оптической профилометрии показано, что образцы после деформации в камере Бриджмена демонстрируют более развитый рельеф поверхности в 10 раз большую глубину ямок рельефа, чем аналогично подготовленный образец исходного состояния сплава $Zr_{60}Ti_2Nb_2Cu_{18,5}Ni_{7,5}Al_{10}$. А также показано, что формирование полос сдвига в результате деформации кручением происходит не однородно, и наибольшая локализация полос сдвига приходится на край образца.

Работа выполнена при государственной поддержке в рамках реализации программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСЦ» (грант № К2А-2018-055 и К2-2017-089).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ КОМПОНЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

Абросимова Г.Е., Аронин А.С.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

gea@issp.ac.ru

Для формирования нанокристаллической структуры в аморфной фазе необходимо обеспечить высокую скорость зарождения кристаллов и низкую скорость их роста. При создании первого нанокристаллического сплава Finemet использовался принцип легирования аморфного сплава нерастворимым в нем компонентом (Cu), кластеры которого служили местами гетерогенного зарождения ОЦК нанокристаллов Fe или твердого раствора (Fe(Si)). В состав сплава добавлялся также ниобий, имеющий низкий коэффициент диффузии и обеспечивающий малую скорость роста. Этот подход получил широкое распространение и для металлических стекол другого состава.

В настоящем исследовании рассматривается возможность другого пути образования нанокристаллов в аморфной фазе, основанного на

анализе подобия решеток легирующих компонентов и образующейся на начальной стадии кристаллизации основной (стабильной или метастабильной) фазы. При неоднородном распределении компонентов в областях, обогащенных легирующим компонентом, возможно образование упорядоченной структуры. В этом случае наличие определенных ориентационных соотношений между решетками легирующего элемента и образующейся кристаллической фазы будет способствовать увеличению количества потенциальных мест и скорости зарождения нанокристаллов.

Методами рентгенографии и просвечивающей электронной микроскопии исследовано влияние концентрации легирующих компонентов на кристаллизацию широкой группы аморфных сплавов $(\text{Fe}_{73}\text{Si}_{13}\text{B}_9)_{100-x-y}\text{Nb}_x\text{Cu}_y$, $(\text{Co}_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_9)_{100-x-y}\text{Fe}_x\text{Nb}_y$, $(\text{Co}_x\text{Fe}_y)\text{Nb}_8\text{B}_{20}$, $(\text{Co}_x\text{Fe}_y)\text{Ti}_8\text{B}_{20}$. Показано, что образование ОЦК структуры в обеих группах сплавов существенно зависит от концентрации легирующих компонентов. Установлено, что формирование нанокристаллов α -фазы зависит от концентрации легирующих элементов с ОЦК решеткой, причем в некоторых случаях для этого необходимо присутствие двух элементов с такой структурой. Доля нанокристаллической фазы зависит от химического состава сплава. Установлено, что в исследованных сплавах для образования ОЦК нанокристаллов необходимо не менее 7 ат.% Fe и более 1 ат.% Nb, при концентрации железа менее 7 ат.% и отсутствии ниобия ОЦК фаза не образуется; при замене ниобия на титан образование ОЦК фазы возможно только при большом содержании Fe. Образование нанокристаллов с ОЦК решеткой может зависеть как от наличия в составе сплава компонента с такой решеткой, так и присутствием элемента, способствующего расширению области существования α -фазы на диаграмме фазового равновесия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 19-02-00406).

**НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ОСОБО
ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ И НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ
СВЯЗКОЙ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Авдеенко Е.Н., Зайцев А.А., Коняшин И.Ю., Замулаева Е.И.,
Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, avdeenko.misis@mail.ru*

Твердые сплавы группы ВК являются самыми эффективными твердыми материалами, получаемыми методом порошковой металлургии, поскольку обладают уникальным сочетанием твердости/износостойкости и прочности/трещиностойкости, а также целым рядом прочих полезных свойств. Сочетание высокой твердости и трещиностойкости имеет принципиальное значение для эффективной работы инструмента в неблагоприятных условиях эксплуатации, например, при операциях резании и бурении бетона и горных пород, геологоразведочном бурении, бурении на нефть и газ и др. При эксплуатации в этих условиях твердосплавный инструмент испытывает усталостные ударные, сжимающие и изгибающие нагрузки, а также подвергается интенсивному абразивному износу. Поэтому повышение механических и эксплуатационных свойств инструмента является первоочередной задачей для эффективной работы инструмента.

Заметного улучшения свойств можно добиться путем создания сплавов с особо однородной структурой, а также дисперсного упрочнения кобальтовой связки высокомодульными и термически стабильными наночастицами.

В работе использовался узкофракционный порошок карбида вольфрама с размером зерен от 5 до 15 мкм, кобальт марки extrafine (Бельгия), порошок карбида тантала TaC марки HGS (Германия). Жидкофазное спекание проводилось в вакуумно-компрессионной печи при температурах 1390-1475 °С. Установлено, что легированный карбидом тантала твердый сплав, полученный в оптимальных технологических режимах, обладает однородной микроструктурой со средним размером зерен 5,2 мкм. При этом зерна WC имеют округлую форму. Исследование связующей фазы твердого сплава методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показало выделения фазы ($W_xTa_yCo_zC_i$) в виде наночастиц размером 1-4 нм.

Полученный крупнозернистый твердый сплав обладает уникальной комбинацией предела прочности при трехточечном изгибе $\sigma_{изг}=2490$ МПа, трещиностойкости $K_{IC}=15,9$ МПа·м^{1/2}, твердости $HV_{10}=11,7$ ГПа и

износостойкости $1,09 \times 10^{-4}$ см³/об, что значительно превосходит свойства твердых сплавов получаемых по стандартной технологии.

По результатам промышленных испытаний образцов инструмента, установлено, что повышение износостойкости горных резцов, оснащенных крупнозернистыми твердыми сплавами с наномодифицированной связкой, относительно стандартных составляет 107 %, а эксплуатационная прочность и стойкость к образованию термически трещин разработанных иерархических твердых сплавов значительно превышает стандартный крупнозернистый твердый сплав ВК8-В.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 20-08-00750/20)

МЕХАНИЗМЫ ФРАГМЕНТАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ С ГЦК, ОЦК И ГПУ РЕШЕТКОЙ ПРИ СВОБОДНОМ ИЗГИБЕ

Аксенов Д.А.^{1,2}, Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Рааб Г.И.², Рааб А.Г.²

¹*Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное
подразделение ФГБНУ УФИЦ РАН, Уфа*

²*Институт физики перспективных материалов при УГАТУ, Уфа
aksvonovda@mail.ru*

Известно, что методы ИПД позволяют существенно увеличить прочность материалов за счет активной структурной фрагментации вплоть до ультрамелкозернистого состояния и реализации в процессе деформации неравновесных фазовых превращений. Однако, закономерным отрицательным эффектом такого упрочнения является существенное снижение пластичности материала, что отражается на сфере использования и технологичности таких материалов. Одним из эффективных решений позволяющий увеличить прочность и сохранить высокий уровень пластичности является формирование структуры градиентного типа. Так, например, измельченный до УМЗ состояния поверхностный слой проволоки, повышает общую прочность и износостойкость, а крупнозернистое состояние в центральной области позволяет сохранить пластические свойства материала, при этом сохраняется технологичность для дальнейшей деформационной обработки и измельчения структуры.

В этой связи, в работе в качестве исследуемого метода деформации ведущего к формированию структуры градиентного типа был выбран метод свободного изгиба цилиндрического длинномерного образца. Такой подход обусловлен тем, что при изгибе наблюдается несущественное

уменьшение поперечного сечения и более высокая интенсивность накопления деформации в периферийных слоях деформируемых объектов. Для исследования характера трансформации структуры в процессе свободного изгиба были выбраны промышленные материалы с разным типом кристаллической решетки - электропроводный сплав Cu-0,6Cr (ГЦК) в состоянии пересыщенного твердого раствора, титан марки Grade 4 (ГПУ) и псевдотитановый сплав Ti-15Mo (ОЦК). Деформация проводилась до максимально допустимого количества циклов изгиба, при которых не наблюдается разрушение образцов. Так для сплава Cu-0,6Cr такое количество составило 8 циклов, для Ti Gr4 и Ti-15Mo - 4 цикла. Изгиб проводился по маршруту А (изгиб в одну сторону) и С (знакопеременный изгиб в противоположные стороны).

По результатам исследования структуры (РЭМ, EBSD) и микротвердости, показано что:

- в сплаве Cu-0,6Cr формируется структура градиентного типа за счет фрагментации зерен, их границ и процесса двойникования в периферийных областях (3,6-4,5 мкм) и преимущественно двойникования в центральной части образца (≈ 45 мкм);

- в титане Grade 4 основным механизмом фрагментации является двойникование. Размер зерен в периферийной области и в центре практически не изменяется и близок к исходному размеру зерна 7,8-8,5 мкм;

- в сплаве Ti-15Mo размер зерен в периферийной и центральной области не отличается, сохраняется исходный бимодальный тип структуры, размер зерен преимущественно составляет ≈ 70 и ≈ 20 мкм, фрагментация зерен происходит за счет формирования полос и двойников деформационного происхождения.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.586.21.0059 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0059)

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ЗАГОТОВКИ ИЗ СПЛАВА Cu-0,6Cr, ПОДВЕРЖЕННОГО
ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ**

Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Рааб Г.И.², Аксенов Д.А.^{1,2}, Рааб А.Г.²

¹ *Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение ФГБНУ УФИЦ РАН, Уфа*

² *Институт физики перспективных материалов при УГАТУ, Уфа*
a.r.n@list.ru

Выбор температурно-скоростных условий деформации является одним из ключевых факторов определяющих режим термомеханической обработки металлических материалов. При этом в условиях интенсивной пластической деформации (ИПД) величина деформационного разогрева может достигать значительных величин, что в свою очередь оказывает заметное влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки, трансформацию структуры и фазовые превращения.

Целью настоящей работы является исследование напряженно-деформированного состояния и теплового эффекта в заготовке из низколегированного медного сплава Cu-0,6Cr в условиях интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием. Для этого проведено физическое моделирование осадки образцов на установке Gleeble 3500 при температурах 20, 400 и 800 °С и скоростях деформирования 3, 30 и 300 мм/сек. На основе полученных данных проведено компьютерное моделирование процесса равноканального углового прессования (РКУП) в программном комплексе Deform 3D. В результате получены поля распределения напряжений, деформации, температуры (деформационный разогрев) и силовые характеристики процесса РКУП в зависимости от различных исходных температурно-скоростных условий. Установлено, что увеличением исходной температуры величина деформационного разогрева уменьшается. Так при скорости деформирования 30 мм/сек, при исходной температуре 20 °С разогрев основного объема круглой заготовки диаметром 20 мм составил 80-90 °С, при 400 °С – 50-60 °С. Исследовано применение двух вариантов исполнения матрицы – плоское и прямое. Выявлено, что применение конусной матрицы снижает деформационный разогрев а, соответственно и тепловые нагрузки на инструмент. Показано, что с увеличением скорости деформирования до 300 мм/сек. в полтора раза увеличиваются необходимые силы прессования а, соответственно, увеличиваются напряжения при прессовании и нагрузки на инструмент.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00432).

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ СПЛАВОВ Al-Mg₂Si С ДОБАВКАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.

Бочвар Н.Р.¹, Рыбальченко О.В.^{1,2}, Леонова Н.П.¹, Табачкова Н.Ю.^{2,3},
Рыбальченко Г.В.⁴, Рохлин Л.Л.¹

¹Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН,
Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

⁴Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва
bochvar@imet.ac.ru

Алюминиевые сплавы на основе системы Al-Mg-Si, лежащие вблизи псевдобинарного сечения Al-Mg₂Si, упрочняются при старении в связи с образованием метастабильной фазы β'', когерентной матрице, и метастабильной фазы β', последовательность выделения которых зависит от термической обработки и дополнительного легирования. Повышение прочностных свойств и рекристаллизации сплавов может быть достигнуто легированием их Sc совместно с Zr или Hf, а также используя в качестве деформации равноканальное угловое прессование (РКУП). Переходные металлы создают дополнительное упрочнение в связи с образованием частиц (Sc_{1-x}, Zr_x)Al₃ или (Sc_{1-x}, Hf_x)Al₃, а упрочнение от РКУП происходит от создания ультра мелкозернистой структуры. Было выплавлено три сплава: Al-Mg₂Si, Al-Mg₂Si-(Sc+Zr), Al-Mg₂Si-(Sc+Hf), содержание легирующих элементов в которых составляло 0,8Mg, 0,5Si, 0,2Sc, 0,1Zr, 0,1Hf (% по массе). После гомогенизации слитков при 480°С- 4 часа. была проведена РКУП (4 прохода) при комнатной температуре по маршруту Вс с углом пересечения каналов 120°С. Последовательность выделения фаз в процессе старения сплавов, подвергнутых РКУП, была исследована методом ДСК анализа при линейном нагреве до температуры 600°С. На рис.1 приведены ДСК кривые сплавов поле РКУП, а для сравнения на рис.2 – кривые после закалки.

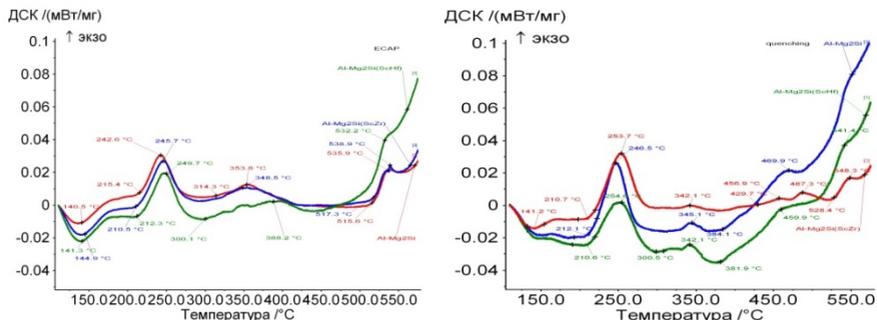


Рисунок 1 – ДСК пики после РКУП Рисунок 2 – ДСК пики после закалки

На двух рисунках красная кривая относилась к сплаву Al-Mg₂Si, синяя – к сплаву Al-Mg₂Si-(Sc+Zr), зеленая – к сплаву Al-Mg₂Si-(Sc+Hf).

Пики на двух рисунках отличались по температурам и форме. Первый пологий пик на рис. 1 для всех трех сплавов, который отсутствовал на кривых закаленных сплавов, начинался при температуре ~ 140°C, и его можно было считать началом выделения β'' фазы, а максимальный пик на этой плавной кривой приходился на температуру 175°C. Второй, ярко выраженный пик около 245°C соответствовал образованию фазы β'. Следующий экзотермический пик около 350°C отвечал образованию стабильной β (Mg₂Si) фазы. В отличие от кривых РКУП, три экзотермических пика на ДСК кривых закаленных сплавов показывали раздельное образование метастабильной фазы β'' (~ 250°C), метастабильной фазы β' (~ 350°C) и стабильной фазы β (~ 450°C). Таким образом, можно видеть, что влияние холодной пластической деформации на процессы старения Al-Mg₂Si сплавов с добавками переходных металлов не изменяли порядок выделения упрочняющих фаз, но сдвигали температуры их образования к более низким температурам по сравнению с закаленным состоянием.

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00947-20-00.

**ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА АМОРФНОГО ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА**

Галимзянов Б.Н.^{1,2}, Мокшин А.В.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Удмуртский федеральный научный центр Уральского отделения РАН,
Ижевск, bulatgnmail@gmail.com

Пористые металлические сплавы на основе никеля и титана обладают уникальной комбинацией физико-механических свойств, среди которых низкий удельный вес, высокая коррозионная стойкость, способность к поглощению энергии и хорошая биосовместимость. Эти свойства в большей степени зависят от параметров пористой структуры: от наличия в системе перколирующих или изолированных пор, а также от линейного размера и геометрической формы пор. Процесс синтеза аморфного металлического сплава с пористой структурой является весьма сложным из-за наличия определенных ограничений, диктуемых условиями получения аморфного состояния. А именно, для получения аморфного состояния без очагов кристаллической фазы требуются сверхбыстрые скорости охлаждения расплава и сверхбыстрый отвод тепла от объема системы, что крайне сложно осуществить в лабораторных условиях.

Среди интерметаллидов никелид титана (сплав $Ni_{50}Ti_{50}$ или $NiTi$) является наиболее известным и перспективным функциональным материалом. Производство пористого сплава $NiTi$ осуществляется, преимущественно, методами порошковой металлургии, среди которых методы лазерного и искрового плазменного спекания никель-титановых. Несмотря на достигнутые успехи в развитии технологий производства пористых металлических материалов, влияние параметров пористой структуры, таких как пористость, геометрическая форма и линейные размеры пор, на механический отклик системы $NiTi$ при внешних деформирующих воздействиях является малоизученным.

В настоящей работе методом моделирования молекулярной динамики исследовано влияние пористости и геометрической формы пор на механические свойства аморфного сплава никелида титана при одноосном растяжении, одноосном сжатии и однородном сдвиге. Мы находим, что мезопористому аморфному сплаву никелида титана соответствует более высокое значение модуля Юнга, что выявляется из анализа доступных экспериментальных данных, полученных при растяжении и сжатии пористой кристаллической системой. Обнаружено, что система с перколирующей пористой структурой, образованной в результате сращивания пор сферической формы, демонстрирует улучшенные показатели по сопротивляемости к растяжению и сдвигу. Показано, что система, состоящая из изолированных пор сферической

формы, более устойчива к деформации сжатием и менее устойчива к деформациям растяжением и сдвигом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект #19-12-00022).

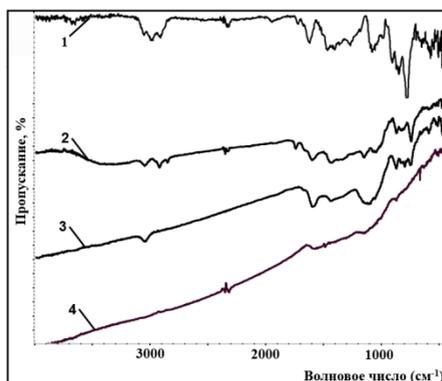
ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАНОСТРУКТУРОВАННОСТИ В КАМЕННОУГОЛЬНОМ ПЕКЕ, ОКИСЛЕННОМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОГРАФИТА

Дмитриев А.В.¹, Пыхова Н.В.¹, Кульницкий Б.А.²

¹ЧелГУ, Челябинск, avdm@ya.ru

² ФГБНУ ТИСНУМ, Россия, Троицк, Москва

Окисленный кислородом воздуха на поверхности пенографита (8% по массе смеси) каменноугольный пек структурируется в наномасштабе. В объеме слоев пека толщиной до 40 нм происходит образование онионоподобных частиц до 20 нм в поперечнике. На поверхности слоев пека отложение летучих приводит к образованию слоистости толщиной 5 нм, а также к росту онионов и нанотрубок длиной до 50 нм [1]. После деструкции в процессе обжига окисленный пек переходит в структуру кокса с фуллереноподобной структурой с включением онионоподобных частиц до 5 нм в поперечнике [2]. Процесс деструкции пека исследовали, используя ступенчатый подъем температуры обработки заготовок в интервале от 300°C до 700°C с выдержкой при заданной температуре 20 минут. Исследования микроструктуры проводили с использованием просвечивающего JEM 2010 электронного микроскопа. Также использовали элементный CHNS-O анализатор EuroEA-3000, дериватограф «TGA/DSC1 Mettler Toledo», фурье - спектрометр «Spectrum One B» фирмы «Perkin – Elmer».



Вид ИК спектра окисленного каменноугольного пека, см. график 1, соответствует данным ИК спектров для полиароматических углеводородов (ПАУ) [3]. Снижение интенсивности характерных для ПАУ пиков начинается с 600°C, продолжается при 650°C и при термообработке 700°C спектр практически соответствует коксу (графики 2, 3 и 4 соответственно). По данным химического анализа, удаление водорода наблюдается при температурах выше 550°C. Структурирование каменноугольного пека при окислении связано с образованием слоистой упаковки ПАУ. Слоистость упаковки молекул ПАУ обеспечивает образование наночастиц со структурой онионов. При осаждении молекул ПАУ на поверхности слоев пека из газовой фазы происходит образование поверхностной слоистости и нанотрубок. Наноструктурирование в результате слоистой упаковки ПАУ в окисленном каменноугольном пеке устойчиво до температур деструкции при коксовании. Образование слоистой упаковки ПАУ и структурирование в виде онионоподобных наночастиц соответствует наноструктурам на основе графита – графену, онионам и многослойным нанотрубкам.

Список литературы:

1. Dmitriev A., Kulnitskiy B. // Materials today: proceedings, Vol. 5, no. 12, pp. 26068 - 26072. DOI: [10.1016/j.matpr.2018.08.031](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.031)
2. Дмитриев А.В., Шанина О.М., Кульницкий Б.А. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». - 2016. - Т. 16. - № 1. - С. 149-156. DOI: [10.14529/met160122](https://doi.org/10.14529/met160122)
3. Борисенко А.В. Караганда: Изд-во КарГУ, 2007. 238 с. https://studopedia.ru/19_255009_opredeleniya-oboznacheniya-i-sokrashcheniya.html

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Ni-Mn- In ПОСЛЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Калетина Ю.В., Калетин А.Ю., Пилюгин В.П.

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,
kaletina@imp.uran.ru*

Интерес к нестехиометрическим ферромагнитным сплавам Гейслера трехкомпонентной системы Ni-Mn-X (X=Sn, Sb, In) связан с наличием в них управляемого магнитным полем структурного перехода, который может сопровождаться эффектом памяти формы, магнетокалорическим эффектом и магнетосопротивлением, а также

комплексом других практически важных функциональных свойств. Однако наряду с этим, ферромагнитные сплавы обладают хрупкостью и пониженной пластичностью, что является их существенным недостатком. Проблема обеспечения пластичности может быть достигнута при измельчении структуры, получении микро или нанокристаллического состояния.

В работе исследовали структуру и свойства нового синтезированного сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением при комнатной температуре. Исследуемый сплав подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 1123 К в течение 24 ч. После отжига сплав деформировали при комнатной температуре кручением под давлением 8 ГПа. Степень деформации варьировали от 0.5 до 5 оборотов.

В высокотемпературном состоянии сплав $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ имеет кубическую структуру типа $L2_1$. После отжига структура поликристаллическая, размер зерна изменялся от 200 до 500 мкм. При охлаждении наблюдали магнитный переход аустенита $L2_1$ из пара- в ферромагнитное состояние, а затем мартенситное превращение. Температуры структурного мартенситного превращения и магнитного перехода практически совпадают и близки к комнатной. Мартенситное превращение в сплаве $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ идет по типу $L2_1 \rightarrow I4M$ с образованием модулированной структуры мартенсита.

Показано, что после интенсивной пластической деформации отожженных образцов кручением под давлением 8 ГПа происходит существенное измельчение зеренной структуры. С ростом степени деформации кручением от 0 до 5 оборотов структура становится более однородной, наблюдается уменьшение размера кристаллитов, образуется нанокристаллическая структура с фрагментами зерен до 10 нм. Исследования изломов деформированных образцов показали, что увеличение степени деформации приводит к росту доли вязкой составляющей в изломе.

Установлено, что максимальное упрочнение наблюдается после деформации кручением на 2.5 оборота микротвердость с увеличением степени деформации возрастает в 1.5-2 раза по сравнению с отожженным состоянием, что связано с образованием нанокристаллической структуры и накоплением в ней дефектов. Обнаружено, что после кручения под высоким давлением при комнатной температуре магнитная восприимчивость ничтожно мала и не зависит от температуры.

Таким образом, интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением 8 ГПа при комнатной температуре сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ приводит к переходу структуры от микрокристаллического к

нанокристаллическому состоянию, повышению микротвердости с увеличением степени деформации и снижению уровня магнитной восприимчивости.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура», № АААА-А18-118020190116-6 при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-03-00056).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РКУП В ОБОЛОЧКЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ Ti-Ni

Карелин Р.Д.^{1,2}, Хмелевская И.Ю.², Комаров В.С.^{1,2}, Андреев В.А.¹,
Перкас М.М.¹, Юсупов В.С.¹, Прокошкин С.Д.²

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

rdkarelin@gmail.com

Применение интенсивной пластической деформации (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП) в цикле термомеханической обработки объемных заготовок из сплавов с памятью формы (СПФ) на основе Ti-Ni позволяет значительно улучшить их механические и функциональные свойства, за счет формирования ультрамелкозернистой структуры. При проведении РКУП СПФ Ti-Ni в классическом режиме (с паузами и подогревами заготовки между проходами), в данной группе сплавов удавалось сформировать только субмикрокристаллическую структуру, не обеспечивающую максимальный комплекс свойств. В ранее проведенных исследованиях было показано, что применение РКУП в квазинепрерывном режиме с углом пересечения каналов 120 градусов при температуре 400 °С за 5-7 проходов позволяет в заготовке диаметром 20 мм получить смешанную нанокристаллическую и наносубзеренную структуру со средним размером структурных элементов около 100 нм и повысить полностью обратимую деформации до 9,5 %. Попытка понижения температуры квазинепрерывного РКУП до 350 °С привела к разрушению заготовки уже после третьего прохода. При этом, данная обработка не привела к дополнительному измельчению структуры, а комплекс свойств, оказался ниже, по сравнению с квазинепрерывным РКУП при 400 °С за 5-7 проходов.

В данной работе с целью дополнительного измельчения структуры была предпринята попытка проведения РКУП околэквиаторного сплава никелида титана в оболочке при пониженных температурах деформации. В качестве оболочки на первом этапе использовали ст.3. Проведение РКУП с углом пересечения каналов 120 градусов, при температурах 350, 330 (без предварительного нагрева) и при комнатной температуре показало, необходимость использования другого материала оболочки, так как при проведении всех исследуемых режимов РКУП происходило разрушение оболочки в течение первого прохода. В этой связи следующий эксперимент был проведен с использованием оболочки из чистого железа, с внешним диаметром 20 мм, и двух вариантов диаметров образцов из никелида титана – 6 и 12 мм. Длина оболочки составляла 95 мм, длина образцов – 85 мм, угол пресечение каналов составлял также 120 градусов. Проведение РКУП при комнатной температуре без предварительного нагрева и при температуре 100 °С с предварительным нагревом в течение 30 минут привело к разрушению заготовок из никелида титана, при этом целостность оболочек сохранялась. Успешное прессование образцов СПФ Ti-Ni диаметром 6 и 12 мм удалось провести при температуре 200 °С за один проход. В результате проведения исследований механических свойств образца диаметром 12 мм путем испытаний на растяжение и измерения твердости было установлено, что по сравнению с контрольной обработкой (закалка горячекованого прутка диаметром 12 мм с 750 °С в течение 30 мин с охлаждением в воде) уже за один проход РКУП при 200 °С в оболочке произошло заметное увеличение твердости (с 177 до 271ед. HV), а также дислокационного предела текучести и предела прочности (с 520 и 945 до 1045 и 1200 МПа соответственно). В результате проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности использования РКУП в оболочке с точки зрения улучшения свойств СПФ Ti-Ni.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
СЖАТИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
СВОЙСТВА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ НИКЕЛИДА
ТИТАНА**

Комаров В.С.^{1,2,3}, Хмелевская И.Ю.², Карелин Р.Д.^{1,2},
Кавалла Р.³, Юсупов В.С.¹, Прокошкин С.Д.²

¹Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³Технический университет Фрайбергская горная академия, Фрайберг,
Германия

komarov@misis.ru

Сплавы системы Ti-Ni, проявляющие эффект памяти формы, входят в число перспективных, активно развивающихся функциональных материалов. Получение наиболее высоких свойств никелида титана возможно при формировании в сплаве полностью нанокристаллической структуры, которую ее до настоящего времени не удалось получить в объемных заготовках этих сплавов. Определение оптимальных режимов деформации никелида титана затруднено в связи отсутствием систематизированных данных о деформационном поведении, формирующейся структуре и комплексе функциональных свойств данных сплавов при температурах ниже температуры рекристаллизации (600 °С), что не позволяет в полной мере оценить возможности их практического применения, в том числе с точки зрения технологичности.

В данной работе была проведена деформация сжатием сплавов с памятью формы (СПФ) на основе Ti-Ni в широком интервале температур и выполнено исследование режимов данной термомеханической обработки на эволюцию фазового состава, структуры и комплекса функциональных свойств СПФ Ti-Ni. Структура, субструктура и фазовый состав сплава был исследован методами рентгеноструктурного анализа, световой и просвечивающей электронной микроскопии. Функциональные свойства (величина полностью обратимой деформации, степень восстановления формы) были определены термомеханическим методом, включающем деформацию изгибом и нагрев для восстановления формы.

Всесторонний анализ результатов исследований позволил установить закономерности развития процессов деформационного упрочнения и разупрочнения СПФ Ti-Ni в широком интервале температур деформации сжатием. Показано, что температура деформации 300 °С является граничной для перехода от низкотемпературного типа диаграмм деформации к высокотемпературному, установлены температурные области развития динамических процессов разупрочнения СПФ Ti-Ni.

Были определены режимы термомеханической обработки, при которых способность сплава к формовосстановлению значительно повышается. На основании полученных результатов, выявленных закономерностей и особенностей деформационного поведения, структурообразования, формирования механических и функциональных свойств разработаны рекомендации по применению оптимальных режимов термомеханической обработки СПФ Ti-Ni.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60090.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОРИСТОЙ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКЕ ГИДРОКСИАПАТИТА В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ

Иевлев В.М.^{1,2}, Костюченко А. В.³, Кочлар Г.С.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Воронежский государственный университет, Воронеж

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж

av-kostuchenko@mail.ru

Синтез и свойства керамики из гидроксиапатита ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2$) как материала, применяемого в инженерии костной ткани, экстенсивно исследуются. Синтез керамики проводят спеканием порошкового компакта, активируемым традиционной термической обработкой, микроволновым нагреванием, искровым плазменным спеканием. Эволюция пористости в процессе спекания керамики ГА изучена на уровне оценки изменения доли свободного объема с изменением температуры или времени отжига, достигаемой предельной ее величины. Исследования процесса спекания порошковых компактов выявили стадийность этого процесса: первая стадия (до 750 °С) проходит без изменения плотности образцов и включает срастание частиц с образованием шеек между ними; начиная с 750 °С происходит уплотнение, включающее формирование границ зерен; третья стадия характеризуется в большей степени субструктурными изменениями, и её целесообразно не относить к процессу спекания, а рассматривать как процесс собирательной рекристаллизации [1, 2]. Имеющиеся представления достаточны в технологическом аспекте, но в фундаментальном аспекте необходимо установление закономерностей и механизма морфологических и субструктурных превращений, происходящих в объеме исходного компакта с увеличением температуры отжига в пределах обеих стадий процесса спекания.

В данной работе сделана попытка установить закономерности морфологических изменений свободного пространства и формирования субструктуры в процессе спекания компакта из нанокристаллического ГА. Методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (ПЭМ и СЭМ) исследована микроструктура керамики ГА, полученной холодным прессованием нанокристаллического порошка гидроксиапатита и последующим отжигом в течение 1 часа при 150, 300, 450, 600, 750 и 900°С.

По результатам исследования микроструктуры поверхности скола образцов, отожженных при разной температуре, установлены следующие закономерности, характеризующие эволюцию пор:

- увеличение размера пор при снижении их количества на единицу площади поверхности скола как следствие процесса коалесценции;
- сохранение анизотропии формы пор (рис.1);
- образование приповерхностного слоя с меньшим содержанием пор и меньшим размером в сравнении с внутренней областью (образование «корки»);
- проявление огранки поверхности пор при температуре 900°С (рис. 1d₁, 1d₂).

Эволюция свободного объема при спекании компактов ГА требует рассмотрения механизма движения и коалесценции пор, который, исходя из особенностей кристаллохимического строения ГА (сложный состав, наличие структурных элементов с ковалентной связью образующих их атомов, объединенных посредством ионной связи [1]), может иметь недиффузионную природу.

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНОЙ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

$\text{Me}^{\text{IV}}\text{B}_2\text{-(Me}^{\text{IV}}, \text{Mo})\text{Si}_2$, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДАМИ СВС И ГП

Лемешева М.В.¹, Погожев Ю.С.¹, Потанин А.Ю.¹, Левашов Е.А.¹,
Вершинников В.И.², Рупасов С.И.¹

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им.
А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка
lemescheva.margarita@yandex.ru

Благодаря уникальному набору свойств [1-3] материалы на основе боридов и силицидов металлов Zr, Hf и Mo применяют для создания теплонагруженных элементов конструкций, работающих в условиях

высоких температур и окислительной атмосферы. Возможными способами получения подобной многофазной порошковой керамики является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) и горячее прессование (ГП).

В работе гетерофазные керамические порошки получали методом СВС по схемам синтеза из элементов (Zr, Hf, Mo, Si, B) и магнийтермического восстановления оксидов (ZrO_2 , HfO_2 , MoO_3 , SiO_2 , B_2O_3). Полученные СВС порошки консолидировали методом ГП, а также использовали в качестве прекурсоров для получения углерод-керамических материалов путем инфильтрации расплава в углеродный каркас.

Гетерофазные порошки были представлены полиэдрическими частицами со средним размером 6-8 мкм и фазами ZrB_2/HfB_2 , $ZrSi_2/HfSi_2$, $MoSi_2$, $ZrSi$. Консолидированные образцы обладали схожими фазовыми составами. Микроструктура ГП образцов состояла из прямоугольных зерен ZrB_2/HfB_2 (3-9 мкм) распределенных в матрице $ZrSi_2/HfSi_2$ и включений $MoSi_2$. В тонкой структуре обнаружены зерна ZrB_2 , $MoSi_2$ и $ZrSi_2$ размером 1-5 мкм и ZrO_2 - менее 0,5 мкм. Кроме этого, внутри зерен $MoSi_2$ обнаружены эвтектические колонии $ZrSi_2-MoSi_2$ размером 50–300 нм (рисунок 1а). В результате инфильтрации расплава СВС-порошков в составе базовой смеси Zr-Si удалось получить УККМ на основе β -SiC, (Zr,Mo)C, (Hf,Mo)C с наноразмерными включения ZrB_2 (10-30 нм) (рисунок 1б).

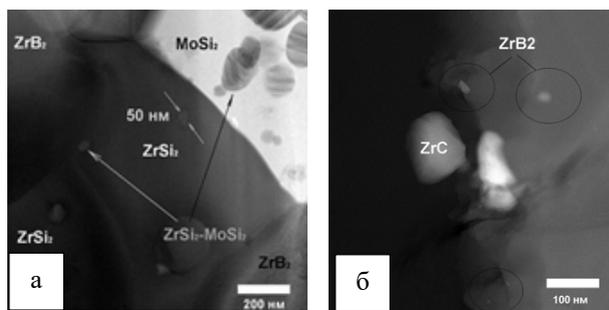


Рисунок 1 – Микроструктура ГП образца (а) и УККМ (б), полученная с помощью ПЭМ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00269.

1. M.M. Nasser. Comparison of HfB₂ and ZrB₂ behaviors for using in nuclear industry, *Annals of Nuclear Energy*, 2018, Vol. 114, P. 603-606.
2. D. Sciti, A. Balbo, and A. Bellosi. Oxidation behavior of a pressureless sintered HfB₂-MoSi₂ composite, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2009, Vol. 29, P. 1809-1815.
3. S.-Q. Guo, Y. Kagawa, T. Nishimura, H. Tanaka. Pressureless sintering and physical properties of ZrB₂-based composites with ZrSi₂ additive, *Scr. Mater.* 2008, Vol. 58, Iss. 7, P. 579-582.

**СКЛОННОСТЬ К ЭПИТАКСИАЛЬНОМУ РОСТУ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ В СИСТЕМЕ Al-Cu-Mg С
ДОБАВКАМИ Y, Zr, Cr, Ti(B), Fe, Ni В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО
ПЛАВЛЕНИЯ**

Логинова И.С.^{1,2}, Сазера М.В.², Солонин А.Н.²
¹УрФУ, Екатеринбург, ²НИТУ МИСИС, Москва
i.s.loginova@urfu.ru, loginova@misis.ru

Анализ современного состояния исследований в области аддитивных технологий показывает, что поиск и разработка новых материалов на основе алюминия для аддитивного производства является ключевым направлением исследований. Наибольший интерес представляют сплавы, легированные переходными металлами и эвтектикообразующими элементами, т.к. первые могут существенно повысить прочность и жаропрочность материала, а вторые улучшить технологичность и снизить склонность к образованию кристаллизационных трещин. В работе изучены следующие сплавы (масс.%): Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y (исходный), Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y-0,4Zr-0,2Sc, Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y-0,5Ti-(0,1B), Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y-1Zr-1Cr, Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y-2,5Fe-2,5Ni. Все сплавы имели разный размер структурных составляющих за счет разных скоростей охлаждения при кристаллизации слитков: 1000 °C/с, 25 °C/с и 0,5 °C/с. В сплаве Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-0,5Y с увеличением скорости охлаждения фазовый состав не менялся: (Al), Al₂Cu, Al₂CuMg, Al₃Y τ₁ (Al₈Cu₄Y) и τ₆ (Al,Cu)₁₁Y₃, средний размер дендритной ячейки уменьшался до 3,8; 19,8 и 82,0 мкм для скоростей охлаждения 1000 °C/с, 25 °C/с и 0,5 °C/с соответственно. В сплаве, дополнительно легированном Zr и Sc, полученном при высокой и средней скоростях охлаждения, фазовый состав идентичен исходному составу, а при медленной скорости охлаждения - 0,5 °C/с формируется фаза Al₃(Zr,Sc) в виде иголок. В сплаве, легированном Ti и B, полученном при скоростях охлаждения 25 °C/с и 0,5

°C/с обнаружены первичные кристаллы фазы Al_3Ti . В сплаве, содержащем переходные металлы Zr, Cr, кроме основных фаз формируется тройная фаза $Al_3Zr(Cr)$, которая входит в состав неравновесной эвтектики при скорости охлаждения 1000 °C/с , и в виде первичных кристаллов при скоростях охлаждения 25 °C/с и $0,5\text{ °C/с}$. В сплаве, содержащем Fe и Ni, формируются фазы Al_3Fe и Al_9FeNi , имеющие эвтектическое происхождение при скорости охлаждения 1000 °C/с , и входящие в состав как первичных кристаллов, так и эвтектики при скоростях охлаждения 25 °C/с и $0,5\text{ °C/с}$. Поверхность сплавов с разным исходным типом микроструктуры подвергали лазерному плавлению при мощности $26,3\text{ Вт}$, скорости сканирования 1 мм/с и частоте 5 Гц . Микроструктура исходного сплава после лазерного плавления характеризовалась высокой дисперсностью вне зависимости от исходного типа структуры. На границе с основным металлом выявлена зона вытянутых кристаллов, шириной 50 мкм . Основным дефектом обработанной области являются кристаллизационные трещины. В сплаве, легированном Zr и Sc, микроструктура идентична исходному сплаву. Добавки Zr и Sc полностью вошли в состав твердого раствора на основе алюминия и не оказали влияния на условия кристаллизации сплава. В сплаве, содержащем Ti и В, микроструктура отличалась отсутствием зоны вытянутых кристаллов на границе с основным металлом и отсутствием кристаллизационных трещин, что обусловлено образованием дополнительных центров кристаллизации и повышению, таким образом, изотропности структуры и технологичности сплава. В образцах, содержащих в исходной структуре первичные кристаллы фазы Al_3Ti , эта фаза также была выявлена после лазерного плавления. Склонность к эпитаксиальному росту первичных кристаллов фазы $Al_3Zr(Cr)$ в сплаве, легированном Zr и Cr выявлено не было. Микроструктура после лазерного плавления характеризовалась высокой дисперсностью и отсутствием трещин, что связано с большим объемом эвтектических фаз, по сравнению с исходным сплавом. Склонность к эпитаксиальному росту первичных фаз Al_3Fe и Al_9FeNi установлена в сплаве, содержащем эти фазы в исходной структуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 19-38-60037.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ 07Г2МФБ И Ст.20 ЗА СЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

Лунев В.А.^{1,2}, Рыбальченко О.В.^{1,2}, Беляков А.Н.³, Долженко А.С.³,
Токарь А.А.^{1,2}, Морозов М.М.¹, Юсупов В.С.¹, Добаткин С.В.^{1,2}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³Белгородский государственный университет, Белгород

v.lunev.mail@gmail.com

Известно, что методы интенсивной пластической деформации приводят к значительному повышению прочностных и эксплуатационных свойств низкоуглеродистых сталей за счет значительного измельчения структуры стали. Однако эти методы трудно реализуемы в условиях промышленного производства. Одной из широко используемых в промышленности схем деформации, является ротационная ковка (РК). Метод, используемый для придания формы деталям с минимальной последующей обработкой или без нее, уже был апробирован для измельчения микроструктуры многих сплавов.

Целью настоящего исследования являлось выявление возможности получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в низкоуглеродистых сталях Ст.20 и 07Г2МФБ методом РК, выявление микроструктурных различий в сталях полученных методами РК и равноканального углового пресования (РКУП) и определение влияние УМЗ структуры этих сталей на их механические и эксплуатационные характеристики, такие как усталостная прочность.

В исследовании, в качестве исходного состояния использовано исходно улучшенное состояние этих сталей, т.е. состояние после закалки и последующего высокого отпуска. Такая термическая обработка должна обеспечить равномерное распределение карбидов после закалки и уменьшить деформирующие усилия благодаря высокому отпуску.

После РК и РКУП была получена УМЗ структура с размером структурных элементов 210 - 375 нм. Было показано, что увеличение степени деформации и снижение конечной температуры РК повышают прочностные свойства и снижают пластичность этих сталей. Понижение температуры заключительного этапа деформации до 300 °С приводит к максимальному упрочнению, но если в стали 07Г2МФБ предел прочности достигает 978 МПа, то в стали Ст.20 предел прочности -1200 МПа. После РКУП при 400 °С прочность выше в стали 07Г2МФБ, а после РК с окончанием обработки при температурах 400°С и 300°С прочность выше в стали Ст.20, что может быть связано с особенностями фазового состава из-

за различия в температурах улучшения (закалки и отпуска). РКУП и РК приводит к повышению усталостной прочности в низкоуглеродистых сталях Ст.20 и 07Г2МФБ. Усталостная прочность сталей Ст.20 и 07Г2МФБ после РК выше, чем после РКУП и после обоих методов деформации усталостная прочность стали 07Г2МФБ выше, чем в стали 20.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00321.

ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА ZX11

Мартыненко Н.С.^{1,2}, Анисимова Н.Ю.³, Киселевский М.В.³,
Темралиева Д.Р.^{1,2}, Просвирнин Д.В.¹, Терентьев В.Ф.¹, Колтыгин А.В.²,
Белов В.Д.², Морозов М.М.¹, Юсупов В.С.¹, Добаткин С.В.^{1,2},
Эстрин Ю.З.^{4,5}

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

³*НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва*

⁴*Университет им. Монаша, Департамент материаловедения, Клэйтон, Австралия*

⁵*Университет Западной Австралии, Департамент машиностроения, Краули, Австралия*

nataliasmartynenko@gmail.com

Магниево-цинковые сплавы системы Mg-Zn-Ca являются одними из наиболее перспективных материалов для создания биорезорбируемых имплантатов, благодаря их хорошей биосовместимости и способности к биоразложению. Однако обычно они обладают довольно низкими прочностными характеристиками и нуждаются в упрочнении, в основном из-за низкого содержания легирующих элементов. Перспективной обработкой для достижения этой цели является ротационная ковка (РК) благодаря ее простоте и промышленной применимости. В связи с этим в данной работе мы исследовали влияние РК на микроструктуру, механические характеристики, коррозионную стойкость, биосовместимость и цитотоксичность *in vitro* относительно лейкоцитов крови и опухолевых клеток линии K562 сплава Mg-1,03%Zn-0,66%Ca. Последний аспект важен с точки зрения их потенциального использования в ортопедии, особенно для замены пораженной остеосаркомой костной ткани после резекции.

Перед проведением РК сплав Mg-1,03%Zn-0,66%Ca гомогенизировали при 450 °С в течение 5 часов с закалкой в воду. Деформацию проводили на ротационной ковочной машине РКМ 2129.02 с постепенным понижением температуры обработки с 400 до 300 °С (с шагом 50 °С). Суммарная степень деформации ($\varepsilon = \ln(A_0/A_k)$) составила 2,77, где A_0 и A_k – начальная и конечная площадь поперечного сечения заготовки, соответственно).

Проведенные исследования показали, что РК приводит к существенному измельчению микроструктуры сплава Mg-1,03%Zn-0,66%Ca. Так в исходном состоянии средний размер зерна составлял $54,1 \pm 2,5$ мкм. После РК микроструктура сплава состоит из, по большей мере, рекристаллизованных зерен со средним размером $4,5 \pm 1,2$ мкм, что, по-видимому, связано с довольно высокой конечной температуройковки (300 °С). Наличие в структуре частиц второй фазы выявлено не было. При этом измельчение микроструктуры и формирование рекристаллизованных зерен приводит к упрочнению сплава без заметного падения пластичности. Пределы текучести и прочности исходного сплава составляли 121 ± 8 МПа и 217 ± 3 МПа, соответственно, при уровне относительного удлинения $22,0 \pm 1,8\%$. После РК эти значения составляли 210 ± 8 МПа, 276 ± 6 МПа и $18,3 \pm 2,9\%$, соответственно. Кроме того, измельчение структуры приводит к росту предела усталости сплава более чем на 10% (со 120 до 135 МПа).

Исследование коррозионной стойкости сплава методом потери массы показало, что РК не приводит к росту скорости его деградации. Средняя скорость деградации сплава в исходном состоянии составила $0,3 \pm 0,1$ мм/год, в то время как сплава после РК – $0,4 \pm 0,1$ мм/год. При этом исследование биосовместимости и цитотоксичности *in vitro* показало, что сплав в обоих структурных состояниях может вызывать гемолиз эритроцитов крови без подавления жизнедеятельности лейкоцитов крови. Также интересным наблюдением стало то, что сплав в обоих состояниях проявляет специфическую противоопухолевую активность *in vitro*, существенно подавляя жизнедеятельность опухолевых клеток линии K562. Различия в величине данного эффекта не являются статистически значимыми для сплава до и после РК.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФФ 18-45-06010.

**ВЛИЯНИЕ РАСПАДА ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО
РАСТВОРА НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В
НИЗКОЛЕГИРОВАННОМ МЕДНОМ СПЛАВЕ CU-CR-ZR**

Морозова А. И.^{1,2}, Ткачев М. С.¹, Беляков А. Н.¹, Кайбышев Р. О.¹

¹Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия

morozova_ai@bsu.edu.ru

Одним из активно развивающихся направлений исследования в металлведении являются ультрамелкозернистые (УМЗ) медные сплавы в которых могут быть достигнуты одновременно высокая прочность и электрическая проводимость. Наряду с температурой и степенью деформации на кинетику формирования УМЗ структуры может оказывать существенное влияние фазовый состав. Дисперсные частицы, выделившиеся в процессе термообработки или деформации, существенно влияют на подвижность и взаимодействие дислокаций, динамический возврат и деформационное упрочнение. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование влияния распада пересыщенного твердого раствора в медном Cu-Cr-Zr сплаве на формирование УМЗ структуры.

В качестве материала исследования был выбран сплав Cu-0,3%Cr-0,5%Zr, подвергнутый обработке на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С 0,5 ч (закалка) и старению при температуре 450 °С 1 ч (старение) и 1, 2, и 4 проходам равноканального углового прессования при температуре 400 °С (угол пересечения каналов матрицы 90 °). Исследования микроструктуры осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoSem 450, оснащенного детектором дифракции обратно-рассеянных электронов, электропроводность измеряли вихретоковым методом с помощью установки Константа К-6.

В Cu-Cr-Zr сплаве вне зависимости от термообработки после деформации при повышенной температуре наблюдалось выделение мелких дисперсных частиц вторых фаз, о чем свидетельствовал рост электрической проводимости с 35% IACS до 51% IACS для закаленного и с 47% IACS до 65% IACS для состаренного состояния. В сплаве после предварительного старения формируется пониженная доля тройных стыков границ кристаллитов, включающих только малоугловые границы (0,39-0,61 для закаленного сплава и 0,17-0,53 для состаренного), при этом возрастает доля тройных стыков с двумя (0,23-0,45 для закаленного сплава и 0,24-0,51 для состаренного) или тремя большеугловыми границами (0,03-0,21 для закаленного сплава и 0,07-0,28 для состаренного). Активное

образование тройных стыков с двумя большеугловыми границами свидетельствует о формировании длинных параллельных большеугловых границ, которые формируют полосы микросдвига. Локализация деформации внутри полос микросдвига способствует интенсивному образованию УМЗ структуры. Показано, что доля большеугловых границ ФБУГ в Cu-Cr-Zr сплаве линейно возрастает с увеличением доли тройных стыков границ кристаллитов, содержащих три большеугловые границы FJ3, по закону: $FБУГ = 0,25 + 0,8FJ3$. Таким образом, распад пересыщенного твердого раствора способствует ускорению кинетики формирования УМЗ структуры в Cu-Cr-Zr сплаве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ в рамках программы Грант Президента для государственной поддержки молодых российских ученых (Соглашение № 075-15-2020-407 от 18.03.2020).

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ α - ω ПЕРЕХОДА В ТИТАНЕ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Неласов И.В.¹, Колобов Ю.Р.¹, Лишницкий А.Г.²

¹ИПХФ РАН, Черноголовка ²НИУ БелГУ, Белгород

nelasow@bsu.edu.ru

Титан и его сплавы являются широко используемыми материалами, в связи с чем важным является изучение влияющих на его механические свойства факторов, в частности, мартенситное превращение из альфа (ГПУ решётка) в омега (C_{32}) фазу при высоком давлении и при наличии сдвиговых напряжений. Для определения особенностей данного перехода использовались межатомные потенциалы [1].

В настоящей работе представлены результаты молекулярно-динамического исследования рассматриваемого перехода в титане при высокоскоростном деформировании, соответствующем условиям нагружения лазерным импульсом наносекундной длительности. Установлено, что α - ω переход в титане имеет место при анизотропной деформации в условиях постоянного давления 20 ГПа по известному пути характерному для данного перехода. При этом деформация сопровождается образованием дислокаций с последующим формированием ω -фазы в областях между дислокациями. При одноосной деформации вдоль направления [0001] при 300 К ω фаза локализуется в полосах деформации. При температуре 700 К, а также в условиях воздействия гидростатическим отсутствие α - ω переход не наблюдается.

При одноосной деформации в направлении $[0001]$ со скоростью 10^8 c^{-1} при температуре 300 К область, содержащая омега фазу сформировалась в полосе деформации толщиной порядка 8 атомных слоёв (рис. 1а - получен с использованием анализа числа атомов на координационных сферах). Для доказательства наличия ω фазы проведен известный анализ связей и углов между атомами [2] с использованием пакета OVITO. Для чего области внутри полос деформации сопоставлялись с идеальной C_{32} структурой (рис. 1б). В этом случае порядок чередования атомов ГПУ и ОЦК структур позволяет однозначно определить омега фазу в полосах деформации.

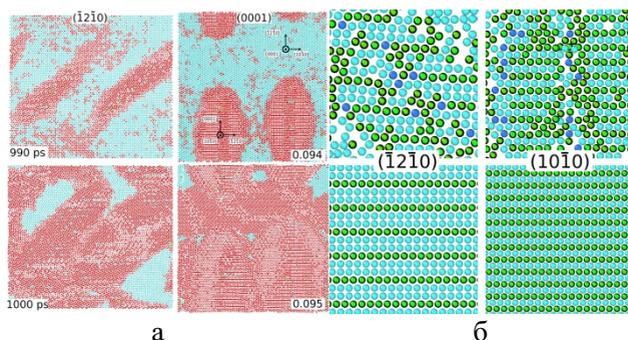


Рисунок 1 – а) Полосы деформации (указана степень деформации и время от начала деформации): светлым отмечены атомы имеющие локальное окружение характерное для ГПУ структуры, тёмным для не ГПУ б) Сопоставление областей деформации (сверху) с идеальной C_{32} структурой (снизу). Светлым отмечены атомы с ГПУ локальным окружением, темным - ОЦК.

Работа выполнена при поддержке тематической карты фундаментальных научных исследований ИПХФ РАН № 0089-2019-0017

1. A. I. Kartamyshev, et. al., Computational Materials Science, Volume 160, 2019, P. 30-41
2. G. J. Ackland and A. P. Jones, Phys. Rev. B 73, 054104, 20060

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛЕАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Остроумова Г.М.^{1,2}, Орехов Н.Д.^{1,2}, Стегайлов В.В.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный

²Объединенный институт высоких температур, Москва

g.gulnaz@phystech.edu

Свойства таких углеродных наноструктур, как графены, фуллерены, нанотрубки, привлекают внимание исследователей уже несколько десятков лет. Применимость данных соединений в промышленных областях (энергетика, электроника, авиация и т.д.) огромна благодаря интересным свойствам материалов (повышенные прочность, износостойкость, тепло- и электропроводность и т.д.). Исследование механизмов и поиск параметров позволят упростить и понять механизм нуклеации углеродных структур. В данной работе рассматривается процесс сверхбыстрого охлаждения чистого углеродного газа, приводящий к образованию фуллерена с вложенной структурой.

Для изучения процесса нуклеации в данной работе используются методы молекулярной динамики (МД), т.к. образование углеродных наночастиц - важный вид сложных неравновесных процессов, требующих точного атомистического теоретического осмысления. Помимо этого, исследование нуклеации требует точной модели, которая способна описать образование и разрыв химических связей, а также различные варианты гибридизаций (sp , sp^2 , sp^3). В данной работе детальное теоретическое исследование процесса нуклеации углеродных структур проводится методами молекулярной динамики с использованием реакционного межатомного потенциала ReaxFF (Reactive Force Field) [1], который способен описывать изменение типа химической связи.

Известно, что такие параметры синтеза, как температура, давление, плотность газа и присутствие катализаторов самым критичным образом влияют не только на геометрию, но и на образование структуры в принципе. Мы обнаружили, что при сверхбыстром охлаждении углеродного атомарного газа от 6000 К до 2500 К образуется фуллерен вложенного («луковичного») типа. В эксперименте такой резкий градиент температуры характерен для лазерного нагрева.

В процессе нуклеации мы выделили 3 стадии образования наночастицы (рис. 1): 1) полимерный неплотный гель, 2) аморфная капля и 3) графитизированная частица луковичного типа [2].

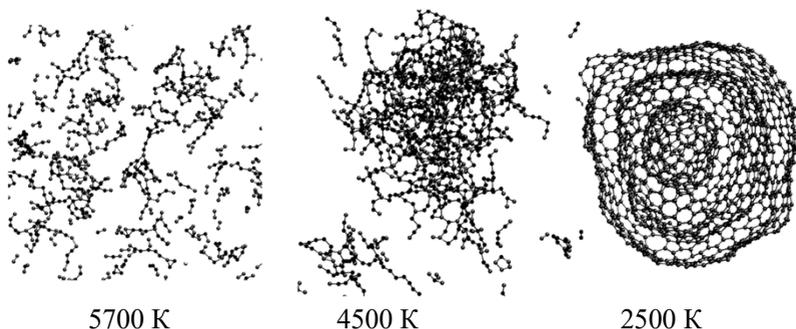


Рисунок 1 – Стадии формирования фуллерена «луковичного» типа в процессе охлаждения углеродного газа от 6000 К до 2500 К.

Большой интерес для анализа представляет трансформация аморфной капли в фуллерен. Было показано, что переход жидкость-твердое тело происходит в узком диапазоне температур и связан с процессом графитизации.

Список литературы

1. A.C.T. Van Duin, S. Dasgupta, F. Lorant, W.A. Goddard III// J. Phys. Chem. A, 2001, V. 105 (41), P. 9396–9409.
2. G.M. Ostroumova, N.D. Orekhov, V.V. Stegailov// Diam. Rel. Mater., 2019, Vol.94, P. 14-20.

ЭФФЕКТ ВОЗРАСТАНИЯ МОДУЛЯ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ ДО 600 ГПА ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРА НАНОАЛМАЗА ДО 2-5 НМ

Попов М.Ю., Чуркин В.Д., Хабибрахманов А. И., Сорокин П.Б.,
Бланк В.Д.

ФГБНУ ТИСНУМ, Москва, mikhail.popov@tisnum.ru

На основе экспериментальных и теоретических исследований был определен модуль объемного сжатия наноалмаза 2-5 нм, составивший 607 ГПа, который значительно превышает значение для кристалла алмаза с размером больше 25 нм (443 ГПа) и приближается к значениям, характерным для ультратвердого фуллерита (600-1000 ГПа). Объемный модуль был измерен методом пьезоспектроскопии с использованием камеры с наковальнями из синтетического алмаза с высоким (60%) содержанием изотопа ¹³C. Частота комбинационного рассеяния (КРС) такого алмаза составляет 1306 см⁻¹ и не мешает регистрации пика КРС на 1325 см⁻¹ наноалмаза 2-5 нм. Модуль объемного сжатия рассчитан по

зависимости от давления до 68 ГПа смещения двух полос КРС, как показано нами ранее, относящихся к наноалмазу 2-5 нм и расположенных на 1325 см⁻¹ и 1600 см⁻¹ (последняя полоса не относится к sp² связям). Моделирование наноалмаза 1,2-5,9 нм подтверждает экспериментальные результаты, а также предсказывает повышение объемного модуля упругости при уменьшении размеров наночастиц. Анализ моделируемых структур позволяет предположить возможное объяснение наблюдаемого эффекта за счет увеличения вклада поверхностно сжатых связей при уменьшении размеров наночастиц.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ, ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ СВС- КЕРАМИКИ MoSi₂-MeB₂-SiC (Me – Zr, Hf)

Потанин А.Ю., Погожев Ю.С., Рупасов С.И., Швындина Н.В.,
Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСис»,
Научно-учебный центр СВС МИСис-ИСМАН, Москва
a.potinin@inbox.ru*

Силициды переходных металлов и композиции на их основе являются перспективными материалами для изготовления деталей и защитных покрытий, испытывающих воздействие механических нагрузок при высокой температуре (1700–2000 °С) в агрессивной среде. Среди данных материалов особый интерес представляют композиты на основе MoSi₂, которые находят широкое распространение в качестве нагревательных элементов высокотемпературных печей.

Известно, что стойкость дисилицида молибдена к высокотемпературному окислению связана с образованием на поверхности защитной газонепроницаемой аморфной пленки на основе SiO₂. При температуре выше 1800 °С окислительная стойкость дисилицида молибдена резко снижается за счет интенсивной возгонки монооксида SiO, что приводит к утонению и повышению дефектности и газопроницаемости пленки SiO₂.

Легирование боридами ZrB₂ и HfB₂, а также карбидом SiC позволяет повысить служебные характеристики материалов из MoSi₂ и оптимизировать защитные свойства образующейся оксидной пленки. Образование защитного слоя боросиликатного стекла (B₂O₃-SiO₂) способствует эффективному залечиванию микротрещин и пор, которые неизбежно появляются в защитном слое во время его работы.

Целью данной работы являлось изучение макрокинетических особенностей горения смесей Mo-Zr-Si-B-C и Mo-Hf-Si-B-C, стадийности фазообразования в волне горения, свойств компактных продуктов синтеза,

а также кинетики и механизмов окисления при температуре 1650 °С. Состав реакционных смесей рассчитывали для образования керамик составов $\text{MoSi}_2\text{-}20\%(\text{ZrB}_2\text{-}20\%\text{SiC})$ (об. %) и $\text{MoSi}_2\text{-}20\%(\text{HfB}_2\text{-}20\%\text{SiC})$ (об. %). Реакционные смеси готовили из элементных порошков Mo, Hf, Zr, Si, В и С.

Исследовано влияние начальной температуры процесса и состава исходных реакционных смесей на кинетику горения. Стадийность фазовых превращений в волне горения исследовалась с помощью метода динамической рентгенографии (ДР) в атмосфере He. Для получения композиционных СВС- порошков синтез проводили в реакторе марки СВС-30 в атмосфере Ar. После синтеза продукты горения в виде пористых спеков размалывали в шаровой вращающейся мельнице (ШВМ) объемом 3 л с твердосплавной футеровкой и твердосплавными шарами в течение 6 ч при соотношении масс шихты и шаров 1:10 до получения микронных порошков. Консолидация керамики проводилась методом горячего прессования (ГП) на прессе DSP-515 SA («Dr. Fritsch», Германия) в вакууме при температуре 1600 °С, скорости нагрева 10 °С/мин, давлении 35 МПа и изобарической выдержке 10 мин. Испытания на термостойкость полученных керамических материалов проводили в муфельной электропечи «SNOL 2.3 1.8/10» (АВ «UMEG-GROUP», Литва). Окисление проводили в печи «LHT 04/17 SW» (Nabertherm, Германия) по схеме: нагрев до 1650 °С за 45 мин; выдержка в течение заданного времени; охлаждение вместе с печью до комнатной температуры. Первые два термоцикла выполняли при изотермической выдержке образцов в течение 30 мин, остальные – по 60 мин. Суммарное время окисления составляло 5 ч.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70013.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРНУЮ
ТРАНСФОРМАЦИЮ И УПРОЧНЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ
AISI 304L**

Рааб А.Г.¹, Рыбальченко О.В.^{2,3}, Добаткин С.В.^{2,3,4}, Рааб Г.И.¹, Ла П.⁵

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

³НИТУ «МИСиС», Лаборатория гибридных наноструктурных материалов,
Москва

⁴НИТУ «МИСиС», Кафедра металлургии и физики прочности, Москва

⁵State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous
Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China

agraab@mail.ru

В работе представлены результаты компьютерного моделирования и физического исследования образцов из нержавеющей стали AISI 304L в виде дисков диаметром 60 мм и толщиной 15 мм, полученных по трем режимам прокатки при температуре 500 °С. На основе математического моделирования в программном комплексе Deform 3D было исследовано деформированное состояние образцов, включая анализ распределения накопленной деформации в объеме заготовок. Физический эксперимент проведен с использованием 6-валкового прокатного стана марки Hankook M-Tech. Исследована структура и микротвердость в продольном и поперечном сечении образцов с накопленной степенью деформации 50% после прямой, реверсивной и перекрестной прокатки. Установлены взаимосвязи режимов обработки, структурных особенностей и распределения микротвердости в объемных образцах нержавеющей стали AISI 304L.

Работа выполнена в рамках совместного российско-китайского исследовательского проекта, финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-53-53022) и Национальным фондом естественных наук Китая (51911530119).

**ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА
ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ**

Рыбальченко О.В.^{1,2}, Анисимова Н.Ю.³, Киселевский М.Ю.³, Мартыненко

Н.С.^{1,2}, Бочвар Н.Р.¹, Рыбальченко Г.В.⁴, Табачкова Н.Ю.^{2,5},

Токарь А.А.^{1,2}, Рааб Г.И.⁶, Добаткин С.В.^{1,2}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³Российский научный онкологический центр им. Н.Н. Блохина, Москва,

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

⁵Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

⁶ИФПМ УГАТУ, Уфа

rybalch@mail.ru

В последние годы разработка биodeградируемых сплавов на основе железа для временных медицинских имплантатов была предметом интенсивных исследований. Биodeградируемые имплантаты не требуют повторного хирургического вмешательства для удаления имплантата, потенциально снижают долгосрочные риски и побочные эффекты. Пригодность железа для использования в качестве биodeградируемого материала имплантата уже была показана и не выявила признаков местной или системной токсичности. Однако, скорость разложения чистого железа *in vivo* оказалась слишком низкой, приближаясь к поведению материалов для постоянных имплантатов. В настоящее время учеными предпринимаются попытки регулирования и контроля процессов деградации металлов с помощью технологий, способствующих измельчению структуры вплоть до ультрамелкозернистой. Подобные методы обработки являются отличной возможностью контроля скорости коррозии биodeградируемых металлов без изменения химического состава основного сплава.

В настоящей работе материалами исследования служили сплавы на основе Fe – Mn с различным содержанием Mn (30% и 45%). Известно, что за счет снижения потенциала стандартного электрода матрицы путем добавления Mn можно увеличить скорость биodeградации. Эффективность такого легирования может быть повышена путем измельчения структуры в ходе интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП).

Целью данной работы является изучение возможности получения в ходе РКУП ультрамелкозернистых (УМЗ) Fe – 30%Mn и Fe – 45%Mn сплавов и изучение их механических свойств и биосовместимости *in vitro*

посредством оценки следующих критериев гемосовместимости: цитотоксичности и индуцированного гемолиза.

В работе проведено РКУП до 6 и 3 проходов для сплавов Fe – 30% Mn и Fe – 45%Mn, соответственно, при температуре 450 °С с углом пересечения каналов 120°. Такая обработка повысила микротвердость с $2,32 \pm 0,05$ ГПа до $5,43 \pm 0,13$ ГПа и с $2,67 \pm 0,34$ ГПа до $6,61 \pm 0,3$ ГПа для сплавов с 30%Mn и с 45%Mn, соответственно. При этом если предел прочности сплава с 30%Mn повышается до 1300 МПа, то разрушение образцов с 45%Mn при растяжении происходит в упругой области. Такое поведение объясняется фазовыми и структурными превращениями в процессе деформации. По результатам изучения гемолитической и цитотоксической активности изученные сплавы идентифицированы как гемосовместимые, поскольку не оказывали цитотоксического воздействия на клетки крови.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-03-00032.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СПЛАВА Cu-7%Cr ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Мартыненко Н.С.^{1,2}, Страумал П.Б.¹, Бочвар Н.Р.¹, Аксенов Д.А.³,
Рааб Г.И.³, Добаткин С.В.^{1,2}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа
straumal.peter@yandex.ru

Материалы, предназначенные для электротехнической промышленности, должны обладать хорошей электропроводностью и высокими механическими свойствами для восприятия больших и неоднократно повторяющихся статических и динамических силовых нагрузок. Поэтому повышение механических свойств и электропроводности таких материалов, безусловно, является актуальной задачей. Для получения оптимального сочетания прочности и электропроводности принято применять к таким материалам термомеханическую обработку, включающую в себя закалку, деформационную обработку и последующее старение. Поэтому в настоящей работе проведено исследование влияния интенсивной

пластической деформации (ИПД) методами кручения под высоким давлением (КВД) и равноканального углового прессования (РКУП) и последующего нагрева на физико-механические свойства сплава Cu-7%Cr. Сплав после закалки с 1000 °С подвергался КВД при комнатной температуре под давлением 6 ГПа при $N = 5$ (оборотов) на образцах диаметром 10 мм. РКУП по маршруту Vc закаленного сплава проводилось при комнатной температуре, угле пересечения каналов 90 ° и $N = 6$ (проходов).

Исследования показали, что применение ИПД приводит к существенному измельчению структуры сплава Cu-7%Cr. Так после КВД формируется наноструктура с размером зерна 60-80 нм, в то время как после РКУП средний размер зерна составил ~250 нм. Существенное измельчение микроструктуры приводит к росту микротвердости с 0,95 до 1,65 ГПа после КВД и до 1,58 ГПа после РКУП. Кроме того, исследование механических характеристик сплава показало, что формирование ультрамелкозернистой структуры при РКУП приводит к росту предела прочности с 288 ± 6 до 480 ± 6 МПа при снижении пластичности с 48,0 ± 4,3 до $14,8 \pm 1,3\%$.

Исследование поведения сплава в процессе нагрева показало, что ИПД приводит к смещению процессов старения в сторону меньших температур. В случае КВД нагрев на температуру 300 °С в течение 4 часов приводит к небольшому падению микротвердости до 152 МПа, в то время как электропроводность достигает значения 65% IACS. Для сплава, обработанного РКУП, оптимальное сочетание микротвердости (1,63 ГПа) и электропроводности (81% IACS) было достигнуто при нагреве на температуру 425 °С в течение 2 часов. Повышение микротвердости сплава, а также рост его электропроводности, по-видимому, связаны с выделением мелкодисперсной хромовой фазы в процессе старения и обеднением пересыщенного твердого раствора, сопровождающим этот процесс. Однако роста предела прочности в процессе старения отмечено не было ($\sigma_B = 472 \pm 12$ МПа), вероятно, из-за подрастания зерна в процессе нагрева. При этом разупрочнение сплава из-за роста зерна частично компенсируется выпадением упрочняющих частиц. В то же время относительное удлинение сплава после старения увеличилось по сравнению с деформированным состоянием до $18,1 \pm 3,6\%$.

Таким образом, было показано, что сочетание ИПД и последующего старения позволяет значительно повысить как прочностные характеристики сплава Cu-7%Cr, так и его электропроводность при достаточном уровне его пластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13П.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ КАРБИДОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НАНОПОРОШКОВ СИСТЕМЫ WC-Co

Герентьев А.В., Благовещенский Ю.В., Исаева Н.В.,
Нохрин А.В., Ланцев Е.А., Андреев П.В., Сахаров Н.В.
ИМЕТ РАН, Москва, НИФТИ ННГУ, Нижний Новгород

Наноразмерные порошки являются основой для многих создаваемых наноструктурных материалов. Повышение механических свойств инструментальных твердых сплавов представляется одним из главных направлений использования нанопорошков.

Нанопорошки системы WC-Co получаемые на основе карбида вольфрама [1], имеющие средний размер 40-60 нм склонны к взаимодействию с кислородом воздуха.

В процессе спекания взаимодействие кислорода с углеродом приводит к обеднению материала по углероду и, как следствие, образованию двойных карбидов (η -фаз). Наличие в твердом сплаве η -фаз приводит к ухудшению механических свойств, поэтому важно изучить условия их образования и, наоборот, уменьшения содержания в материале.

В качестве объекта исследования выступают нанопорошки WC-Co, с различным содержанием общего углерода, превышающим стехиометрическое значение (5,88%, 5,99%, 6,36% и 6,66%). Порошки также содержат некоторое количество кислорода (0,6-0,8% масс).

Для исследования процесса образования η -фаз были применены три различных технологических процесса, изотермическая выдержка в восстановительной атмосфере водорода, жидкофазное вакуумное спекание и твердофазное электроимпульсное спекание. Все компактные материалы были исследованы методом РФА.

В случае изотермической выдержки в атмосфере водорода (950, 1050, 1150, 1200 и 1300°C) для низких температур наблюдается образование фазы Co_6W_6C , пиковое значение которой приходится на температуру 1150°C в случае низкого содержания свободного углерода. При температуре 1300°C практически весь объем материала представлен фазами Co_6W_6C , Co_3W_3C и Co_2W_4C . Во всех случаях наблюдается преобразование η -фазы. При этом, в низкотемпературной области (950°C) образуется незначительное количество η -фазы, а в случае наибольшего содержания свободного углерода и при 1050°C. Кроме того, при низком содержании свободного углерода преобладает фаза Co_6W_6C , максимальное количество образуется при 1150°C, а в случае повышенного

содержания свободного углерода при этой же температуре доминирует фаза $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$.

Жидкофазное вакуумное спекание производилось при температуре 1430°C и времени выдержки 1 час. Результаты РФА, для образцов спеченных в вакууме показали, что при малом количестве свободного углерода присутствует небольшое количество η -фазы, а с увеличением свободного углерода она исчезает.

Твердофазное спекание по технологии ЭИПС осуществлялось при температурах 1050 , 1100 , 1150°C , также были получены образцы, прошедшие дополнительную выдержку при температуре 1150°C в течение 10 и 80 минут. Данный вид спекания позволил получить наилучшие результаты, для компактных материалов, полученных по технологии ЭИПС, согласно данным РФА, возникновение η -фазы не наблюдается. В случае выдержки в течении 10 и 80 мин также отсутствует η -фаза, но наблюдается значительный рост зерен карбида вольфрама.

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что свободный углерод взаимодействуя с кислородом в порошке приводит к уменьшению образования η -фаз вплоть до полного их исчезновения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-03-00653.

1. Благовещенский Ю.В., Самохин А.В., Цветков Ю.В., Алексеев Н.В., Мельник Ю.И., Корнев С.И. Патент РФ № 2349424.18.10.2007. Способ получения порошков на основе карбида вольфрама.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНА И НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОГО И ЛАЗЕРНОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Токмачева-Колобова А.Ю.^{1,2}, Прокошкин С.Д.², Манохин С.С.¹, Колобов Ю.Р.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

anastasiia.misis@gmail.com

Представлены результаты исследований особенностей формирующейся микроструктуры и фазовых превращений в технически чистом титане марки ВТ1-0 в сравнении с интерметаллидным сплавом Ti–50,7 ат. % Ni (никелид титана) после взрывного ударно-волнового нагружения [1], динамического нагружения методом Кольского с

использованием разрезного стержня Гопкинсона [2] и лазерного облучения короткими и ультракороткими лазерными импульсами.

С применением методов световой, просвечивающей и растровой (с возможностью микрорентгеноспектрального анализа) электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа исследованы изменения микроструктуры и фазового состава субмикрористаллического, ультрамелко- и крупнозернистого технически чистого титана марки ВТ1-0 и никелида титана в крупнозернистом и нанокристаллическом состояниях при указанных выше видах нагружений.

На примере крупнозернистого нелегированного титана установлено, что механическое и лазерное ударно-волновое нагружение приводит к измельчению зеренной структуры до наномасштабного уровня и формированию ω -фазы. В отличие от крупнозернистой рекристаллизованной, исходная субмикрористаллическая структура (с размером элементов зеренно-субзеренной структуры ~ 200 нм) в титане остается практически неизменной, за исключением случая лазерной обработки, приводящей к наноструктурированию.

В никелиде титана характерное для этого сплава развитие мартенситного механизма деформации позволяет достичь при ударно-волновом воздействии дальнейшего измельчения структуры, в том числе для исходного нанокристаллического состояния.

Данное исследование в основной части, связанной с изучением структурно-фазового состояния технически чистого титана, выполнено при поддержке тематической карты фундаментальных научных исследований ИПХФ РАН № 0089-2019-0017 и гранта РФФИ №19-32-90017 в части исследований микроструктуры и фазового состава никелида титана.

Список использованной литературы:

1. Молодец А.М., Гольшев А.А., Шульга Ю.М. Полиморфные превращения наноструктурированного анатаза (TiO_2) при воздействии высоких давлений ударного сжатия // ЖТФ. – 2013. –Т. 83. – № 7.

2. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. London. 1949. V. 628. P. 676–700.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА
КРУПНОЗЕРНИСТЫЙ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ СПЛАВ
Ti-50,8 ат.% Ni**

Чуракова А.А.^{1,2}, Гундеров Д.В.^{1,2}
¹ИФМК УФИЦ РАН, Уфа, ²УГАТУ, Уфа
churakovaa_a@mail.ru

Эффект памяти формы (ЭПФ) является характерным для некоторых сплавов на основе титана, железа, меди или марганца. Особое внимание к материалам с эффектом памяти формы связано с их способностью восстанавливать значительные неупругие деформации при нагревании. Наиболее известным представителем таких материалов является никелид титана. Его уникальные свойства широко используются в промышленности и медицине [1,2]. ЭПФ в никелиде титана обусловлен термоупругими мартенситными превращениями (МП) В2 – В19', происходящими в области температур, близких к комнатной температуре [1–4]. В качестве материала для исследования был выбран двухкомпонентный сплав системы TiNi - стехиометрический сплав Ti-50,8 ат.% Ni, обогащенный никелем. Для формирования УМЗ структуры образцы сплавов TiNi были подвергнуты 8 проходам РКУП по схеме В_c при 450 °С, а угол пересечения каналов составил 120°. Термоциклирование образцов в различных состояниях проводилось следующим образом: образцы последовательно погружались в жидкий азот (-196 °С), затем они нагревались до температуры 150 °С. Количество тепловых циклов «нагрев-охлаждение» варьировалось от 0 до 250. В результате термоциклирования в сплаве Ti-50,8 ат.% Ni происходит увеличение плотности дислокаций, увеличение внутренних напряжений в состояниях КЗ и УМЗ, уменьшение размеров структурных компонентов, что связано с формированием дислокационных стенок и границ. При изучении микротвердости никелида титана в результате многократных циклов параметры возрастает после термоциклирования. Первые 100 циклов характеризуются значительным возрастанием микротвердости, затем наблюдается стабилизация. В результате механических испытаний на растяжение сплава в состояниях как КЗ, так и УМЗ механические свойства повышаются, особенно значения предела текучести и фазовой псевдотекучести. Насыщение наступает после 150 циклов. Кроме того, в исследуемых состояниях в результате многократных мартенситных превращений функциональные характеристики - реактивное напряжение и величина обратимой деформации, - остаются стабильными.

1. Khachin, V.N.; Pushin, V.G.; Kondratyev, V.V. Titanium Nickelide: Structure and Properties; Nauka: Moscow, Russia, 1992; p. 161.
2. Brailovski, V.; Prokoshkin, S.; Terriault, P.; Trochu, F. Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling, Applications; Ecole de technologie supérieure (ETS): Montréal, QC, Canada, 2003; p. 851.
3. Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1999; p. 284.
4. Gunther, V.E.; Dambaev, G.C.; Sysolyatin, P.G.; Ilyushenov, V.N. Medical Materials and Implants with Shape Memory; TSU: Tomsk, Russia, 1998; p. 487.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТИНОВЫХ И РОДИЕВЫХ
КАТАЛИЗАТОРОВ, НАНЕСЕННЫХ НА ОКСИД АЛЮМИНИЯ
БАЙЕРИТНОГО РЯДА**

Шефер К.И.^{1,2}, Рогожников В.Н.¹, Ковтунова Л.М.^{1,2}, Стонкус О.А.^{1,2},
Ларина Т.В.¹, Четырин И.А.¹, Супрун Е.А.¹

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им.
Г.К. Борескова СО РАН», Новосибирск

²ФГАОУВО «Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет», Новосибирск

shefer@catalysis.ru

Вопросы экологической безопасности, поиска ресурсосберегающих источников энергии являются в настоящее время одними из наиболее актуальных. Полезной для решения задач в этих сферах может быть реакция парциального окисления углеводородов. Одним из продуктов этой реакции является водород. Кроме того, реакция может использоваться для дожига отходящих газов различных производств. Важно подобрать для проведения реакции эффективный, и в то же время доступный, катализатор, стабильный при высоких температурах реакции – порядка 900 °С. В данной работе рассматривались платиновые, родиевые катализаторы, моно- и биметаллические, поскольку именно благородные металлы катализируют эту реакцию лучше всего. В качестве носителя использовался оксид алюминия байеритного ряда, полученный новым способом из металлического алюминия. Применение такого носителя позволяет получать также структурированные катализаторы, в которых оксид алюминия закрепляется на поверхности металлической фехральной сетки, а затем на такой носитель наносится активный компонент. В результате увеличивается эффективность катализатора, при этом значительно уменьшается содержание дорогостоящего активного компонента, а значит снижается стоимость катализатора.

Катализаторы синтезировали методом пропитки носителя по влагоемкости из разных предшественников активного компонента: хлоридов, нитратов и аммиачных комплексов. Полученные носители и катализаторы являются наноразмерными, поэтому их изучение требует применение специальных методов и подходов. Проведено тестирование полученных катализаторов в реакции, а также изучены их физико-химических свойства. В результате были определены фазовый состав и свойства носителей и катализаторов, размеры и состояние активного компонента в катализаторах, влияние используемого предшественника на эти характеристики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-03-00595.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОРОШКОВ МАГНИТОТВЁРДОГО СПЛАВА $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{78}\text{B}_7$

Абдурахмонов О.Э.¹, Юртов Е.В.¹, Савченко А.Г.², Савченко Е.С.²

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru

Одними из наиболее актуальных магнитотвёрдых материалов являются сплавы системы Nd-Fe-B. Магниты на их основе, благодаря превосходному сочетанию высокой коэрцитивной силы и магнитной энергии, широко применяются в различных областях. На сегодняшний день основными способами получения магнитов из сплавов Nd-Fe-B являются металлургические методы, тогда как из-за большого потенциала восстановления Nd^{3+} и высокой склонности к окислению, химический синтез наночастиц сплавов Nd-Fe-B недостаточно изучен [1,2].

Целью настоящей работы является получения наночастиц магнитотвёрдого сплава $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{78}\text{B}_7$ методом химического синтеза оксидов и последующего их совместного восстановления. Наночастицы бориды железа, оксидов неодима и железа синтезировали методом химического осаждения. Полученные порошки смешивали в необходимой пропорции, после чего восстанавливали в восстановительно-диффузионным методом в потоке водорода с использованием гидрида кальция CaH_2 .

Исследование морфологии полученных порошков сплава $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{78}\text{B}_7$ проводили методом сканирующей электронной микроскопии (JSM-6510LV, JOEL). Для определения размера частиц порошков использовали метод динамического светорассеивания (ZetaSizer). На рис. 1 а и б приведены СЭМ-изображение и гистограмма распределения частиц порошка по размеру после завершения восстановительных процессов: средний диаметр частиц составил 95 ± 5 нм. Установлено, что магнитотвёрдая фаза $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ успешно сформировалась в процессе восстановления смеси порошков оксидов при 800°C в потоке водорода. В настоящее время проводятся исследования магнитных характеристик порошков $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{78}\text{B}_7$.

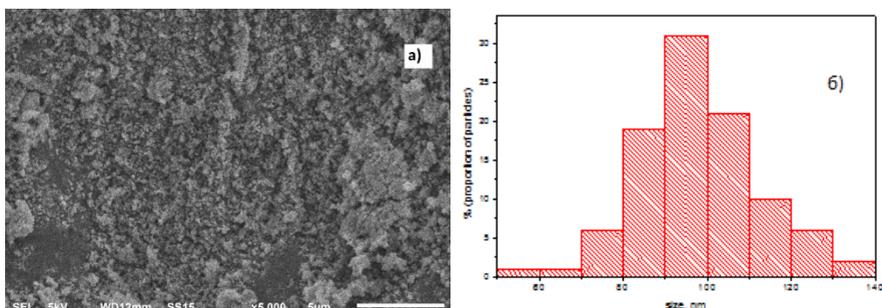


Рисунок 1 – а – СЭМ-изображение синтезированных порошков сплава $Nd_{15}Fe_{78}B_7$ после процесса восстановления; б – гистограмма распределения частиц по размерам

Литература:

1. Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V. Investigation of structure and magnetic properties of nanocrystalline iron oxide powders for use in magnetic fluids // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Т. 586. Vol. 1. P. 298-300.
2. Muradova A.G., Zaytseva M.P., Sharapaev A.I., Yurtov E.V. Influence of temperature and synthesis time on shape and size distribution of Fe_3O_4 nanoparticles obtained by ageing method // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2016. Т. 509. С. 229-234.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РКУП НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu-Ni-Si

Акшенов Д.А.^{1,2}, Рааб Г.И.²

¹Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение ФГБНУ УФИЦ РАН, Уфа

²Институт физики перспективных материалов при УГАТУ, Уфа
aksyonovda@mail.ru

Сплавы системы Cu-Ni-Si благодаря своей способности к деформационному и дисперсионному упрочнению, жаростойкости и достаточно высокой электропроводности представляют большой интерес для производства электротехнических изделий. Они пришли на замену сплавам системы Cu-Be, от которых в виду токсичности бериллия отказались. Никель и кремний хорошо растворяются в медной матрице, образуя твердый раствор.

Известно, что методы ИПД позволяют в значительной мере повысить прочностные характеристики материалов, в первую очередь за

счет существенного измельчения структуры до ультрамелкозернистых и наноструктурных состояний.

В качестве материала исследования был выбран сплав Cu-1,85Ni-0,68Si диаметром 10 мм. Деформация проводилась методом РКУП 1 цикл с углом пересечения каналов 120 °С. Температура деформации составляла 20 и 300 °С. После РКУП при температурах 20 и 300 °С формируется однотипная вытянутая структура со средним размером зерна 30 ± 2 мкм и коэффициентом вытянутости формы $k=1:3$. Как показано в работе, РКУП при температуре 300 °С позволяет не только получить значения физико-механических характеристик на уровне холодной обработки ($\sigma_{\max} = 390 \pm 10$ МПа, 21 % IACS), но и снизить нагрузку при деформации вдвое. Определен рациональный режим старения: 450 °С 10 часов, при котором достигается максимальный комплекс свойств: предел текучести 570 МПа, предел прочности 650 МПа и электропроводность 37% IACS.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Гурьянов С.А.

Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Баумана, Москва, guryanovsa@mail.ru

Углеродные нанотрубки (УНТ) в настоящее время применяются в качестве одного из компонентов в композиционных материалах различного назначения. Важной задачей является определение упругих характеристик УНТ, знание которых позволит проводить качественный анализ эффекта упрочнения матрицы композита [1]. В настоящее время имеется значительный разброс полученных теоретических и экспериментальных значений модулей Юнга, сдвига и кручения для УНТ. Так, в экспериментальных работах разных авторов полученная величина модуля Юнга находится в широком диапазоне значений 0,9 - 5,5 ТПа [2].

В данной работе для определения упругих свойств одностенной УНТ применялся метод моделирования, изготавливалась макромодель и экспериментально исследовались ее упругие свойства с последующим пересчетом полученных значений на УНТ [3]. Макромодель была спроектирована в программе Nanotube Modeler и распечатана на 3D-принтере Picaso 3D Designer из abs-пластика, упругие характеристики которого известны.

Макромодель подвергалась упругим деформациям растяжения-сжатия и кручения. Были получены экспериментальные зависимости

величины, характеризующей соответствующий вид деформации, от величины приложенной силы, по которым рассчитывались коэффициенты упругости модели. Линейный характер законов теории упругости в области упругих деформаций позволяет использовать принцип подобия для определения упругих характеристик УНТ. Модуль Юнга для УНТ рассчитывался по формуле

$$E = \frac{k_{cc}k_{mod}l}{k_{con}2\pi Rh}, \quad (1)$$

где k_{cc} - коэффициент упругости углеродной связи, k_{mod} - коэффициент упругости макромоделей, k_{con} - коэффициент упругости структурных элементов модели из abs-пластика, R - радиус одностенной УНТ, l - ее длина, h - радиус атома углерода. Коэффициент упругости углеродной связи k_{cc} определялся из зависимости потенциальной энергии межатомного взаимодействия двух атомов углерода от расстояния между ними. Рассчитанное значение коэффициент упругости углеродной связи оказалось равным $k_{cc} = 60$ Н/м. Коэффициенты упругости макромоделей k_{mod} и элементов из abs-пластика определялись экспериментально. Рассчитанное значение модуля Юнга для УНТ получилось равным $E = 2,2 \pm 0,4$ ТПа.

Макромодель подвергалась также деформации кручения. По полученным данным рассчитывался модуль кручения УНТ и коэффициент Пуассона. Коэффициент Пуассона для УНТ по результатам проведенных экспериментов и вычислений оказался равен $\nu = 0,35 \pm 0,05$.

Полученные значения модулей Юнга, кручения и коэффициента Пуассона согласуются с известными данными [2], что показывает на правомерность проведения данного квазиклассического моделирования для нахождения упругих характеристик УНТ по отношению к различным видам деформации, а также упругих свойств других упорядоченных углеродных наноструктур.

1. Зарубин В.С., Сергеева Е.С., Шишкина С.И. Оценки упругих свойств матрицы композита, упрочненной углеродными нанотрубками // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2016. № 9. С. 155-170.

2. Глухова О.Е., Терентьев О.А. Теоретическое изучение зависимостей модулей Юнга и кручения тонких однослойных углеродных нанотроек типа zigzag и armchair от геометрических параметров // ФГТ. 2006. Т. 48. № 7. С. 1329-1335.

3. Гурьянов С.А. Исследование механических свойств углеродных нанотрубок: https://enanos.nanometer.ru/uploads/archive/2018-genius/2018-genius_GuryanovSA.pdf

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ВЫСОКОКОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Co-W-Ta-C

Зайцев А.А., Авдеенко Е.Н., Коняшин И.Ю., Замулаева Е.И.,
Левашов Е.А.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, aazaitsev@bk.ru*

Известно, что добавки небольшого количества карбидов переходных металлов в качестве ингибиторов роста карбидного зерна улучшают однородность микроструктуры и механические свойства твердых сплавов WC-Co. В роли ингибиторов при производстве мелкозернистых твердых сплавов наиболее часто используются VC, Cr₃C₂, TaC, NbC, ZrC, причем положительный эффект этих добавок связывают с измельчением зёрненной структуры сплавов. При производстве крупнозернистых твердых сплавов из приведенного перечня используется только добавка TaC, положительное влияние которой на эксплуатационные свойства таких сплавов не может быть объяснено только ингибирующим эффектом. Вероятная причина положительного влияния TaC на свойства крупнозернистых твердых сплавов связана со структурными изменениями в связующей фазе. Поскольку в промышленных твердых сплавах объемная доля связующей фазы (твердого раствора на основе кобальта) невелика, то для изучения влияния добавок TaC на структуру связующей фазы целесообразно исследовать высококобальтовые сплавы. Целью настоящей работы являлось исследование структуры и магнитных свойств высококобальтовых сплавов составов WC –(60-65)% Co, содержащих добавки TaC, W и C.

Компактные образцы изготавливались вакуумным спеканием при температуре 1420 °С, что обеспечивало полное расплавление порошкового брикета. Из полученных образцов подготавливались металлографические шлифы, которые затем исследовались методом РЭМ. По результатам исследования структуры сплавов установлено, что в сплавах, содержащих 1,6-2,6 % TaC наблюдаются выделения (Ta,W)C игольчатой формы. При содержании TaC более 3,6 % зерна (Ta,W)C приобретают округлую форму. Параметр решетки фазы (Ta,W)C в сплавах с низким содержанием углерода находился в диапазоне от 0,4438 нм для сплава с 1,6% TaC до 0,4451 нм для сплава с 4,6% TaC. По результатам исследования магнитных

свойств установлено, что добавка TaC в сплавы с низким и повышенным содержанием углерода приводит к увеличению коэрцитивной силы и уменьшению магнитного насыщения сплавов. Сделано предположение, что добавки TaC помимо ингибирующего эффекта, способствуют формированию в связующей фазе дисперсных Co- и Ta-содержащих наночастиц. Последующие исследования структуры сплавов методом ПЭМВР подтвердили сделанное предположение. В модельных высококобальтовых сплавах, содержащих добавки TaC, была зафиксирована как стабильная, так и метастабильная кристаллизация кобальтового расплава, а также наблюдалось явление концентрационного расслоения расплава. Проведенные исследования позволяют по-новому осмыслить природу положительного влияния добавки TaC на свойства твердых сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 20-08-00750/20)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА НАПОЛНЕННОГО НАНОАЛМАЗАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

Кузнецов Н.М.¹, Вдовиченко А.Ю.^{1,2}, Белоусов С.И.¹, Чвалун С.Н.^{1,2}, Швидченко А.В.³, Юдина Е.Б.³, Вуль А.Я.³

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

²*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва*

³*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*
kyz993@yandex.ru

Наноалмазы детонационного синтеза привлекают внимание ученых и исследователей из-за возможного потенциального применения в различных областях, наиболее яркие из которых биомедицина и композитные полимерные материалы [1]. Область применения наноалмазов обусловлена уникальным набором физико-химических свойств: высокая твердость и теплопроводность, химическая стабильность, яркая люминесценция в магнитном поле, биосовместимость, низкая токсичность и др. Одним из современных применений наноалмазов является область «умных» материалов, способных изменять свои свойства при внешнем воздействии. В частности было показано, что суспензии наноалмазов детонационного синтеза в среде полидиметилсилоксана проявляют электрореологический эффект – обратимо изменяют свое реологическое поведение с вязкого на упругое под действием

электрического поля [2]. Механизм работы электрореологических жидкостей заключается в поляризации частиц дисперсной фазы под действием электрического поля, что приводит к образованию протяженных цепочек и колончатых структур, ориентированных вдоль силовых линий электрического поля. На прочность формируемых «колонн» оказывают влияние различные факторы, в частности электрофизические характеристики среды и частиц (диэлектрическая проницаемость и проводимость), размеры и форма частиц наполнителя, их структурная организация вне и под действием электрического поля и др. Известно, что поверхность наноалмаза может быть легко модифицирована в процессе отжига. Использование различной атмосферы, например воздуха или водорода позволяет получать частицы терминированные COOH или CN группами, соответственно. Очевидно, что такие частицы будут обладать различным знаком дзета-потенциала в водной среде. Кроме того, электрофизические характеристики частиц должны быть различны. Таким образом, различия в химическом составе поверхности наноалмазных частиц должны найти свое отражение и в электрореологическом поведении суспензий, что не было исследовано в ранней работе [2].

Объектом исследования были выбраны суспензии наноалмазов с различным химическим составом поверхности (COOH или CN) в среде полидиметилсилоксана в диапазоне концентраций от 1 до 4 масс.%. Методом ротационной вискозиметрии было изучено реологическое поведение суспензий вне и под действием электрического поля. Структурную организацию частиц в суспензии анализировали методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Электрофизические характеристики исследовали методом диэлектрической спектроскопии, показана применимость метода для анализа структурной организации наночастиц в непроводящей среде. В работе обсуждаются различия в поведении суспензий наноалмазов в зависимости от химического состава поверхностных групп.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-29-19117 мк.

Литература:

1. A.V. Shvidchenko, E.D. Eidelman, A.Ya. Vul', N.M. Kuznetsov, D.Yu. Stolyarova, S.I. Belousov, S.N. Chvalun. Colloids of detonation nanodiamond particles for advanced applications //Adv Colloid Interface Sci. 2019. Vol. 268. P. 64–81.
2. A. Pereira, C. McIntyre. Electrorheology of diamond/PDMS

nanofluids in steady and oscillatory shear // Appl. Rheol. 2014. V.24. P. 63471.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ЧАСТИЦ СЛОИСТЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СРЕДЕ
ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА**

Кузнецов Н.М.¹, Бакиров А.В.^{1,2}, Белоусов С.И.¹, Чвалун С.Н.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва*

²*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН, Москва*

kyz993@yandex.ru

Электрореологические жидкости относятся к классу «умных» материалов, за счет быстрого, обратимого и контролируемого изменения своего реологического поведения (вязкости, значения предела текучести, модулей накоплений и потерь) под действием электрического поля. Механизм электрореологического эффекта заключается в поляризации частиц дисперсной фазы с образованием протяженных структур под действием электрического поля. Интерес к электрореологическим жидкостям обусловлен возможностью широкого практического применения в различных областях. Например, в аэро- и космической промышленности, микрофлюидике, робототехнике, в процессах транспортировки нефти, пищевой промышленности, создании поверхностей с изменяющимся рельефом и др. [1]

Поиск новых наполнителей, проявляющих электрореологическую активность при низкой концентрации дисперсной фазы (менее 10 масс.%) и более низкой напряженности электрического поля (менее 5 кВ/мм) является актуальной научной задачей. На величину электрореологического эффекта существенное влияние оказывают электрофизические характеристики наполнителя – диэлектрическая проницаемость и проводимость. Однако, форма частиц также является немаловажным фактором, определяющим эффективность электрореологических жидкостей. Так, применение частиц с высоким характеристическим отношением (длины к толщине) позволяет сформировать перколяционную сетку в растворе при концентрации частиц менее 10 масс.%. К таким наполнителям относятся природные слоистые алюмосиликаты: монтмориллонит и галлуазит [2]. Монтмориллонит представляет собой пластины состоящие из кремнекислородного и алюмогидроксильного каркаса размерами порядка 500 × 200 нм при толщине порядка 1 нм. Галлуазит, в свою очередь, обладает формой трубки

с полостью внутри, и также имеет алюмосиликтную природу. Размеры трубок зависят от природных условий месторождения и могут варьироваться от десятков нанометров до нескольких микрометров.

Ориентация частиц в структуре жидкостей вне и под действием электрического поля и ее изменение при сдвиговом течении до сих пор слабо изучены. Исследование процессов структурирования частиц является важным для понимания механизма электрореологического эффекта и разработки подходов к улучшению эксплуатационных характеристик жидкостей. В работе изучали суспензии, наполненные различными модифицированными монтмориллонитами (Cloisite Na⁺, Cloisite 30B, Nanofil 3010) и галлузитом (Halloysite) при низких концентрациях (менее 5 масс.%). Разработаны подходы и методики проведения исследований структурной организации суспензий методом рентгеновского рассеяния с использованием источника синхротронного излучения вне и под действием электрического поля. Обсуждается влияние формы частиц дисперсной фазы и напряженности электрического поля на процессы структурной организации суспензий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-03-00078 А.

Литература:

1. Dong Y.Z., Seo Y., Choi H.J. Recent development of electro-responsive smart electrorheological fluids // *Soft Matter*. 2019. Vol. 15, № 17. P. 3473–3486.

2. D.Yu. Stolyarova, N.M. Kuznetsov, S. I. Belousov et al. Electrorheological behavior of low filled suspensions of highly anisometric montmorillonite particles // *J. Appl. Polym. Sci*. 2019. V. 136. P. 47678.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ
СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ
ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Манохин С.С.¹, Токмачева-Колобова А.Ю.^{1,2}, Карлагина Ю.Ю.³,
Бетехтин В.И.⁴, Кадомцев А.Г.⁴, Нарыкова М.В.⁴, Колобов Ю.Р.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

³*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

⁴*Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
manohin@bk.ru*

Методами просвечивающей электронной микроскопии исследованы особенности изменения структуры образцов субмикроструктурного (СМК) технического чистого титана марки ВТ1-0 после длительных (0,5 – 2710 ч) отжигов в широком интервале температур (150–700 °С), а также после воздействия лазерными импульсами наносекундной длительности.

Образцы для исследований изготавливали из прутков сплава ВТ1-0 диаметром 8 мм, полученных с использованием продольной, поперечно-винтовой и сортовой прокатки (ТУ 1825-001-02079230-2009), которые подвергали финишному отжигу при температуре 673 К в течение 3 ч для снятия внутренних напряжений первого рода. Далее проводили серию отжигов в лабораторных печах «Nabertherm» при температурах 150–400 °С в течение 0,5–2710 ч.

Для структурных исследований использовали просвечивающий электронный микроскоп Tecnai G2 F20 S-TWIN, FEI Tecnai Osiris при ускоряющем напряжении 200 кВ. Подготовка тонких фольг для ПЭМ (ламелл, которые вырезаются перпендикулярно к поверхности образца) осуществлялась методом ионного утонения, сфокусированным ионным пучком в колонне растрового электронно-ионного микроскопа FEI Scios.

Для наносекундной лазерной обработки использовали титан-сапфировый лазер «Минимаркер-2». Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры определяли методом секущих с последующим построением гистограмм распределения зерен/субзерен по размерам и их математической обработкой.

Установлено, что до температур отжига 400 °С в течение 1 ч микроструктура субмикроструктурного титана марки ВТ1-0 остается стабильной. Длительные отжики при $T \leq 190$ °С длительностью 1000 ч и более не приводят к существенным изменениям размеров зерен.

Показано, что воздействие наносекундным лазерным облучением приводит к дополнительному измельчению исходной СМК структуры в приповерхностных слоях материала до глубины порядка 1 мкм.

Данное исследование в основной части, посвященной изучению термической стабильности субмикроструктурной структуры сплава ВТ1-0, поддержано РФФИ (проект №19-12-00221) и в дополнительной части исследований, связанной с изучением микроструктуры после наносекундного лазерного воздействия, выполнено при поддержке тематической карты фундаментальных научных исследований ИПХФ РАН №0089-2019-0017.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК

Осотова О.И., Ильина М.В., Гурьянов А.В., Рудык Н.Н., Ильин О.И.

Южный Федеральный Университет, Институт Нанотехнологий,

Электроники и Приборостроения, Таганрог

osotova@sfedu.ru

В современном мире наблюдается стремительное развитие портативных устройств, требующих компактных источников электрической энергии [1]. К таким источникам можно отнести пьезоэлектрический наногенератор, создающий электрический ток под действием механических деформаций [1]. Одним из перспективных материалов для создания таких наногенераторов являются углеродные нанотрубки (УНТ) [2].

Целью данной работы является исследование зависимости величины пьезоэлектрического отклика ориентированных УНТ от их высоты и диаметра.

В качестве исследуемых образцов использовались массивы вертикально ориентированных УНТ, выращенных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на подслое TiN толщиной 100 нм. Высота массива УНТ изменялась от 10 до 25 мкм при диаметре УНТ 60 нм. Средний диаметр УНТ увеличивался от 35 до 65 нм при высоте массива 20 мкм. Экспериментальные исследования проводились с использованием ранее разработанной методики на основе метода силовой спектроскопии атомно-силового микроскопа (АСМ) [2]. Деформация ориентированных УНТ осуществлялась путем контролируемого механического воздействия посредством зонда АСМ. В качестве зонда АСМ использовался кантилевер марки НА_NC/Pt. Полученные зависимости величины тока, возникающего при деформации ориентированных УНТ, от высоты и диаметра нанотрубок представлены на рисунке 1.

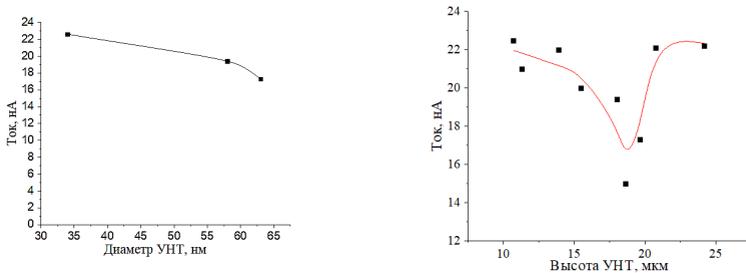


Рисунок 1 – Зависимость пьезоэлектрического отклика УНТ от диаметра (а) и высоты (б).

Анализ полученных результатов для УНТ, выращенных на подслое TiN, показал, что увеличение диаметра УНТ от 35 до 65 нм приводит к уменьшению величины пьезоэлектрического отклика от 22,6 до 17,3 нА (Рис. 1а). Это может быть связано с тем, что увеличение диаметра УНТ приводит к увеличению жесткости и снижению чувствительности УНТ к внешним механическим воздействиям. Зависимость величины пьезоэлектрического отклика от высоты УНТ имеет нелинейный характер (Рис. 1б). Величина пьезоэлектрического отклика уменьшается от 22 до 17 нА при увеличении высоты УНТ от 10 до 18 мкм, что может быть вызвано уменьшением относительной деформации УНТ. Затем резко возрастает до 22 нА при высотах УНТ от 19 до 24 мкм, что может быть вызвано слипанием УНТ в пучки и, как следствие, формированием в них дополнительной деформации. Таким образом, установлены зависимости величины пьезоэлектрического отклика УНТ от их геометрических параметров. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и создания наногенераторов на основе ориентированных углеродных нанотрубок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No. 20-37-70034).

1. Hu Y. and Wang Z.L. 2014 Nano Energy 14, 3–14
2. Il'ina M.V, Il'in O.I., Blinov Yu.F., Konshin. A.A., Konoplev B.G. and Ageev O.A. 2018 Materials 11, 638

УПРОЧНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПРИ РАСПАДЕ ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА СПЛАВОВ МАГНИЯ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ ИТТРИЕВОЙ ГРУППЫ

Рохлин Л.Л.¹, Добаткина Т.В.¹, Табачкова Н.Ю.², Тарыгина И.Е.¹,
Лукьянова Е.А.¹

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет

“МИСус”, Москва

rokhlin@imet.ac.ru

Магниевоы сплавы в основном находят промышленное применение в качестве легких конструкционных материалов, использование которых позволяет уменьшить собственный вес изделий и тем самым улучшить их служебные характеристики. Как и в случае других конструкционных материалов, наибольшее значение при использовании магниевых сплавов

имеют их прочностные свойства. Чем они выше, тем более эффективно использование этих сплавов в изделиях. Установлено, что наибольшие прочностные свойства магниевых сплавов достигаются при введении в них в качестве легирующих добавок редкоземельных металлов иттриевой группы. В настоящее время исследованиям этих сплавов уделяется большое внимание. Наиболее высокие прочностные свойства в сплавах магния с редкоземельными металлами иттриевой группы достигаются после их термической обработки, в результате которой происходит распад пересыщенного магниевое твердого раствора. При этом из магниевое твердого раствора выделяются упрочняющие частицы, содержащие редкоземельные металлы.

В настоящем исследовании установлены условия термической обработки, обеспечивающие наибольшее упрочнение сплавов при распаде пересыщенного магниевое твердого раствора, и расположение выделившихся дисперсных частиц, которые оказались наноразмерными. Определено изменение размеров частиц в зависимости от условий распада магниевое твердого раствора и связь размеров частиц с упрочнением сплавов. На рисунке 1 приведена типичная микроструктура и соответствующая микродифракция одного из сплавов после распада магниевое твердого раствора до стадии максимального упрочнения.

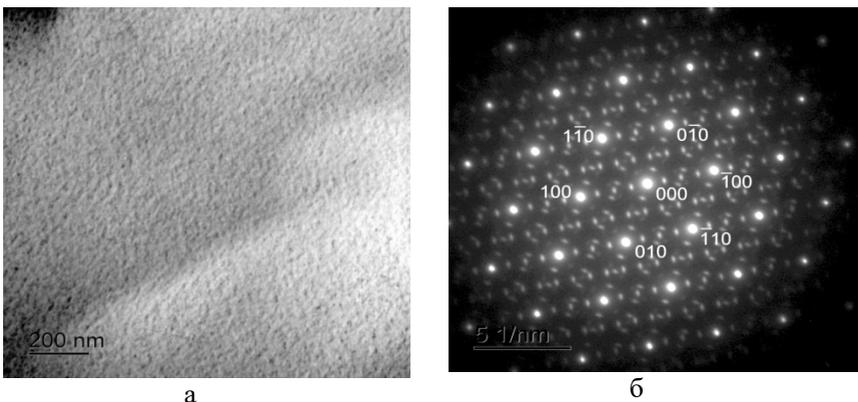


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Mg-24,0%Tb в закаленном и состаренном при 200°C, 32 ч. состоянии (а) и дифракционная картина с фрагмента структуры, ось зоны [001] (б).

Исследование проведено при финансовой поддержке Гранта РФФИ № 18-03-00223.

СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КАРБОКСИЛАТОВ НИКЕЛЯ (II) С АНИОНАМИ НАСЫЩЕННЫХ МОНОКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ – ПРЕКУРСОРОВ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Сапрыкин Р.В.¹, Семенов С.А.¹, Джардималиева Г.И.²

¹*МИРЭА - Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва*

²*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*
romaj47j@gmail.com

Карбоксилаты металлов – известный класс металлосодержащих органических соединений, которые находят широкое применение в различных областях деятельности человека, в науке и технике [1]. Исследованию их термического поведения в последние годы придается большое значение. Промышленный интерес к этим исследованиям связан с широкой областью применения продуктов термолиза (наночастиц металлов, металлооксидов или их карбидов) в качестве катализаторов реакций основного органического синтеза, керамических материалов, неорганических пигментов и др. [2]. Ранее термическое разложение ненасыщенных карбоксилатов никеля было изучено в работах [3-5]. В настоящей работе осуществлен синтез карбоксилатов никеля (II) масляной, валериановой, капроновой, энантовой и каприловой кислот. Синтез бутирата и валерата никеля проводили из водных растворов соответствующих кислот и ацетата никеля с последующей отгонкой образующейся уксусной кислоты. Для синтеза капроата, энантата и каприлата никеля использовали предварительно полученные натриевые соли соответствующих кислот и сульфат никеля.

ИК-спектры образцов в виде таблеток с KBr регистрировали в области 4000–500 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрометре, модель EQUINOX 55, фирма Bruker (Германия). Элементный анализ проводили на автоматическом элементном CHNS-анализаторе, фирма Thermo Finnigan (Италия). Термоаналитические исследования карбоксилатов никеля проводили на дифференциальном сканирующем калориметре SDT Q600 V20.9 Build 20 со скоростью нагрева 10 град/мин при одновременной записи кривых нагревания (ДТА и T) и убыли массы (TG) в кварцевых тиглях в аргоне в интервале температур от 20 до 500°C. Полученные карбоксилаты были охарактеризованы с использованием элементного анализа и ИК-спектроскопии. Термическое разложение указанных карбоксилатов, а также формиата и ацетата никеля, проводили в среде аргона в течение 9 часов при температуре 325°C.

Полученные продукты термического разложения были исследованы с использованием элементного, энергодисперсионного анализом,

просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа. Проведены магнитные исследования продуктов термического разложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00237).

1. Помогайло А.Д., Джардималиева Г.И. Мономерные и полимерные карбоксилаты металлов. М.: Физматлит, 2009.

2. Помогайло А.Д., Джардималиева Г.И. Металлополимерные гибридные нанокompозиты – М: Наука, 2015.

3. Семенов С.А., Мусатова В.Ю., Дробот Д.В., Джардималиева Г.И. Термическое разложение итаконата никеля // Журн. неорганической химии. 2019. Т. 64. № 6. С. 630-642.

4. Семенов С.А., Мусатова В.Ю., Дробот Д.В., Джардималиева Г.И. Термическое разложение ненасыщенных дикарбоксилатов никеля (II) // Журн. неорганической химии. 2018. Т. 63. № 9. С. 1195-1203.

5. Мусатова В. Ю. , Семенов С. А. , Дробот Д. В. и др. Синтез и термические превращения ненасыщенных дикарбоксилатов никеля (II) – прекурсоров металлополимерных нанокompозитов // Журн. неорганической химии. 2016. Т. 61. № 9. С. 1168–1181.

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ IN VITRO ПРОТИВ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК МАГНИЕВОГО СПЛАВА WE43

Мартыненко Н.С.^{1,2}, Анисимова Н.Ю.³, Киселевский М.В.³,
Темралиева Д.Р.^{1,2}, Серебряный В.Н.¹, Рааб Г.И.⁴, Добаткин С.В.^{1,2},
Эстрин Ю.З.^{5,6}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

³НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

⁴Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

⁵Университет им. Монаша, Департамент материаловедения, Клэйтон,
Австралия

⁶Университет Западной Австралии, Департамент машиностроения,
Краули, Австралия
diana4-64@mail.ru

Необходимость восстановления костного дефекта после резекции первичных и метастатических опухолей костей требует использования

имплантатов и крепежных элементов из биосовместимых материалов, механические свойства которых аналогичны свойствам костной ткани. В настоящее время сплавы на основе магния рассматриваются как перспективный выбор благодаря сочетанию хорошей биосовместимости, приемлемых механических свойств и способности к биорезорбции. Кроме того, при правильном выборе легирующих элементов магниевые сплавы также могут проявлять антибактериальный эффект или противоопухолевую активность. В связи с этим разработка механически прочных материалов для имплантатов на основе магния, обладающих одновременно противоопухолевой активностью, чрезвычайно важна для клинической онкологии.

В настоящей работе было проведено исследование влияния равноканального углового прессования (РКУП) на структуру, механические свойства, скорость деградации и цитотоксичность *in vitro* против опухолевых клеток магниевого сплава WE43 (Mg–3,56%Y–2,20%Nd–0,47%Zr). РКУП по маршруту Вc проводилось при постепенном понижении температуры деформации с 400 до 300 °С (шаг 25 °С) и увеличение количества проходов до 12.

Исследования показали, что РКУП приводит к измельчению структуры сплава WE43 с ~60 мкм до ~0,7 мкм и выделению в процессе деформации и нагрева частиц фазы Mg₄₁Nd₅ со средним размером ~0,45 мкм. При этом измельчение структуры и трансформация текстуры, вызванная РКУП, приводят к увеличению предела прочности сплава (с 220 до 300 МПа) и росту пластичности (с 10,5 до 13,2%). Небольшое повышение пластичности сплава, вероятно, связано с трансформацией его текстуры в процессе РКУП от базисной к призматической и активацией призматического скольжения. В то же время, проведенные испытания показали, что скорость биодеградации образцов сплава WE43 в обоих микроструктурных состояниях была близка: $0,96 \pm 0,51$ мм/год в гомогенизированном состоянии и $1,57 \pm 0,19$ мм/год после РКУП. Этот показатель является хорошим компромиссом между обычно желаемой в костной имплантологии скоростью деградации (около 1 мм/год) и скоростью, достаточной для проявления противоопухолевой активности (1,5 – 2,2 мм/год). При этом полученные данные показывают, что совместная инкубация опухолевых клеток LNCaP и MDA-MB-231 со сплавом WE43 приводила к снижению их жизнеспособности и пролиферации. Было установлено, что РКУП приводил к усилению цитотоксической активности сплава против опухолевых клеток.

Таким образом, проведенное исследование показало, что сплав WE43, обработанный РКУП, можно рассматривать в качестве

перспективного кандидата для создания ортопедических имплантатов для использования в клинической онкологии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФ 18-45-06010.

**ВЛИЯНИЕ МАЛОГО СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТИТАНА ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ**

Шурыгина Н.А.¹, Черетаева А.О.¹, Глезер А.М.^{1,2}, Дьяконов Д.Л.¹,

Медведева А.Д.³, Сундеев Р.В.^{1,3}, Томчук А.А.^{1,4}

¹ФГУП «ЦНИИчермет им.И.П. Бардина», Москва

²НИТУ «МИСиС», Москва

³РТУ МИРЭА, Москва, ⁴МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

shnadya@yandex.ru

Технически чистый титан по некоторым механическим характеристикам (например, предел прочности, твердость) уступает титановым сплавам, однако, он обладает высокой пластичностью и коррозионной стойкостью и для ряда применений, в частности - медицины, технически чистый титан наиболее предпочтителен из-за высокой биосовместимости. Одним из методов повышения механических характеристик чистого титана до уровня легированных сплавов являются большие пластические деформации, в частности, кручение под высоким гидростатическим давлением (КВД) в камере Бриджмена. Большое влияние на свойства чистого титана оказывает малое количество примесей. В связи с этим нам представляется важно изучить как влияет малое содержание примесей на характеристики чистого титана при больших пластических деформациях.

В качестве материала для исследований были выбраны 2 материала технически чистого титана (BT1-0), имеющие отличие в содержании примесей Al, Fe и Si. Суммарное содержание этих примесей в Ti-1 составляло 0,133 вес.%, в Ti-2 – 0,628 вес.%. Образцы в исходном состоянии представляли собой пластины толщиной 200 мкм, перед КВД они были отожжены при 800 °С в течении 3 часов. Оба материала в исходном состоянии имели равноосную структуру зерен со средним размером ≈150 мкм. Затем образцы были подвергнуты КВД ($P = 6$ ГПа) в камере Бриджмена при комнатной температуре со скоростью вращения подвижного бойка 1 об/мин и при числе полных оборотов подвижной наковальни $N = 1/4; 1/2; 1; 2; 3$ и 4.

Для Ti-1 содержание ω -фазы резко возрастает при малых степенях КВД, ее количество при $N = 1/4$ достигает $V_{\omega} = 0,37$ и затем практически не изменяется с увеличением деформации. После деформации Ti-2 ω -фаза появляется при $N = 1/4$ в количестве $V_{\omega} = 0,08$ и ее относительный объем плавно увеличивается с увеличением N до $V_{\omega} = 0,23$ ($N = 4$). Проведен детальный статистический анализ эволюции дефектной структуры, формирующейся в процессе кручения под высоким квазигидростатическим давлением (КВД) в камере Бриджмена. Уже при малых степенях деформации ($N = 1/4$) микротвердость обоих материалов возрастает (для Ti-1 с 2,6 до 3,75 ГПа, для Ti-2 – с 2,35 до 2,95 ГПа). Затем значение HV при $N \geq 2$ выходит на насыщение для обоих материалов и составляет 4,3 ГПа и 3,3 ГПа для Ti-1 и Ti-2 соответственно.

Для обоих материалов для всех режимов деформации стационарный потенциал в 1М НСl положителен ($E_{\text{cor}} > 0$), что указывает на пассивное состояние материалов, и их высокую коррозионную стойкость в выбранной среде. Материал Ti-1 более инертен и коррозионностоек по сравнению с Ti-2 (E_{cor} исходного и деформированных образцов более электроположительны). Для Ti-1 после длительной выдержки более 90 суток в 1М соляной кислоте при 25°C все образцы находятся в пассивной области, и она не оказывает значительного влияния на коррозионную стойкость, однако наиболее стабилен образец после $N = 1/2$. Длительная выдержка материала Ti-2 при указанных выше условиях приводит к увеличению коррозионной стойкости всех образцов. Исходный образец и все образцы после деформации находятся в пассивном состоянии ($E_{\text{cor}} > 0$) и не подвержены коррозии

*Авторы выражают благодарность Российскому Фонду
Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку (грант № 18-
08-00640а).*

**НАНОПОРОШКОВЫЙ НИКЕЛЬ С ТРИМОДАЛЬНОЙ
ПОРИСТОСТЬЮ, КОНСОЛИДИРОВАННЫЙ МЕТОДОМ
СПЕКАНИЯ-РАСТВОРЕНИЯ**

Шустов В.С., Зеленский В.А., Анкудинов А.Б., Гнедовец А.Г.,
Алымов М.И.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
Nemo_73@mail.ru*

Современной тенденцией в создании функциональных пористых материалов является синтез консолидированных структур, которые

содержат взаимосвязанные поры нескольких пространственных масштабов. Такие материалы называют иерархически пористыми, а поры существенно отличающихся размеров относят к разным уровням пористости. Иерархически пористые материалы нашли многочисленные практические приложения в области катализа, фильтрации, энергосберегающих технологий и биомедицины.

В данной работе сообщается о создании проницаемого никеля с тримодальной пористостью методами порошковой металлургии. В процессе спекания-растворения была изготовлена серия высокопористых образцов на основе нанопорошка никеля, полученного методом электрического взрыва проводника. В качестве порообразователя использовалась смесь микропорошков хлорида натрия двух фракций – грубой с размером частиц 315-400 мкм и тонкой с частицами 40-50 мкм. Порошки металла-основы и порообразователя брались в постоянном объемном отношении 20/80. При этом в разных образцах состав смеси порошков порообразователя разной дисперсности изменялся и составлял 65/35, 50/50 и 15/85 по объему. После перемешивания порошков в турбулентном смесителе производилось их одностороннее прессование при давлении 300 МПа в цилиндрической матрице. Полученные прессовки спекали в потоке водорода при температуре 700 °С в течение 1 часа, после чего порообразователь вымывался в разогретой воде.

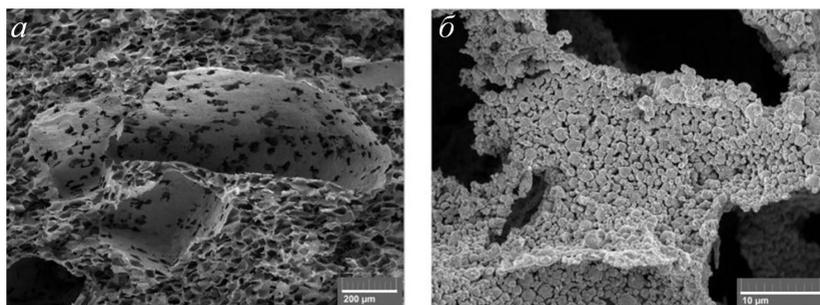


Рисунок 1 – СЭМ-изображения излома пористого никеля при разных увеличениях.

Анализ изображений (рис. 1), сделанных на сканирующем электронном микроскопе, показал, что образцы содержат поры трех пространственных масштабов: крупные (~400 мкм), средние (~40 мкм) и мелкие (<1 мкм) поры. Крупные и средние поры (рис. 1 а) представляют собой отрицательные реплики частиц NaCl разной дисперсности. Происхождение мелких пор в никелевом каркасе (рис. 1 б) связано с неполным спеканием наночастиц Ni. Установлено, что поры средних

размеров образуют взаимосвязанную пространственную сеть, некоторые из них выходят на поверхность крупных пор. С увеличением доли тонкодисперсного порошка NaCl в исходной смеси проницаемость полученных материалов с пористостью 81-83 % возрастала от $0,05 \cdot 10^{-12}$ до $0,2 \cdot 10^{-12}$ м².

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 20-08-00960 А, и Президиума РАН, программа 14П. Исследования методами электронной микроскопии проведены с привлечением средств государственного задания ГЗ 075-00947-20-00.

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОПОРОШКА ЖЕЛЕЗА НА
СПЕКАЕМОСТЬ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА
МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА Fe-30Cr-10Co**

Шустов В.С., Зеленский В.А., Анкудинов А.Б., Устюхин А.С.,
Миляев И.М.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
Nemo_73@mail.ru*

В настоящее время деформируемые магнитотвердые материалы системы Fe-Cr-Co применяемые главным образом для производства малогабаритных постоянных магнитов, производят классическими методами обработки металлов давлением (прокаткой ,штамповкой , вырубкой и т.д.) из сортового проката, поставляемого заводами металлургической промышленности. Однако изготовление постоянных магнитов по такой технологии требует наличия специализированного оборудования, которого нет на предприятиях, выпускающих постоянные магниты. Альтернативой является производство магнитов методом порошковой металлургии. Порошковый метод позволяет производить небольшие партии продукции с высокой точностью по составу сплава. Сдерживающим широкое применение порошкового метода фактором является необходимость проводить спекание материала при достаточно высоких температурах. Поиск способов понижения температуры спекания магнитотвердого порошкового сплава является актуальной проблемой. Известно, что образцы из нанопорошка при спекании достигают высокой плотности (97-98% от теоретической плотности) при температурах на 200-300 градусов ниже температуры спекания микронных порошков аналогичного состава. Целью работы являлось экспериментальное исследование влияния добавок нанопорошка железа на плотность, структуру и магнитные свойства магнитотвердого сплава Fe-Cr-Co. При

выборе количества добавок учитывалось следующее обстоятельство: вследствие активности нанопорошка железа будет увеличиваться содержание кислорода в виде оксидов в спеченном материале и, как следствие, будут снижаться магнитные характеристики. Поэтому количество добавки не превышало 10% от общего количества железа в исходной смеси порошков. В данной работе использовали коммерческий порошок железа, изготовленный по технологии взрыва проволоочки при пропускании через нее тока высокого напряжения. Средний размер частиц порошка по результатам растровой микроскопии составлял 80-100 нм.

На примере сплава Fe-30Cr-10Co установлено, что плотность 98-99% спеченного материала достигается уже при температуре спекания 1100°C. Структура закаленного после спекания образца - α -твердый раствор. Магнитные свойства: B_r - 1,36 Тл, $H_{св}$ - 45,0 кА/м, $(BH)_{\max}$ 41,9 кДж/м³.

Таким образом, можно констатировать факт благоприятного влияния добавок нанопорошка железа на снижение температуры спекания магнитного материала. При этом магнитные свойства остаются на приемлемо высоком уровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту РФФИ № 18-03-00666

СЕКЦИЯ 4
Нанокompозиты

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕТАЛЛОВ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Блантер М.С.¹, Борисова П.А.², Бражкин В.В.³, Ляпин С.Г.³,
Филоненко В.П.³

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
mike.blanter@gmail.com

²НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, borisovapa@mail.ru

³ИФВД РАН, Москва, brazhkin@hppi.troitsk.ru

При синтезе металл-матричных нанокompозитов с фуллеренами в фуллеренах проходят фазовые превращения и на эти превращения влияет взаимодействие фуллере́на с металлами. Изучение этих превращений необходимо для создания композиционных материалов с оптимальной структурой и свойствами. В композитах концентрация фуллеренов мала и поэтому исследовать проходящие в них фазовые превращения затруднительно. В настоящей работе исследовали влияние малых добавок металлов Al или Fe (7 ат.%) на фазовые превращения фуллеренов C₆₀ и C₇₀ при высоком давлении (2 и 8 ГПа) и высоких температурах (500, 800 и 1100 °С). Фуллерены были изучены в двух исходных состояниях - кристаллическом и аморфном, полученном методом механоактивации. В этих условиях термобарической обработки не образовывались металл-фуллерены и сохранялась обычная температурная последовательность превращений фуллеренов: кристаллический или аморфный фуллерен → разориентированный графит → кристаллический графит. Спекание образцов («таблетка» диаметром 5 мм и толщиной 2 мм) выполняли в тороидальной камере высокого давления, а измерения проводили после охлаждения до комнатной температуры и снятия давления (ex situ). Структуру образцов и фазовые превращения в фуллеренах исследовали методами дифракции нейтронов и рентгеновских лучей и методом рамановской спектроскопии.

Показано, что механоактивация фуллеренов при комнатной температуре существенно снижает температуры фазовых превращений фуллеренов в разориентированный графит. Введение Al и Fe в кристаллический фуллерен значительно (на сотни градусов) повышает

температуры превращения фуллеренов в разориентированный графит. В аморфных фуллеренах этот эффект компенсируется снижением температуры превращения за счет предварительной механоактивации. Для выяснения механизма такого сильного влияния небольших добавок Al и Fe на фазовые превращения в фуллеренах требуются дальнейшие исследования.

Также обнаружен различный характер взаимодействия Al и Fe с кристаллическим фуллереном и разориентированным графитом. Поскольку в аморфном фуллерене разориентированный графит образуется при более низких температурах, чем в кристаллическом фуллерене, то можно было сравнить образование карбидов при взаимодействии металлов с разориентированным графитом и кристаллическим фуллереном при одной и той же температуре спекания $-800\text{ }^{\circ}\text{C}$. В первом случае, как и следовало ожидать, образуются карбиды алюминия и железа, тогда как во втором случае карбиды не были обнаружены. Эту более высокую химическую активность разориентированного графита можно объяснить его более высокой энергией и наличием оборванных межатомных связей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов 18-32-00262-мол_a и 19-02-00162-a.

Приглашенный доклад

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ОКСИДНЫХ 3D НАНОКОМПОЗИТОВ: ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Ходан А.Н.¹, Быков А.В.¹, Коновко А.А.², Мартынов А.Г.¹, Бирин К.П.¹,
Горбунова Ю.Г.¹, Цивадзе А.Ю.¹

¹ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина
РАН, Москва

²Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова,
физический факультет, Москва

Функциональные гибридные наноматериалы на основе высокопористых оксидных 3D наноструктур открывают новые возможности их прикладного использования в оптических устройствах диапазона ГГц–ТГц–ИК, микро- и наноэлектронике, катализе и биомедицине.

В ИФХЭ РАН разработана лабораторная технология, которые позволяют получать монолитные высокопористые 3D наноструктуры оксигидроксидов алюминия (НОА), обладающие плотностью $\sim 0,02 - 2,5\text{ г/см}^3$, пористостью $\sim 99 - 25\%$ и удельной поверхностью $\sim 300\text{ м}^2/\text{г}$ (>650

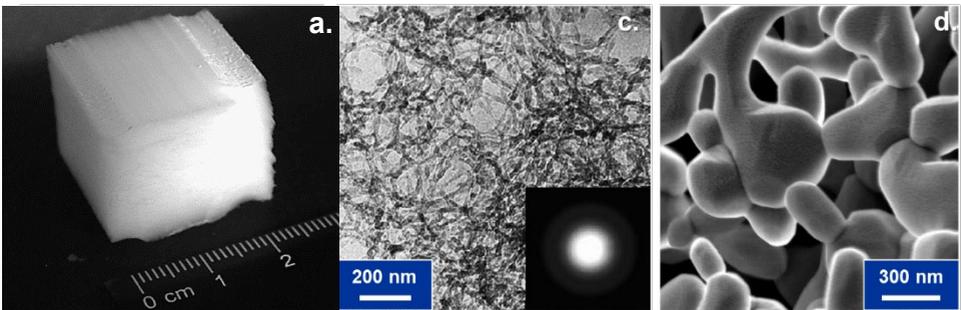
м²/г при лиофильной сушке). При термической обработке исходная аморфная структура, состоящая из наночастиц оксидгидроксида алюминия, претерпевает полиморфные превращения: γ - ($T > 870$ °C), θ - ($T > 1100$ °C) и α -Al₂O₃ ($T > 1200$ °C), но 3D структура и монолитность пористых образцов сохраняется. Для указанных структурно-фазовых состояний величина удельной поверхности снижается: ~ 170, 100, и < 10 м²/г, при этом средний размер областей когерентного рассеяния составляет ~ 7, 10 и 200 нм. Установлено, что при $T \leq 900$ °C основной массоперенос осуществляется по поверхности наночастиц, и при $T > 900$ °C эволюция 3D структуры контролируется условиями объёмной диффузии. Предложена физическая модель, количественно описывающая структурно-морфологическую эволюцию образцов НОА в температурном диапазоне 25 – 1700 °C [1].

Оптические свойства материалов НОА в диапазоне ТГц были описаны с использованием модели эффективной среды (уравнения Максвелла-Гарнетта, Брюгемана и Ландау-Лифшица-Лойенги), было достигнуто хорошее согласие с экспериментальными результатами.

С целью функционализации НОА использовались: а) методы химической модификации поверхности путём осаждения металлоорганических соединений (силоксаны, фталоцианины, оксифинолинаты), б) методы структурно-фазовой модификации путём заполнения свободного объёма НОА наночастицами < 10 нм (TiO₂, NiO₂, CeO_x, Ni, Au и др.)

В настоящее время изучаются перспективы использования пористых 3D наноконструкций Al₂O₃-TiO₂ в гетерогенном органическом фотокатализе и для фотодеструкции микроорганизмов.

Создание на основе НОА материалов, обладающих заданной открытой пористостью и необходимой механической прочностью, также является актуальным направлением для биоинженерных исследований, которое открывает новые возможности для реконструктивной хирургии.



a – вид образца НОА; b – исходная структура НОА (ПЭМ); c – отжиг 4 часа при 400 °С (ПЭМ); d – отжиг 4 часа при 1300 °С (СЭМ)

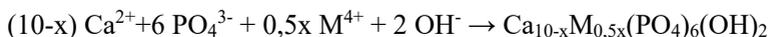
1. Khodan, A., Nguyen, T.H.N, Esaulkov, M., Kiselev, M.R., Amamra, M., Vignes, J-L., Kanaev, A. (2018). Journal of Nanoparticle Research, 20, pp. 194-204.

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ НА 4-ХВАЛЕНТНЫЕ КАТИОНЫ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ГИДРОКСИАПАТИТОВЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Антонова О.С., Гольдберг М.А., Оболкина Т.О., Смирнов С.В.,
Баринов С.М.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
oantonova@imet.ac.ru*

Синтез порошков замещенного гидроксиапатита осуществляли осаждением из водных растворов нитрата кальция и гидрофосфата аммония с использованием аммиака в качестве осадителя при значении pH 9,3-9,7. В качестве 4-хвалентных катионов были выбраны ионы титана и циркония. Титан вводили в виде водного раствора триэтиламинтитаната (ТЭАТ-1), ионы циркония - водного раствора нитрата цирконила соответственно, согласно реакции:



Расчетная степень замещения ионов Ca на Ti и Zr составляла 0,1; 0,5; 1; 5; 10 и 20 мол.%. Термообработка проводилась при температурах 900, 1200 и 1400 °С. В полученных порошковых материалах исследовали фазовые переходы, изменение параметров кристаллической решетки и размеров ОКР. Полученные материалы исследовали методами: рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Shimadzu 6000, излучение CuK α) с использованием базы данных JCPDS PCPDFWIN. Для расчета параметров элементарной кристаллической ячейки использовался метод Ритвельда с привлечением программы FullProf Suite с применением приложений WinPlotr, WinPlotr-2006, DicVol06. Размер областей когерентного рассеяния рассчитывали по методу Шеррера.

Введение 4-хвалентных катионов способствует трансформации гидроксиапатита в трикальцийфосфат (структура витлокита) при больших

концентрациях вводимого катиона, начиная уже с температуры 900 °С. Увеличение температуры способствует снижению степени замещения, необходимой для трансформации. Введение ионов титана в гидроксипатит приводит уменьшению термостабильности материалов в большей степени по сравнению с замещением на ионы циркония.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-11053 мк.

ЭФФЕКТ СПОНТАННОГО СВРАЧИВАНИЯ АТОМНО-ТОНКИХ ГИБРИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $[Cd_{n+1}Se_nL_2]_{\infty}$ AND $[Cd_{n+1}Te_nL_2]_{\infty}$ КАК ОСНОВА МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАШИНЫ

Куртина Д.А., Козина Л.Д., Гаршев А.В., Васильев Р.Б.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,
romvas@inorg.chem.msu.ru*

Молекулярные машины – это молекулы или молекулярные комплексы, осуществляющие квазимеханические движения в ответ на определенные стимулы и представляющие интерес для новых типов оптоэлектронных преобразователей, систем (био)химического распознавания, искусственных мышц и т. д. В настоящей работе мы предложили новый подход к созданию молекулярных машин на основе двумерных гибридных материалов. Мы изучили эффект спонтанного сворачивания, связанный с органическими молекулами (лигандами) на поверхности двумерных коллоидных наноллистов состава $[Cd_{n+1}Se_nL_2]_{\infty}$ and $[Cd_{n+1}Te_nL_2]_{\infty}$, где L-органический лиганд, n-число монослоев. Эффект спонтанного сворачивания приводит к сжатию и изменению пространственной формы. Эта задача может быть интересна для преобразования химических взаимодействий в механическую работу.

Рост наноллистов проводили коллоидным методом в растворе ацетат кадмия -олеиновая кислота - октадецен при 110-160°C [1, 2]. Тщательный подбор условий синтеза позволил вырастить коллоидные двумерные наноллисты с толщиной из диапазона 2-4 монослоя (0.6-1.2 нм) и протяженными латеральными размерами до 400 нм. Показана возможность контроля толщины с точностью 1 монослой. Для индуцирования эффекта спонтанного сворачивания исходный лиганд - олеиновая кислота обменивалась на тиол-содержащие лиганды (гексадекантиол, тиогликолевая кислота, ацетилцистеин). Анализ кристаллической структуры, морфологии, элементного состава и покрытия поверхности лигандами был проведен с использованием методов HRTEM, HAADF-STEM, SAED, XRD и FTIR.

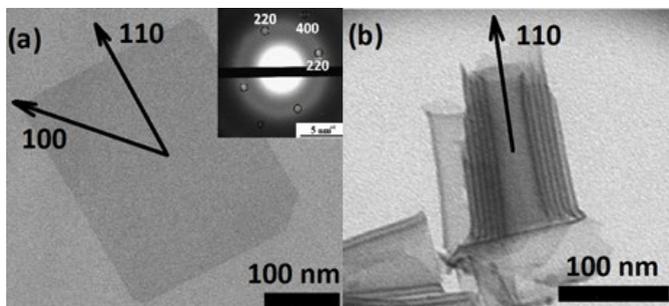


Рисунок 1 – Изображения ПЭМ плоского (а) и свернутого (б) нанолиста CdTe

На рис.1а показаны плоские практически квадратные листы $[\text{Cd}_{n+1}\text{Te}_n\text{L}_2]_\infty$, покрытые олеиновой кислотой, с размерами порядка 200 нм со структурой цинковой обманки с направлением $[001]$, нормальным к плоскости листа. Было показано, что нанолисты CdTe спонтанно сворачиваются при замене олеиновой кислоты, присоединенной к плоскостям, обогащенным Cd (001), тиолами, формируя многостенные свертки (рис 1б). Сворачивание происходит вдоль направления $[110]$, при этом сохраняется монокристалльный характер листов. Это индуцирует красный сдвиг экситонных полос с одновременным их уширением с сохранением двумерных оптических свойств. В случае нанолистов $[\text{Cd}_{n+1}\text{Se}_n\text{L}_2]_\infty$ обмен лигандов с тиогликолевой кислотой и N-ацетилцистеином сохраняет свернутую морфологию, однако переориентирует направление сворачивания из $[110]$ в $[100]$. Механизм сворачивания, связанный с напряжениями, индуцированными лигандами на поверхности, обсуждается в докладе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-03-00481.

1. D. A. Kurtina, et.al., Chem. Mater., 31, 9652 (2019).
2. R. V. Vasiliev, et.al., Chem. Mater., 30, 1710 (2018).

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА CoFeZr В БЕСКИСЛОРОДНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ MgF₂.

Домашневская Э.П.¹, Ивков С.А.¹, Ситников А.В.², Козаков А.Т.³,
Никольский А.В.³

¹Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1,
Воронеж, fit@phys.vsu.ru

²Воронежский государственный технический университет, Московский пр.,
14, Воронеж

³Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Установлено влияние относительного содержания металлической компоненты CoFeZr на фазовый состав, атомное строение и субструктуру нанокompозитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$ в широком интервале изменения значений $x=7\div 51$ ат.% методами рентгеновской дифракции, рентгеноэлектронной спектроскопии XPS и инфракрасной спектроскопии. Слои нанокompозитов микронной толщины разного состава получали в едином цикле ионно-лучевым распылением составной мишени в атмосфере аргона.

Полученные результаты показывают, что при относительно малом содержании ($x < 25$ ат.%) металлический сплав CoFeZr находится в рентгеноаморфном состоянии в виде кластеров в нанокристаллической матрице MgF₂.

На ИК-спектрах этих образцов наблюдается наиболее четкое формирование мод от нанокристаллов диэлектрической матрицы MgF₂.

С увеличением содержания металлической компоненты до $x > 25-28$ ат.% диэлектрическая матрица MgF₂ становится рентгеноаморфной, но в ней формируются нанокристаллы сплава CoFeZr сначала гексагональной сингонии на основе структуры α -Co размерами порядка 15 nm, преимущественно ориентированные в плоскости (100) гексагональной решетки. При дальнейшем возрастании содержания металлического сплава в пределах $x=38-51$ ат.% гексагональная структура нанокристаллов CoFeZr перестраивается в кубическую объемноцентрированную на основе α -Fe с преимущественной ориентацией в плоскости (110).

В результате самоорганизации и обменного взаимодействия между атомами d-металлов в нанокристаллической/аморфной бескислородной матрице MgF₂ сохраняется металлическая связь в кластерах/нанокристаллах сплава CoFeZr, значительная часть которых оказывается окисленной в поверхностных слоях нанокompозитов в соответствии с данными XPS

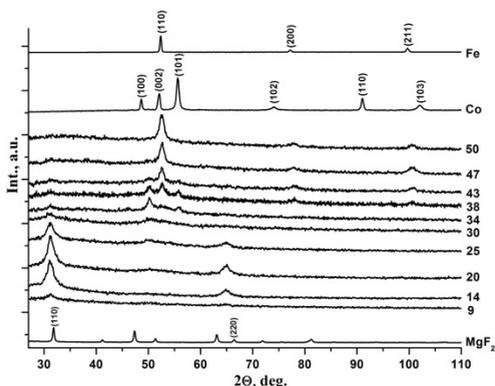


Рисунок 1 – Дифрактограммы от образцов нанокompозитов разного состава $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ на подложках из стекла. Справа у каждой кривой приведено содержание металлической фазы x в атомных процентах.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННОЙ СВЯЗКИ Fe-Co-Ni-Cr ДЛЯ АЛМАЗНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Жасай У.А., Логинов П.А.

*Национальный Исследовательский Технологический Университет
«МИСИС», Москва, umyt.zhasay@mail.ru*

Алмазные режущие инструменты широко применяются в промышленности для резки или сверления различных материалов. Алмазный инструмент представляет собой композиционный материал, который состоит из монокристаллов алмаза и металлической матрицы. Алмаз отвечает за процесс резания или микроцарапания обрабатываемого материала, а матрица (связка) удерживает алмаз в рабочем слое. В производстве режущих инструментов используются синтетические алмазы, которые имеют высокую прочность и износостойкость. Связка должна обладать комплексом высоких механических свойств. Наиболее важными характеристиками, оказывающими влияние на износостойкость и способность связки к алмазодержанию, являются предел прочности при изгибе, твердость и модуль упругости.

Данная работа является продолжением исследований по разработке в НИТУ МИСИС связок на основе сплава Fe-Co-Ni [1]. Целью работы является сравнение механических и трибологических свойств ферритных связок Fe-Co-Ni и аустенитных связок Fe-Co-Ni-Cr. Порошковые смеси Fe-Co-Ni и Fe-Co-Ni-X%Cr ($X = 5 - 30$ масс. %) получали методом

механического легирования в планетарной центрабежной мельнице. Обработку проводили в следующем режиме: скорость вращения барабанов 1388 об/мин, скорость вращения водила 694 об/мин, соотношение масс размольных тел и порошка 15:1, продолжительность обработки 20-30 минут. Для предотвращения окисления барабаны заполняли инертным газом (аргоном).

Из полученных порошковых смесей методом горячего прессования при температуре 950 °С были изготовлены компактные образцы и исследованы их механические свойства и структура. Зависимость предела прочности при изгибе от концентрации хрома имеет экстремальный характер с максимумом при 7 % хрома – 3200 МПа, что на 60 % выше, чем у исходной связки Fe-Co-Ni. Дальнейшее увеличение концентрации хрома приводит к небольшому уменьшению предела прочности при изгибе (до 2700-3000 МПа), однако данные образцы характеризовались значительно более высокой пластичностью.

С целью определения твердости и модуля упругости структурных составляющих в исходных и модифицированных хромом связках провели наноиндентирование компактных образцов. Для данных испытаний проводили полировку образцов и релаксационный отжиг при температуре 270 °С. Испытания проводили при различных нагрузках на инденторе (1 – 10 мН). Присутствие в связке хрома обеспечивает повышение твердости с 4,7 до 6,5 ГПа. Характер кривых наноиндентирования для образцов с высоким содержанием хрома указывал на возможное протекание мартенситного превращения под нагрузкой.

Для оценки износостойкости инструмента со связкой [Fe-Co-Ni]-30%Cr были проведены трибологические испытания методом измерительного скольжения по схеме «стержень – пластина» и определен приведенный износ. Связка [Fe-Co-Ni]-30%Cr по износостойкости превосходила исходную Fe-Co-Ni в 8-10 раз.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 17-79-20384.

Список литературы:

1. Loginov P, Sidorenko D, Bychkova M, Petrzhik M, Levashov E. Mechanical Alloying as an Effective Way to Achieve Superior Properties of Fe-Co-Ni Binder Alloy. *Metals-Basel* 2017; 7: 570.

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ
СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩЕГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ В2-
(Ni, Fe)Al**

Капланский Ю.Ю., Левашов Е.А., Коротицкий А.В., Бычкова М.Я.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, ykaplanscky@mail.ru

Дисперсионно-твердеющие сплавы системы Ni-Al-Fe являются перспективными кандидатами для производства ответственных деталей паровых турбин. Применение данных сплавов позволит повысить сверхкритические параметры пара и, следовательно, тепловую эффективность турбин при одновременном снижении выбросов углекислого газа.

Жаропрочный сплав Ni₂₇Fe₂₆Al₃₂Cr₁₀Co₅ получали по технологии горячего изостатического прессования сферических композиционных гранул 110-180 мкм, после чего подвергали закалке в воду (1150 °С, 6ч) с последующим старением (850 °С, 1.5ч) в вакуумной печи. Термическая обработка привела к изменению морфологии и уменьшению размера когерентных выделений α -Fe(Cr) в (Ni,Fe)Al матрице. При относительно небольшом мисфите ~0.5 % упрочняющие выделения размером 20-120 нм имели сферическую морфологию. В процессе гомогенизирующего отжига перед закалкой отмечалось образование по границам зерен частиц интерметаллидной σ фазы состава FeCr. Нуклеация данной фазы происходила в результате перестройки ОЦК кристаллической решетки феррита при диффузионном насыщении атомами хрома.

Образцы исследуемого сплава были испытаны на осадку при нормальных условиях и в интервале 873 – 1573 К со скоростью деформации 0.01 с⁻¹. Старение значительно повысило механические свойства за счет одновременного уменьшения размера и увеличения объемной доли когерентных выделений α фазы, препятствующих движению дислокаций. Например, при комнатной температуре предел прочности (σ_b) и условный предел текучести ($\sigma_{0.2}$) удалось увеличить на 24 и 18 % и достичь значений 2325 ± 55 и 1031 ± 34 МПа, соответственно. Кроме того, наблюдался рост сопротивления вязкопластического течения при высокотемпературных испытаниях. При 973 К было зафиксировано увеличение $\sigma_{0.2}$ от 300 до 411 МПа. При температуре выше 973 К разница значений сопротивлении сжимающим напряжениям уменьшалась и при 1373 К находилась в пределах погрешности измерений. Разупрочнение сплава при превышении 973 К вызвано растворением когерентных

выделений α -Fe(Cr) фазы в матричной фазе, сопровождающееся переходом от дислокационных механизмов деформации к диффузионным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (Проект № 19-79-10226).

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Кузнецова А.С.^{1,2}, Ермакова Л.Э.², Анфимова И.Н.¹, Антропова Т.В.¹

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
[a_kuznetsova95@mail.ru](mailto:kuznetsova95@mail.ru)

Проблема развития экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий выдвигает задачу разработки научных основ создания новых материалов для мембранных и сорбционных технологий, оптики, нано- и микроэлектроники. Высококремнезёмные пористые стекла (ПС), благодаря наличию регулируемых структурных параметров пор, высокой реакционной способности поверхности, термической и химической стабильности, относительно низкой стоимости и др. активно используются в качестве матриц для получения композиционных наноматериалов с различными функциональными свойствами, обусловленными свойствами внедренного допанта. Придание ПС магнитных свойств осуществлялось путем введения оксида железа Fe_2O_3 в шихту при варке натриевоборосиликатного (НБС) стекла, дальнейшее заполнение которых сегнетоэлектриком позволяет получать композиты со свойствами мультиферроиков. В работе также были получены висмут содержащие композиционные материалы (ВКМ) путем пропитки ПС-матриц нитратом висмута $Bi(NO_3)_3$ с последующей специальной тепловой обработкой импрегнированных матриц для формирования висмутовых активных центров. Данные нанокompозиты обладают люминесценцией в широком спектральном диапазоне от видимой до ИК-области, что делает их перспективными для применения в волоконно-оптических технологиях.

Поскольку свойства наноструктурированных систем в первую очередь определяются параметрами их поверхности и процессами, происходящими на границе раздела фаз, в работе были исследованы и сопоставлены электрокинетические характеристики микро- (МИП) (с радиусом пор 1.3-2.0 нм) и макропористых (МАП) (с радиусом пор 13-16 нм) базовых высококремнезёмных матриц и железо- и висмутсодержащих стекол на фоне сантимолярного раствора нитрата калия в широкой области

pH. Результаты, полученные для ВКМ, также сопоставлены с зависимостью дзета-потенциала от pH для зольей синтезированного и промышленного оксида висмута (III).

Наличие фазы магнетита в Fe-4 МИП и МАП стеклах было подтверждено методом рентгенофазового анализа. Результаты энергодисперсионного рентгеновского анализа показали, что железо равномерно распределено по толщине образцов Fe-4, тогда как в висмутсодержащих стеклах висмут находится преимущественно на полутолщине образца. Значение электрокинетического потенциала было найдено методом лазерного доплеровского электрофореза. Обнаружено, что модифицирование МИП стекол оксидом висмута (менее 0.5 мас. %) практически не сказывается на их электрокинетических характеристиках, в отличие от ВКМ, полученных на основе МАП стекол. Увеличение содержания оксида висмута в нанокompозите до 2.5 – 3 мас. % приводит к появлению положительной области ζ -потенциала частиц ВКМ. Установлено, что значения ζ -потенциала промышленного Vi_2O_3 и оксида висмута, полученного путем термолиза $\text{Vi}(\text{NO}_3)_3$ в лабораторных условиях, близки между собой и положительны во всей исследованной области pH. Показано, что введение оксида железа (III) в ПС-матрицу приводит к небольшому увеличению значения $|\zeta|$ -потенциала как для МИП, так и для МАП стекол, что может быть связано с более высоким поверхностным зарядом пористых стекол Fe 4.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-03-01206. Образцы двухфазных и пористых стекол изготовлены в рамках госзадания ИХС РАН (тема № 0097-2019-0015). Авторы благодарят Гирсову М.А. за помощь в проведении термической обработки композитов. Исследования проведены с использованием оборудования Ресурсного Центра СПбГУ «Методы анализа состава вещества» и «Нанотехнологии».

ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ И ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Ланцев Е.А., Нохрин А.В., Болдин М.С., Попов А.А.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

lants011@gmail.com

Целью настоящей работы являлось определение влияния размера исходных частиц порошков и количества свободного углерода на кинетику

электроимпульсного плазменного спекания, температурно-временные интервалы усадки, структуру и фазовый состав твердых сплавов WC-Co.

Объектами исследования выступали порошки двух партий WC-10%Co с различным исходным размером частиц карбида вольфрама: субмикронные и нанодисперсные. В обе партии порошков подмешивалось различное количество свободного углерода от 0,1 вес.% до 1,5 вес.% в виде коллоидного графита исходя из начального содержания углерода в составе смеси. Порошки перемешивались в среде спирта с помощью планетарной мельницы «FRITSCHE-PULVERISETTE 6» в течении 20 часов со скоростью 150 об/мин.

Далее порошки спекались на установке «DR. SINTER model SPS-625» (SPS SYNTEX INC. Ltd.). Скорость спекания составляла 50 °C/мин. Конечная температура спекания, а также время выдержки при максимальной температуре и прикладываемое давление к порошку варьировалось.

Анализ полученных результатов показал, что спекание твердых сплавов можно разделить на две стадии: интенсивное уплотнение на начальном и промежуточном этапе спекания, и медленное уплотнение на финальной стадии. Вне зависимости от исходного размера частиц карбида вольфрама и количества свободного углерода в составе порошков энергия активации первой стадии спекания составила $8(\pm 2)$ кДж/моль. Энергия активации второй стадии спекания сильно зависит от количества свободного углерода и в среднем составила $12(\pm 2)$ кДж/моль.

Установлено, что основным механизмом спекания на обеих стадиях является диффузионная ползучесть кобальта, энергия активации зернограницной самодиффузии которого равняется рассчитанной нами при спекании. С помощью методов рентгенофазового анализа и электронной микроскопии показано, что смена механизмов спекания с интенсивного на более медленный происходит из-за того, что в области высоких температур (900-1000°C) атомы вольфрама и углерода начинают интенсивно растворяться в кобальте, тем самым заметно тормозя его диффузионные свойства.

Полученные образцы твердого сплава характеризуются высокой твердостью (до 18÷20 ГПа) и трещиностойкостью ($7,5\div 9$ МПа/м^{1/2}).

Работа выполнена при поддержке РФФИ №18-73-10177.

ГРАФЕН, ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЙ АРОМАТИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ: СИНТЕЗ, ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЕ В ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Липовка А.А.¹, Родригес Р.Д.¹, Халелов А.¹, Постников П.С.¹,
Дорожко Е.В.¹, Амин И.², Мурастов Г.¹, Чен Дж.³, Шен В.⁴,
Трусова М.Е.¹, Чехими М.⁵, Шеремет Е.С.¹

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

²*Университет Амстердама, Амстердам, Нидерланды*

³*Университет электронных наук и технологий Китая, Чэнду, Китай*

⁴*Институт исследования полимеров имени Лейбница, Дрезден, Германия*

⁵*Университет Париж-Эст, Гье, Франция*

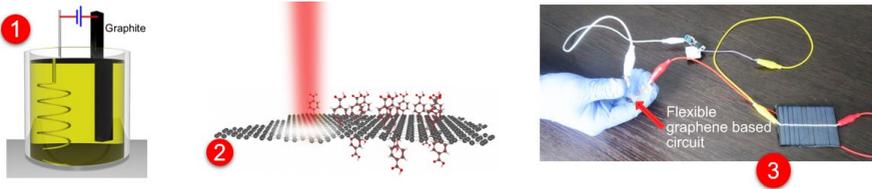
lipovka.a@gmail.com

Углеродные наноматериалы находят широкое применение как в фундаментальных научных исследованиях, так и в практических приложениях. Особый интерес представляют материалы с управляемыми свойствами, самым часто используемым из которых является оксид графена (ОГ) - гидрофильный диэлектрик. Его свойствами можно управлять путем удаления кислородсодержащих групп, тем самым регулируя электрическую проводимость материала, оптические свойства, гидрофильность. Данный процесс называется восстановлением, и может быть реализован при подведении внешней энергии. Одним из развивающихся методов является восстановление с помощью лазерного излучения. Подход позволяет локально модифицировать ОГ, варьируя параметрами лазера, тем самым создавая возможность формировать пространственно-разрешенные высокопроводящие структуры с заданными свойствами на различных подложках. Вместе с тем, с использованием восстановленного ОГ существует несколько сложностей, основной из которых является недостаточная механическая стабильность структуры на полимерных подложках.

В данной работе предложен метод синтеза материала, пригодного для использования в качестве альтернативы ОГ. Полученный материал (Mod-G) представляет собой графен, функционализированный солями диазония в процессе электрохимического отслоения графита в разбавленной серной кислоте. Mod-G как и ОГ является гидрофильным, а также не проводит электрический ток, благодаря наличию арильных групп. В работе также показано управление свойствами данного материала с помощью лазерного излучения для получения проводящих пленок на полимерных подложках для применения в создании гибких электронных устройств. Также проведено всестороннее исследование полученного материала и его модификации после облучения лазером.

Ключевым результатом является высокая механическая устойчивость облученного Mod-G на подложках из полиэтилентерефталата за счет формирования композита в процессе локального нагрева при воздействии лазера. Более того, меняя степень сплавления Mod-G в полимерную матрицу возможно управление проводимостью структуры в широком диапазоне значений (изменение сопротивления от десятков Ом до сотен кОм).

Результаты работы опубликованы в работе [1], где наряду с изучением свойств материала показаны примеры его использования в создании электрических схем и сенсоров.



1. Rodriguez RD, Khalelov A, Postnikov PS, Lipovka A, Dorozhko E, Amin I, et al. Beyond graphene oxide: laser engineering functionalized graphene for flexible electronics. *Materials Horizons*. 2020. doi:10.1039/c9mh01950b

**ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ TiAl/Ti3Al**
Логинов П.А., Капланский Ю.Ю., Пацера Е.И., Авдеенко Е.Н.,

Левашов Е.А.

НИТУ МИСИС, Москва

pavel.loginov.misis@list.ru

В настоящее время наблюдается активное внедрение предприятиями оборонно-промышленного комплекса РФ аддитивных технологий в производство элементов конструкций летательных аппаратов, деталей и узлов турбин, а также одновременное повышение требований к тактико-техническим характеристикам силовых установок и, следовательно, эксплуатационным свойствам (пластичность, предел прочности и условный предел текучести, скорость высокотемпературной ползучести) применяемых жаропрочных конструкционных материалов. Однако, разработка турбинных установок с значительно улучшенными показателями тепловой эффективности, удельной мощности и тяги ограничивается высокой плотностью и недостаточным уровнем

сопротивления ползучести при температурах более 600-800 °С существующих на данный момент промышленных никелевых суперсплавов и жаропрочных сталей. Поэтому существующая тенденция развития промышленности и потребность в принципиально новых легких конструкционных материалах для перспективных турбинных установок делает разработку новых жаропрочных сплавов на основе TiAl/Ti₃Al с улучшенным сопротивлением ползучести при температурах выше 800 °С, а также оптимизацию технологических параметров производства изделий сложной формы на промышленной СЛС- установке и последующих режимов термообработки чрезвычайно актуальной задачей.

В данной работе получение порошков жаростойких сплавов на основе TiAl/Ti₃Al осуществлено двумя методами – механического легирования (МЛ) и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Для повышения высокотемпературной прочности было проведено комплексное легирование сплава ниобием, молибденом и бором.

Методом механического легирования в планетарной центробежной мельнице «Активатор-2s» (частота вращения барабанов 1388 об/мин, частота вращения водила – 694 об/мин, соотношение масс размольных тел и порошка – 15:1, продолжительность процесса – 10-60 минут) были получены смеси с различным масштабом гетерогенности структуры. При минимальной продолжительности обработки частицы порошков имели слоистую структуру. С увеличением времени обработки активировались процессы взаимной диффузии компонентов, что приводило к формированию хрупких интерметаллидов TiAl и Ti₃Al, гомогенизации и измельчению частиц порошка. При исследовании фазового состава и тонкой структуры МЛ-порошков методами РФА и ПЭМ установлено, что они преимущественно состоят из интерметаллида TiAl. Значительная часть ниобия и молибдена была растворена в матрице на основе TiAl, в небольшом количестве они сохранялись в исходном виде.

С целью получения СВС-порошков в системе Ti-Al-Nb-Mo-V проводили их обработку в планетарной центробежной мельнице «Активатор-2s» с малой продолжительностью и добавкой 10 масс. % изопропилового спирта. Обработка в таком режиме приводила к получению гранул со слоистой структурой, в которых формирование интерметаллидных фаз или твердых растворов исключалось (вследствие эффекта Ребиндера). Синтез интерметаллидов проводили методом СВС в режиме объемного горения. Полученная заготовка исследовалась методами РФА и СЭМ. Данные образцы являлись двухфазными и содержали TiAl и Ti₃Al в массовом соотношении 3:1.

наблюдается у нанокompозитов на основе ItCo (1040 Oe), ItFe (119 Oe) и CitrNi (102 Oe). Найдено критическое значение $d_{cp}HЧ$ для кобальта, связанное с переходом от многодоменных к однодоменным частицам, равное 3.8 нм (рис.3).

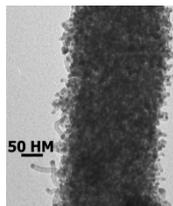


Рисунок 1

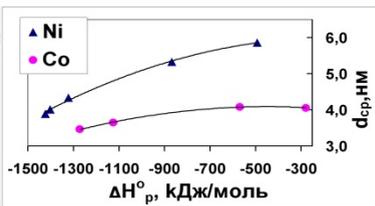


Рисунок 2

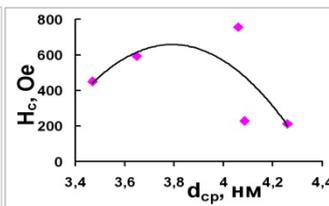


Рисунок 3

Спектр потенциальных областей применения полученных нанокompозитов - от газовых и магнитных сенсоров, катализаторов, магнитных носителей информации высокой плотности до новых форм лекарственных препаратов и медицинской диагностики. Исследования по культивированию клеточных культур почвообразующих микромицетов (*Trichoderma asperellum*, *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus niger* и *Phytophthora infectans*), а также опухолевых клеток человека HepG2 и HeLa на средах с содержанием синтезированных нанокompозитов железа, кобальта и никеля (от 10^{-7} до 10^{-3} масс.д.) показали немонотонную зависимость жизнедеятельности и ростовых свойств клеток от дозы нанокompозитов. Тестовые внутримышечные инъекции нанокompозитов железа и никеля мышам линии c57bl в количествах $2 \cdot 10^{-6}$ г/г веса не выявили токсических эффектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-03-00342, № 19-03-00237).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СПЕКАНИЕ КЕРАМИКИ $ZrO_2-Al_2O_3$, СОДЕРЖАЩЕЙ СИЛИКАТ НАТРИЯ И ОКСИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Оболкина Т.О., Гольдберг М.А., Антонова О.С., Смирнов С.В.,
Качанов Г.П., Егоров А.А., Баринов С.М.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
tobolkina@imet.ac.ru

Керамика на основе диоксида циркония и оксида алюминия ($ZrO_2-Al_2O_3$) сочетает в себе уникальный набор свойств: высокая прочность при

изгибе, трещиностойкость твердость, износостойкость, химическая инертность. Перспективными областями применения данной керамики являются машиностроение, авиакосмическая область, медицина. Для изготовления изделий из $ZrO_2-Al_2O_3$ необходимо применение специального дорогостоящего термического оборудования (высокотемпературные печи, горячее и изостатическое прессование). Это связано в первую очередь с высокой температурой спекания ($1600-1750\text{ }^\circ\text{C}$). Одним из эффективных способов снижения температуры спекания является введение добавок, интенсифицирующих процесс спекания. Известны работы, направленные на введение добавок оксидов металлов [1], понижающие температуру спекания. При добавлении добавок, образующих расплав, температура спекания снижается более существенно. Это происходит в следствии протекания спекания по жидкофазному механизму, когда процесс массопереноса (диффузия катионов, анионов) осуществляется через жидкую фазу [2]. На сегодняшний день исследования влияния совместным введением комплексных добавок, содержащих оксиды металлов и добавок, образующих расплав малоизучены.

В данной работе исследуются влияние комплексной добавки, содержащей силикат натрия $Na_2Si_2O_5$ и катионы металлов Co, Fe на спекание в диапазоне от 1200 до $1300\text{ }^\circ\text{C}$, микроструктуру, фазовый состав и механические свойства.

Получены композиционные порошки ZrO_2 , содержащие 10 масс.% Al_2O_3 методом химического соосаждения из растворов солей. Для стабилизации тетрагональной модификации ZrO_2 ($t-ZrO_2$) вводили 3 мол.% Y_2O_3 по отношению к ZrO_2 . Согласно измерению пористости материалов, для системы $ZrO_2-10Al_2O_3$ введение комплексной добавки, содержащей $Na_2Si_2O_5$ и катионы Co, Fe оказывало существенное влияние на открытую пористость образцов – уже при $1250\text{ }^\circ\text{C}$ (ниже 1%), в то время как для материалов, содержащих добавку $Na_2Si_2O_5$ она снижалась от 18,97 до 3,29% по мере роста температуры. Исследование фазового состава керамики $ZrO_2-10Al_2O_3$, спеченной в диапазоне температур $1250-1270\text{ }^\circ\text{C}$ показало, что полученные материалы характеризовались формированием $t-ZrO_2$ и корунда, формирование фазы $m-ZrO_2$ не детектировалось. Спекание при $1300\text{ }^\circ\text{C}$ приводило к формированию незначительного (не более 3 масс. %) количества $m-ZrO_2$ для всех составов добавок. Исследование механических свойств керамики, содержащей комплексные добавки и содержащие катионы Co и Fe обеспечивали значительный рост прочности и микротвердости. Согласно полученным данным, трещиностойкость материалов, содержащих комплексные добавки, превышала величины для материалов с $Na_2Si_2O_5$. При этом, наибольшую

вязкость разрушения имели образцы $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5+0,33\% \text{ Co}$, $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5+0,33\% \text{ Fe}$ спеченные при 1250°C – до $5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ Для керамических образцов, содержащих добавку $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5+0,33\% \text{ Fe}$, прочность при трехточечном изгибе снижалась в температурном диапазоне $1250\text{-}1300^\circ\text{C}$ от $360\pm 24 \text{ МПа}$ до $280\pm 27 \text{ МПа}$.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований РАН 34П «Актуальные проблемы физикохимии поверхности и создания новых композитных материалов».

1. Flegler A. J., Burye T. E., Yang Q., Nicholas J. D. Cubic yttria stabilized zirconia sintering additive impacts: A comparative study //Ceramics International. – 2014. – Т. 40. – №. 10. – С. 16323-16335.

2. Eyteev A. A., Makarov N. A., Lemeshev D. O., Zhitnyuk S. V. $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ceramic with eutectic additives //Glass and Ceramics. – 2011. – Т. 68. – №. 7-8. – С. 258-262.

ГИБРИДНЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Румянцева М.Н.¹, Насридинов А.Ф.¹, Токарев С.Д.^{1,2}, Федорова О.А.^{1,2},
Гаськов А.М.¹

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²ИНЭОС имени А.Н. Несмеянова РАН, Москва

roum@inorg.chem.msu.ru

Полупроводниковые газовые сенсоры на основе широкозонных оксидов металлов SnO_2 , ZnO , In_2O_3 , WO_3 обладают необходимой чувствительностью для обнаружения основных загрязнителей воздуха на уровне соответствующих пороговых значений (ПДК), однако необходимость нагрева чувствительного слоя до $200\text{--}500^\circ\text{C}$ значительно увеличивает энергопотребление сенсоров, что является одним из основных ограничений для их сопряжения с портативными и мобильными устройствами. Для уменьшения энергопотребления перспективным подходом является замена термического нагрева фотоактивацией с использованием света видимого диапазона. Широкозонные полупроводниковые оксиды поглощают свет УФ диапазона, энергия которого соответствует ширине запрещенной зоны, но прозрачны в видимом диапазоне спектра. Одним из способов повышения оптической чувствительности полупроводниковых оксидов и смещения ее в видимую область является создание гибридных материалов, содержащих

фотосенсибилизаторы – макроциклические и гетероциклические комплексы переходных металлов.

В настоящей работе фоточувствительные гибриды на основе гетероциклического комплекса Ru (II) (RuITP) и нанокристаллических полупроводниковых оксидов SnO₂ и In₂O₃ исследованы в качестве чувствительных материалов для детектирования NO (0.25 – 4.0 ppm) и NO₂ (0.05 – 1.0 ppm) при комнатной температуре при периодическом освещении синим светом ($\lambda_{\text{max}} = 470$ нм). Полупроводниковые оксиды получены химическим осаждением с последующим термическим отжигом и охарактеризованы методами XRD, КР спектроскопии и низкотемпературной адсорбции азота. Гетероциклический комплекс Ru (II) синтезирован впервые и охарактеризован методами ¹H ЯМР, ¹³C ЯМР, MALDI-TOF масс-спектрометрии и элементного анализа. Положение HOMO и LUMO комплекса RuITP определено по данным циклической вольтамперометрии. Оптические свойства комплекса RuITP, нанокристаллических оксидов и гибридов изучены методом оптической спектроскопии в режимах пропускания и диффузного отражения. Взаимодействие NO и NO₂ с поверхностью синтезированных материалов исследовано в режиме *operando* методом DRIFT спектроскопии.

Взаимодействие полупроводниковых оксидов *n*-типа SnO₂, и In₂O₃ с NO и NO₂ сопровождается уменьшением электропроводности. При комнатной температуре в темновых условиях адсорбция NO_x на поверхности полупроводниковых оксидов является необратимым процессом: при удалении оксидов азота из атмосферы, в чистом воздухе, проводимость не возвращается к своему исходному значению. Модификация поверхности SnO₂ и In₂O₃ комплексом RuITP приводит к появлению высокой фоточувствительности в видимом диапазоне и формированию воспроизводимого сенсорного сигнала к NO и NO₂ при комнатной температуре в условиях подсветки. Ключевую роль в обеспечении обратимого взаимодействия гибридных материалов с газовой фазой играют фотовозбужденные носители заряда, образующиеся при облучении гибридов светом, соответствующим полосе поглощения гетероциклического комплекса Ru (II). Роль освещения, вероятно, заключается в фотогенерации дырок, которые рекомбинируют с электронами, локализованными хемосорбированными на поверхности молекулами газов-окислителей. В результате фотодесорбция оксидов азота становится возможной под действием излучения видимого диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 19-19-00357.

СИНТЕЗ МИКРОТРУБОК ЛЕПИДОКРОКИТА С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

Стрыканова В.В., Гулина Л.Б., Толстой В.П.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
vera.stryka@gmail.com

Синтез нанокompозитов на основе неорганических оксидов и частиц благородных металлов представляет актуальную задачу препаративной химии. Такие материалы часто обладают улучшенным набором функциональных свойств по сравнению с чистыми оксидными соединениями. Так, материалы, содержащие наночастицы (НЧ) металлического серебра, способны проявлять эффект поверхностно-плазмонного резонанса и усиливать сигнал комбинационного рассеивания света [1], обладают цитотоксическими [2] и каталитическими [1] свойствами.

В настоящей работе синтез нанокompозита $\gamma\text{-FeO-OH@Ag}$ проводился на границе раздела фаз раствор – газообразный реагент [3] на поверхности водного раствора соли хлорида железа (II) в атмосфере аммиака. Образующуюся на поверхности плёнку гидроксида железа обрабатывали по методике ионного наплавления (ИН). В качестве реагентов использовались реактив Толленса как источник ионов серебра и раствор гидразина для восстановления сорбированных на поверхности плёнки катионов [4]. После проведения 1-3 циклов ИН плёнка отмывалась на поверхности воды, переносилась на кремниевую пластину и сушилась на воздухе при температуре 60°C. В процессе сушки плёнка трансформировалась в микросвитки таким образом, что НЧ серебра оказывались на их внутренней поверхности. Полученные образцы с тубулярной морфологией исследовались методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ), энергодисперсионной спектроскопии и рентгенофазового анализа (РФА). Методом СЭМ установлено, что внутренняя поверхность трубок образована 2D-нанокристаллами толщиной около 10 нм (Рис.1. а), на гранях которых формируются НЧ серебра, которые достигают 25 нм после проведения 3 циклов ИН (Рис. 1 б). Рентгенограмма образцов содержит максимумы, характерные для орторомбической модификации гидроксида железа (III) – лепидокрокита и кубической кристаллической решётки металлического серебра. Каталитическая активность синтезированных материалов тестировалась по ускорению движения микротрубок в 10-% водном растворе перекиси водорода. Было установлено, что трубки, модифицированные НЧ серебра, имеют среднюю скорость движения в

среднем в 2 раза больше по сравнению с микротрубками чистого лепидокрокита. Сделано предположение, что этот эффект обусловлен усиленным образованием пузырьков газа вследствие разложения перекиси водорода не только на гранях кристаллов, но и на поверхностях НЧ.

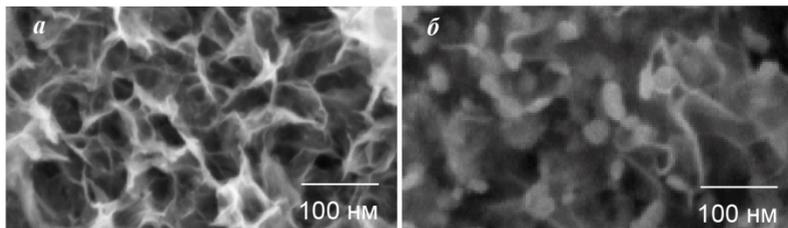


Рисунок 2 – СЭМ изображения внутренней поверхности микротрубок γ -FeO-OH (а), и γ -FeO-OH@Ag после проведения трёх циклов ИН (б).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 16-13-10223-П.

Литература:

1. Zhou, X.; Liu, G.; Yu, J.; Fan, W. *J. Mater. Chem.* 2012, 22, 21337-21354.
2. Sánchez-Valdes, S.; Ortega-Ortiz, H.; Ramos-de Valle, L.F.; Medellín-Rodríguez, F. J.; Guedea-Miranda, R. *J. Appl. Polym. Sci.* 2009, 111, 953-962.
3. Tolstoy, V.P., Gulina, L. B. *Langmuir* 2014, 30, 8366-8372.
4. Tolstoy, V. P., *Russ. Chem. Rev.* 2006, 75, 161-175.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ W, Mo и Nb ВОССТАНОВЛЕНИЕМ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ

Удалова Т.А.^{1,2}, Восмерилов С.В.¹, Григорьева Т.Ф.¹, Девяткина Е.Т.¹, Ляхов Н.З.¹

¹ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, udalova@solid.nsc.ru

²ФГБУН Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, udalova@solid.nsc.ru

Механохимическое восстановление твердых смесей оксидов активным металлом с получением высокодисперсных порошков металлов выгодно отличается короткими временами синтеза и одновременным устранением ряда экологических проблем. В результате

механохимической ОВР формируются композиты $Me/(Me_{\text{акт}})_xO_y$ – смеси порошков высокодисперсных частиц оксида активного металла (MgO) и восстановленных элементов (W, Mo, Nb). Оксид магния, обладая высокой температурой плавления, препятствует спеканию продуктов механической активации, а при взаимодействии композитов W(Mo, Nb)/MgO с растворами соляной или серной кислот MgO переходит в хорошо растворимые соединения.

Синтез нано-дисперсных W, Mo, Nb возможен восстановлением таких сложных оксидов как $MgWO_4$, $MgMoO_4$ и $MgNb_2O_6$, которые, как правило, получают длительным спеканием оксида магния и оксидов соответствующих металлов (~10–24 час) при $T \approx 1173K$. Вольфраматы и молибдаты магния представляют интерес в различных областях применения, таких как люминофоры, детекторы ионизирующих излучений или оптоэлектронные устройства. Ниобат магния ($MgNb_2O_6$) со структурой колумбита характеризуется высокими диэлектрическими свойствами в СВЧ-диапазоне, обладает высоким значением электрической добротности.

Мы предлагаем механохимический метод синтеза вольфрамит магния, молибдата магния и ниобата магния активацией смесей MgO с $WO_3(MoO_3, Nb_2O_5)$. Методом рентгенофазового анализа (РФА) показано, что для образования $MgWO_4$, $MgMoO_4$ и $MgNb_2O_6$ достаточно 8 мин активации соответствующих оксидов (при строгой стехиометрии 1:1 и скорости вращения барабанов в высокоэнергетической планетарной мельнице 1000 об/мин). Дифрактограммы образцов, синтезированных в таких условиях методом механохимической активации, хорошо согласуются с литературными данными (PDF-2: [27-789], [21-961], [33-875]).

Полученные вольфрамит-, молибдат- и ниобат магния, были использованы для механохимического восстановления магнием. Из результатов рентгенофазового анализа продуктов механохимического восстановления $MgWO_4$, $MgMoO_4$ и $MgNb_2O_6$ магнием, определены оптимальные условия проведения механической активации и стехиометрические составы смесей ($MgMexOy + Mg$). Показано, что при скорости вращения барабанов вокруг общей оси 1000 об/мин механохимические ОВР завершаются с формированием композитов W(Mo, Nb)/MgO за время активации 8 мин. Определены необходимые условия отделения высокодисперсных W, Mo, Nb из соответствующих механохимических композитов от оксида магния последовательной обработкой композитов растворами соляной или серной кислот с последующей промывкой дистиллированной водой и ацетоном.

Размеры частиц порошков W, Mo и Nb, отделенных из композитов W(Mo, Nb)/MgO механохимического восстановления соответствующих сложных оксидов от побочных продуктов, определенные методом сканирующей электронной микроскопии, составили от ~ 0,01 до 0,2мкм.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект №. АААА-А17-117030310277-6).

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ОКСИДЫ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ С ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Александрова Г.П.¹, Сапожников А.Н.², Сухов Б.Г.¹

¹*Иркутский институт химии СО РАН, Иркутск*

²*Иркутский институт геохимии СО РАН, Иркутск*

alexa@irioch.irk.ru

Создание оптически активных наночастиц является быстро развивающейся областью исследований, которая занимается синтезом и оптической характеристикой наночастиц металлов, в том числе и переходных, различного размера, формы и структуры. Последние достижения в разработке, экспериментальной реализации и техническом применении таких наноструктур основаны на сочетании надежных методов синтеза или нанотехнологий со стабилизацией поверхности с помощью полимерных матриц. Наноконпозиты отдельных оксидов переходных металлов обладают ярко выраженными оптическими свойствами и могут найти применение в новейших оптических устройствах.

Целью данной работы является создание наноструктурированных композитов с наночастицами оксидов кобальта и никеля и исследование их оптических характеристик.

Разработанная нами методология синтеза была реализована при поиске и оптимизации экспериментальных условий создания многофункциональных порошкообразных наноконпозитов [1, 2] с металлоксидными наночастицами кобальта и никеля. Большую серию наноконпозитов CoO/ПС и NiO/ПС синтезировали методом водного щелочного гидролиза солей исходных металлов кобальта и никеля в присутствии природного полисахарида и переводом их в порошкообразное состояние путем высаживания в алифатический спирт. Концентрация оксидов в наноконпозитах определена с помощью РЭДСМА и варьировалась в интервале 0.6-7.4%. Изучение морфологии поверхности полученных порошкообразных наноконпозитов показало, что наиболее типичной микроструктурой изучаемых объектов, окрашенных в бежево-голубой и бежево-зеленый цвет, являются достаточно однородные по размерам гранулы с размерами 1-100 мкм.

Комплексом современных физико-химических методов охарактеризован состав и структура созданных наноматериалов. Методом рентгенофазового анализа было установлено, что конпозиты имеют

кристаллическое ядро, состоящее из наночастиц оксидов кобальта или никеля, размеры которых варьируют в весьма узком интервале 5-25 нм. В ИК-спектрах композитов зафиксированы сигналы, характеризующие органическую матрицу ПС, и величины характеристических частот колебаний связей O-Co и O-Ni. Удельная рефракция R_x нанокompозитов составила 1.472 для NiO/ПС и 1.436 для CoO/ПС и оказалась ниже, чем у исходной матрицы. Молекулярная рефракция MR_q изучаемых нанокompозитов изменялась от 61720 до 62960. Рассчитанная поляризуемость α нанокompозитов оксидов кобальта и никеля варьируется в интервале $2.498 \cdot 10^{-20}$ - $2.449 \cdot 10^{-20}$ см³ и снижается по сравнению с исходной полисахаридной матрицей вследствие взаимодействия некоторой части многочисленных полярных гидроксильных групп матрицы с поверхностью наночастиц для их стабилизации.

Таким образом, получены нанокompозиты с наночастицами оксидов кобальта и никеля в полимерной матрице и определены их удельная и молекулярная рефракция. Показано, что оптические свойства нанокompозитов являются адекватным откликом их внутренней структуры. Новые нанобиокompозиты могут найти широкое применение в качестве многофункциональных оптических материалов.

1. Aleksandrova G.P., Grishchenko L.A., Bogomyakov A.S., Sukhov B.G., Ovcharenko V.I., Trofimov B.A., Magnetic activity of nanostructured biopolymeric nanomagnets. //Russ. Chem. Bull., 2010, 59. № 12. P. 2318-2322.

2. Aleksandrova G.P., Grishchenko L.A., Kozhevnikov V.M., Klimenkov I.V., Sukhov B.G., Trofimov B.A., Structure and magnetic properties of new encapsulated nanomagnet. //Nanotechnics, 2008, 3. № 15. P. 11-15.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ФОТОННО-ПЛАЗМОННЫЕ ПЛЕНКИ СО СТРУКТУРОЙ ИНВЕРТИРОВАННОГО ОПАЛА КАК НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ГКР

Ашуров М.С.¹, Еремина Е.А.^{1,2}, Абдусаторов Б.А.³, Климонский С.О.^{1,2}

¹Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва,

²Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

³Сколковский институт науки и технологий, Москва

ashurov@inorg.chem.msu.ru, klim@inorg.chem.msu.ru

Гигантское комбинационное рассеяние (ГКР) как быстрый, чувствительный и неразрушающий метод обнаружения молекул и ионов привлекло большое внимание в области химии и биологии. Как обуславливающий ГКР агент, наночастицы благородных металлов широко изучаются и применяются в химическом детектировании [1], при этом

актуальной задачей является получение подложек с высокой селективностью и стабильностью ГКР-сигнала по всей площади. С этой целью изготавливаются различные композитные подложки из полупроводниковых и полимерных матриц с периодически расположенными порами, содержащими благородные металлы [2, 3]. С другой стороны, многие работы были посвящены применению инвертированных опалов в качестве матриц для дальнейшего расположения плазмонных наночастиц, не учитывая их фотонно-кристаллические свойства. Исходя из этого, нами были поставлены следующие задачи: получить макропористые пленки со структурой инвертированного опала, имеющие в порах наночастицы золота; изучить оптические свойства полученных образцов и их применение в качестве ГКР подложек для детектирования органических красителей с малыми концентрациями. В ходе исследований был выявлен синергетический эффект, связанный с фотонной стоп-зонай инвертированного фотонного кристалла (ФК) из триметилпропан этоксилат триакрилата (ЕТРТА) и плазмонным резонансом от наночастиц золота.

Инвертированные ФК из фоторезиста ЕТРТА были получены темплатным методом, где в качестве темплата выступал ФК опалового типа на основе плотноупакованных микрочастиц SiO_2 . Сферические микрочастицы SiO_2 с разным диаметром синтезировали по методике, описанной в работе [4]. Наночастицы золота с размером <20 нм синтезировали методом Туркеевича [5]. Максимум пика поглощения коллоидного раствора золота находился на длине волны $\lambda = 520$ нм, соответствовавшей размеру частиц около 15 нм. Далее инвертированные ФК из ЕТРТА, имевшие различное спектральное положение фотонной стоп-зоны, многократно (до 30 раз) пропитывали коллоидным раствором золота. Количество введенного золота в ФК матрицу контролировали с помощью спектров пропускания композитной пленки. ГКР изучали на органическом красителе (метиленовый синий), который дополнительно вводили в полученные композитные пленки путем их пропитки растворами с разной концентрацией красителя (от 10^{-6} до 10^{-3} М). Полученные результаты показали, что на итоговый сигнал ГКР влияет не только количество введенного в матрицу ФК золота, но и положение фотонной стоп-зоны инвертированного ФК. Было обнаружено, что сигнал ГКР стабилен по всей площади композитных пленок, что свидетельствует о равномерном распределении наночастиц золота в ФК матрице.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-33-90266.

Список литературы:

1. M. Fleischmann, P.J. Hendra, A. McQuillan // J. Chem. Phys. Lett. // 1974, 26, 163.
2. D. Qi, L. Lu, L. Wang and J. Zhang // J. Am. Chem. Soc. // 2014, 136, 9886.
3. D. Yan et al. // Materials and Design // 2019, 165, 107601.
4. С.О. Климонский, Т. Бахия, А.В. Кнотько, А.В. Лукашин // Доклады АН // 2014, 457, 50.
5. J. Turkevich et al. // Discussions Faraday Soc. // 1951, 11, 55.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ ГЕКСАЦИАНОФЕРРАТЫ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ АСИММЕТРИЧНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

Кречетов И.С.¹, Берестов В.В.², Астахов М.В.

ФГАОУВО НИТУ «МИСиС», Москва

¹ilya.krechetov@misis.ru, ²vberestov97@gmail.com

Электрохимические суперконденсаторы (СК) – устройства для накопления электрического заряда, характеризующиеся сочетанием высоких плотностей мощности и запасаемой энергии со стабильностью параметров при длительном ресурсе. Наибольшую плотность энергии обеспечивают СК, функционирующие на основе псевдоёмкости. Однако высокая стоимость используемых для них материалов (например RuO_2) ограничивает широту их применения. Поэтому важной задачей является поиск недорогих материалов с высокими электрохимическими характеристиками для псевдоёмких электродов СК. Многообещающими с этой точки зрения выглядят гексацианоферраты переходных металлов (МНСФ). Электрохимическое поведение МНСФ является результатом окислительно-восстановительной активности одного или нескольких ионов переходных металлов в кристаллической структуре, которая сопровождается встраиванием катионов щелочного металла в решетку и их удалением из неё с высокой скоростью, что позволяет ожидать более длительного срока службы и высоких скоростей заряда-разряда, по сравнению с электродами из других псевдоёмких материалов. Целью настоящей работы стало получение и исследование псевдоёмких электродных материалов на основе гексацианоферратов (III) никеля (NiHCF), кобальта (CoHCF), а также гибридного гексацианоферрата кобальта и никеля (CoNiHCF) для СК.

Синтезированные методом химического соосаждения взвеси NiHCF , CoHCF и CoNiHCF подвергали ультразвуковой обработке, очищали диализом от побочных продуктов реакции и сушили на воздухе при

комнатной температуре. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) синтезированных взвесей МНCF показала, что они представляют собой агломераты наночастиц размером около 30-50 нм (рис. 1). Кристаллическую структуру и химический состав порошков определяли методами рентгеновского фазового анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии. Затем порошки измельчали и смешивали с ацетиленовой сажей, суспензией фторопласта и графитом в отношении 80:9:9:2 в присутствии этанола до получения однородной массы, из которой прокатывали ленты толщиной около 200 мкм. Электроды из ленты электрохимически характеризовали методами циклической вольтамперометрии (ЦВА) и гальваностатического заряда/разряда (ГЗР) по двух- и трёхэлектродным схемам в электролите на основе водного раствора 1 М KNO_3 . По результатам ЦВА в трёхэлектродной ячейке наибольшую ёмкость показали электроды из CoNiHCF . Удельная ёмкость электродов из CoNiHCF , рассчитанная из результатов ГЗР асимметричной ячейки СК, составленной из исследуемого электрода и электрода из углеродного войлока (УВ), достигает значения 136 Ф/г при плотности тока 0,08 А/г, в то время как ёмкость электродов из УВ при той же плотности тока составляет 83 Ф/г. При проведении ресурсных испытаний электроды с CoNiHCF , как и электроды из УВ показали падение ёмкости менее чем на 10 % после 1000 циклов ГЗР.

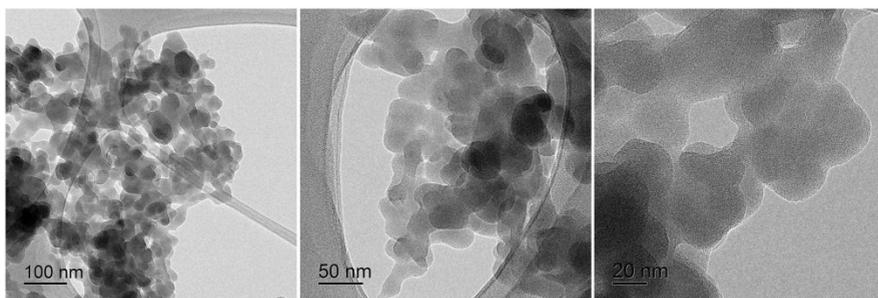


Рисунок 1 – ПЭМ-изображения порошка CoNiHCF при различных увеличениях

**ВЫБОР ДАВЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ В
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАЦИИ НАНОПОРОШКОВ**

Гуцаленко Ю.Г.^{1,2}, Геворкян Э.С.³

¹Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

²НИИЯУ «МИФИ», Москва

³Научно-производственное предприятие «Кермет-У», Харьков, Украина
gutsalenko@kpi.kharkov.ua

Решение задачи энергетически эффективного подавления изначально естественных пор в нанопорошковых композициях как объектах горячего прессования с прямым токоподводом в его зону рассматривается с позиций определенных физических предпосылок.

В работе с электропроводными порошками в области поры наблюдается более высокая температура, так как электрическое сопротивление и, соответственно, интенсивность теплового действия тока увеличиваются. Чем крупнее пора, тем больше температура на пограничной с ней поверхности спекаемой среды и выше кинетическая и химическая активность содержимого поры в химических реакциях с участием материала порошкового консолидата, вызванных высокотемпературным нагревом, в особенности в межграничных локализациях действия электрических разрядов, в том числе со «схлопыванием» пор.

В работе с нетокопроводными порошковыми смесями или связными совокупностями нетокопроводных компонентов порошковой смеси области с преобладанием заряда какого-либо знака, возникающие в электрическом поле, охватывающем консолидат, инициируют на диэлектрических поверхностях заряды другого знака, вследствие чего по этим диэлектрическим поверхностям стелются (скользят) искровые каналы искровых разрядов, в том числе также со «схлопыванием» пор. Это приводит, во-первых, к эффективному электронагреву и уплотнению консолидируемой среды, обусловленному электрическим сопротивлением в зоне электропередачи; во-вторых, – к термическому очищению границ зерен, удельная протяженность которых у наноразмерных порошков возрастает.

Выбор давления горячего прессования в экономически взвешенных решениях структур и параметризации циклограмм по току, температуре и давлению в процессах спекания с прямым действием электрического тока, обеспечивающих получение высокоплотных тонкодисперсных структур повышенной функциональности, осуществляется нами совместным принятием гипотез, во-первых (известна), о соизмеримости размера наибольших свободных объемов (пор) внутренней наноструктуры с

размерами отдельных зерен-кристаллитов; во-вторых (предложена), о распространении на нечеткие геометрические условия в нанопорошках закона Пашена о существовании минимума потенциала зажигания электрических разрядов в данной газовой среде, соответствующего некоторому однозначно определенному постоянству произведения величин давления и разрядного промежутка, с учетом эффекта Пеннинга, состоящего в дополнительном понижении минимумов Пашена в компаундных газовых структурах, в том числе воздушных, с присутствием в них примесей.

В наших экспериментах с горячим прессованием под прямым токоподводом нанопорошков средних зернистостей 25-30 нм ($ZrO_2(Y)$), с развернутой растровым ионно-электронным сканированием (Quanta 200 3D) формулой ($Zr_{0,94}Y_{0,06}O_{1,88}$), 40-70 нм (WC) и 60-80 нм (Al_2O_3) наиболее убедительные результаты в системе «энергозатраты (температура и время спекания) – качество (тонкодисперсность и плотность консолидата)» получены в циклах с начальным давлением горячего прессования 30 МПа для $ZrO_2(Y)$, что соответствует модальной области нормально распределенных размеров зерен исходного порошка, и диапазоном 7,5...25 МПа давлений на первых ступенях цикла подавления пористости в электроконсолидации композитов из равновесной (50/50 мас.%) смеси Al_2O_3 –WC, т.е. с 25% симметричным расширением расчетного диапазона по Пашену-Пеннингу (10...20 МПа), обеспечивающим повышенную надежность формирования оптимальных условий электроразрядного подавления пористости в условиях реальной форморазмерной статистики максимальных пор, в расчетах приближенно описываемых сферической моделью зерна.

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ БРОМИДОМ СЕРЕБРА И МЕДИ

Гирсова М.А., Головина Г.Ф., Куриленко Л.Н., Антропова Т.В.

*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург,
girsovama@yandex.ru*

Известно, что материалы, содержащие кластеры серебра и/или ионы двухвалентной меди, обладают широкополосной люминесценцией в видимом диапазоне спектра. В работе показано, что перспективными материалами такого типа являются термостабильные нанокompозитные материалы (НКМ) на основе высококремнезёмных пористых стекол (ПС-

НФФ со средним диаметром пор 12–15 нм), легированных бромидом серебра и меди. Для получения НКМ использованы ПС-матрицы, которые обладают регулируемой системой пор с разветвленной поверхностью, прозрачностью в оптическом диапазоне; для них характерно модифицирование состава для придания заданных свойств. Преимущества НКМ со спектрально-люминесцентными свойствами по сравнению с известными аналогами (фото-термо-рефрактивные стекла, фотохромные стекла) обусловлены термостойкостью и химической устойчивостью получаемых материалов; энергосберегающими и малозатратными режимами их синтеза. В работе получены медь- и серебросодержащие НКМ (100Ag, 100Ag/10Cu) состава по анализу, мас. %: 0.49–0.52 Na₂O, 0.76–1.11 K₂O, 0.95–1.06 Ag₂O, 0.02 CuO, путем последовательной пропитки ПС-матриц в водных растворах AgNO₃ и (AgNO₃ + Cu(NO₃)₂), а затем в водном растворе KBr с последующей специальной тепловой обработкой импрегнированных матриц для формирования медь- и серебросодержащих активных центров (АЦ). Установлено, что НКМ 100Ag и 100Ag/10Cu обладают сине-зеленой (420–424, 468, 558–560 нм, АЦ – атомарное серебро и нейтральные молекулярные кластеры серебра; 558–560 нм, АЦ – ионы меди), желто-оранжевой (584–588 нм, АЦ – заряженные кластеры серебра: Ag₂⁺, Ag₂²⁺, Ag₃⁺, Ag₃²⁺) и красной (658–660 нм, связана с Ag⁺ центрами) люминесценцией (Рис. 1а). Методом ближней ИК спектроскопии (Рис. 1б) были идентифицированы колебания ¹(ОН, Н₂O); при 4686–4648 см⁻¹ (ν(B–ОН) группы), при 4541–4505, 4437–4431 см⁻¹ (δ(Si–ОН) группы); при 4190–4171 см⁻¹, которые связаны с d–d полосами поглощения Cu²⁺ ионов.

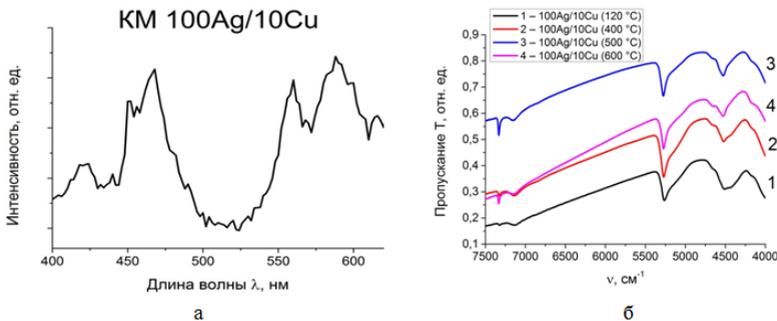


Рисунок 1 – а) Спектр люминесценции НКМ 100Ag/10Cu (120 °C) при $\lambda_{\text{возб}} = 266$ нм, б) ИК спектры пропускания НКМ 100Ag/10Cu в зависимости от температуры тепловой обработки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-03-01206. Образцы двухфазных и пористых стекол изготовлены в рамках госзадания ИХС РАН (тема № 0097-2019-0015).

ВЛИЯНИЕ ЛИГАНДОВ НА КАТИОННЫЙ ОБМЕН АТОМНО-ТОНКИХ НАНОЧАСТИЦ CdSe

Графова В.П., Платонов В.Б., Дорофеев С.Г., Васильев Р.Б.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Lunichkinavp@bk.ru*

Двумерные наночастицы CdSe имеют узкие полосы поглощения и фотолюминесценции, а также высокий квантовый выход, что делает их интересными для ряда оптических и электронных приложений.

В отличие от двумерных наночастиц CdSe, на сегодняшний день не существует прямого метода получения подобных частиц Cu₂Se в коллоидном растворе. Ранее они были получены путем катионного обмена из двумерных наночастиц CdSe, так как катионный обмен является простым и эффективным способом получения новых материалов с возможностью сохранения морфологии. Стоит также отметить, что катионный обмен на наночастицах идет с высокой скоростью, и возможен в том числе и на гетероструктурах. Замещение Cd на Cu обусловлено в высокой разности произведения растворимости для CdSe и Cu₂Se. Материалы на основе Cu₂Se имеют широкое применение в качестве фотоакустических преобразователей, сенсоров и микроэлектронных устройств, а также имеют значительное преимущество перед биосенсорами на основе других материалов. При допировании индием ширина прямой запрещенной зоны Cu₂Se составляет 1,0 эВ, благодаря чему хорошо поглощается свет в солнечных элементах. Последующее создание гетероструктуры с ZnS позволяет увеличить выход фотолюминесценции с 10% до 80%. В работе были синтезированы нанопластины Cu₂Se, а также проведен анализ их кристаллической структуры, морфологии, оптических свойств и элементного состава.

В работе были использованы образцы CdSe, синтезированные высокотемпературным коллоидным методом в неполярном растворителе. Синтез проводился в октадецене при температуре 210-220°C в течение 30 минут. Стабилизация коллоидного раствора осуществлялась введением олеиновой кислотой. Были изучены два типа лигандов – с карбоксильной и тио-группой. Первая серия образцов оставалась с нативным лигандом, а затем переводилась в толуол, далее смешивалась с растворенным в метаноле прекурсором Cu⁺. Полученные наночастицы Cu₂Se выделяли путем осаждения. Во второй серии образцов предварительно путем

межфазного переноса проводилась замена лиганда, а именно олеиновой кислоты на тиогликолевую. Обмен катиона проводился в среде *N*-метилформамида с использованием прекурсора Cu^+ в метаноле. Наночастицы выделялись аналогичным способом.

Полнота проведения катионного обмена исследовалась рентгенофлуоресцентным анализом. Показана зависимость полноты замещения кадмия от типа лиганда. Были установлены предполагаемые брутто-формулы полученных наночастиц Cu_2Se , доля остаточного кадмия в зависимости от условий составила $0,17-8,88 \pm 0,07\%$ атом. для образцов с ОА и $56,14 \pm 0,07\%$ атом. для образцов с ТГА.

Анализ рентгеновской дифракции показал фазу берцелианита Cu_2Se для обеих серий образцов, а также присутствие фазы искаженной цинковой обманки CdSe в образцах с тиогликолевой кислотой.

Методом оптической спектрофотометрии на спектрометре Varian Cary 50 было установлено, что при замене катиона характерные для CdSe полосы экситонных переходов менялись на поглощение краевого характера плазмонного резонанса, в ближней ИК-области наблюдалась полоса плазмонного резонанса. Из полученных данных можно сделать вывод, что примеси кадмия в полученном материале не влияют на оптические свойства Cu_2Se . Были получены данные об увеличении интенсивности плазмонного резонанса при окислении образцов кислородом воздуха.

СЕМИКАРБИДНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАТАХ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Геворкян Э.С.¹, Руцки М.², Гуцаленко Ю.Г.^{3,4}

¹Научно-производственное предприятие «Кермет-У», Харьков, Украина

²Технологический и гуманитарный университет им. Казимира Пулавского,
Радом, Польша

³Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

⁴НИЯУ «МИФИ», Москва
gutsalenko@kpi.kharkov.ua

В исследованиях технологической наследственности конвенциональных технологий спекания порошковых керметов на вольфрамокарбидной основе присутствие полиморфных структур W_2C_x наряду с монокарбидами WC низкотемпературной гексагональной и высокотемпературной кубической, соответственно α и β модификаций, обычно регистрируется на уровне менее 3 мас.%, соответственно с

априорным предвосхищением незначимого влияния этого присутствия на свойства объекта спекания.

Локальные всплески температуры электроразрядной природы в условиях взаимного сдавливания стремящихся к тепловому росту зерен, интенсификации трения по скользящим друг по другу их границам в практикуемых нами технологических решениях с привлечением электроконсолидации прямым пропуском тока открывают "шлюзы" активации разложения WC с выделением фаз W_2C_x . Температурный режим, необходимый для такого разложения, обеспечивает низкотемпературная плазма в зоне локальных электрических разрядов, короткоживущая в скользящих искровых разрядах в переменном электрическом поле на границе газообразной и твердотельной сред между порой и порошковым консолидатом. Высокоскоростной локальный импульсный нагрев по следу канала электрического разряда и быстрое (в силу локальности воздействия) охлаждение способствуют расширенному проявлению полиморфизма W_2C_x , поскольку теплоэнергетическая поддержка термического разложения WC не является достаточно стабильной для заверченного перехода к однородной однофазной семикарбидной структуре.

Повышенное присутствие фаз W_2C_x в продуктах электроконсолидации под давлением с участием порошкового монокарбида WC зафиксировано нами рентгенографически в экспериментах по твердосплавному инструментальному производству на основе стандартных порошковых комбинаций WC-Co, усиленных нанопорошковыми добавками монокарбида WC, и в композитных образцах из нанопорошковых смесей Al_2O_3 -WC. При этом было замечено, что введение нанозеренных добавок WC повышает выход фаз W_2C_x в конечном продукте. Исследованием электроспекания под давлением бимодальных композиций установлена близкая к прямой пропорциональности связь увеличения выхода фаз W_2C_x от прироста суммарной площади границ зерен консолидируемой порошковой смеси. Например, с привнесением в основную рецептуру твердого сплава марки BK8 15 мас. % нанокрбида WC с зернами вводимой добавки на один порядок меньшего размера, чем зерна основного порошка, выход фаз W_2C_x после горячего вакуумного прессования с прямым электронагревом переменным током по рентгенографическим оценкам составил 5-8 мас. % при расчетном ожидании 5-7,5 мас. % в моделировании зерен сферой.

Сокращение энергопотребления в технико-экономически привлекательной скоростной электроконсолидации под давлением вольфрамовых твердых сплавов и композитов из нанопорошков сочетается с их повышенной функциональностью при рациональной организации

исходных порошковых композиций, например, бимодальной, и цикла спекания с получением высокоплотных тонкодисперсных структур. В результате эффект сдерживания размерности зерен в более коротком и при более низком уровне среднеобъемных максимальных температур нагрева термическом цикле по своему вкладу в результирующую технологическую наследственность электроконсолидата превосходит последствия экспансии самостоятельно менее прочных побочных фаз W_2C_x .

**ОСОБЕННОСТИ АТОМНОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КЛАСТЕРОВ (CoFeB) В МНОГОСЛОЙНЫХ АМОΡФНЫХ
НАНОСТРУКТУРАХ [(CoFeB)₆₀C₄₀/SiO₂]₂₀₀ И [(CoFeB)₃₄(SiO₂)₆₆/C]₄₆
ПО ДАННЫМ XPS, XANES И EXAFS**

Домашевская Э.П.¹, Буйлов Н.С.¹, Гуда А.А.², Тригуб А.Л.³,
Чукавин А.И.⁴, Ситников А.С.⁵

¹*Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1,
Воронеж, fit@phys.vsu.ru*

²*Научно-исследовательский институт интеллектуальных материалов,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

³*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Москва*

⁴*Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск*

⁵*Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

На основе анализа рентгеноэлектронных спектров XPS и спектров рентгеновского поглощения XANES и EXAFS в двух многослойных аморфных наноструктурах (МНС) [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₆₀C₄₀/SiO₂]₂₀₀ и [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆/C]₄₆ с одинаковым элементным составом, но инверсным расположением неметаллических фаз С и SiO₂ в металл-композитных слоях или прослойках, установлено, что в металл-композитных слоях преобладают химические связи на межфазных границах между металлическими кластерами CoFeB и элементами окружающей матрицы. В углеродной матрице кластеры образуют преимущественно карбидные связи, а в оксидно-кремниевой матрице - преимущественно оксидные связи. Результаты моделирования спектров EXAFS показали, что в МНС [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₆₀C₄₀/SiO₂]₂₀₀ атомы кластеров Fe и Co имеют близкие координационные числа КЧ (6.73 и 7.68) и Me-Me расстояния, сопоставимые с соответствующими значениями кристаллической решетки ОЦК α-Fe.

Тогда как в МНС [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆/C]₄₆ КЧ Co (6.71) остается близким к предыдущей МНС, а число атомов в ближайшем окружении у

атомов Fe (3.37) ближе к соединениям железа с кислородом, источником которого является матрица SiO₂ металл-композитных слоев этой МНС.

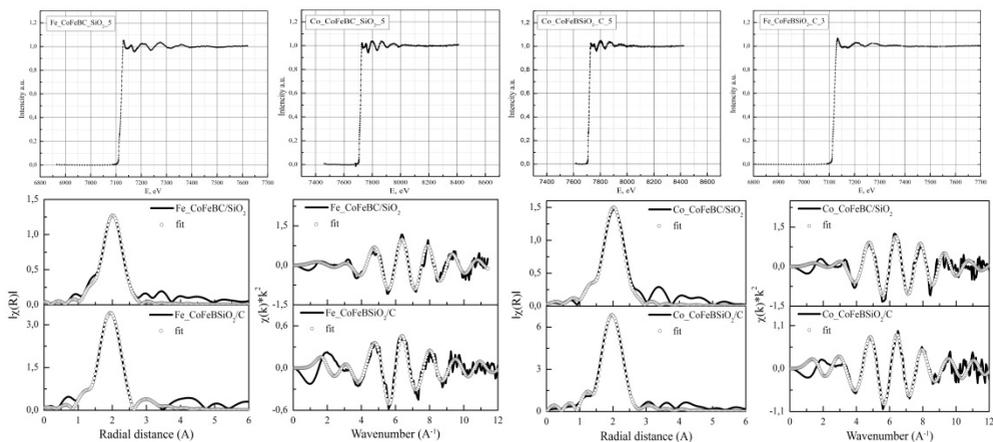


Рисунок 1 – EXAFS спектры К–краев поглощения железа Fe и кобальта Co в двух МНС и подгонка преобразований Фурье экспериментальных (сплошные кривые) и теоретических сигналов (точки) спектров EXAFS за К–краями поглощения железа Fe и кобальта Co в двух МНС в г–координатах и в к–координатах для определения КЧ и Ме–Ме расстояний.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ НА СТРУКТУРУ ПЛЕНОК CdS

Иванова О.П.¹, Криничная Е.П.¹, Кривандин .А.В.¹, Завьялов С.А.²,
Журавлева Т.С.¹

¹ФГБУН Институт биохимической физики им.Н.М.Эмануэля РАН, Москва

²ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва

olga@deom.chph.ras.ru

Методом рентгеновской дифракции в больших углах при комнатной температуре проведены исследования структуры тонких пленок CdS разной толщины $d \leq 0.2$, < 1 мкм и $d \geq 1$ мкм. Пленки получены методом твердофазного криохимического синтеза на подложках из оптического кварца ($d \leq 0.2$ мкм) и кремния ($d < 1$ мкм, $d \geq 1$ мкм). Дифрактограммы пленок разной толщины заметно отличаются друг от друга, что указывает на образование в них разных структур CdS. Для пленки толщиной $d \leq 0.2$ мкм на дифрактограмме наблюдаются достаточно узкие, хорошо разрешенные пики разной интенсивности при углах $2\theta \approx 24.96^\circ$, 26.45° , 27.89° , 36.83° , 43.7° , 47.75° и 51.7° , на дифрактограмме пленки толщиной

$d \sim 1$ мкм - два широких пика при $2\theta \approx 27.83^\circ$ и 47.69° , а для пленки толщиной $d > 1$ мкм - три достаточно широких пика при $2\theta \approx 26.2^\circ$, 43.6 и 51.3° . Максимальные интенсивности пиков зарегистрированы при углах $2\theta \approx 26.45^\circ$, $2\theta \approx 27.83^\circ$ и $2\theta \approx 26.2^\circ$ в пленках толщиной $d \leq 0.2$, < 1 и ≥ 1 мкм, соответственно. Формирование различных структур CdS, по-видимому, обусловлено изменениями размеров образующихся наночастиц в пленках разной толщины.

Для объяснения полученных результатов был проведен анализ литературных данных. Известно, что крупнокристаллический сульфид кадмия в обычном состоянии имеет кристаллические структуры гексагонального вюрцита или кубического сфалерита с характерными дифракционными пиками, для которых свойственна периодичность в последовательности слоев упаковки. Согласно работе [1] переход сульфида кадмия из крупнокристаллического в наносостояние приводит к структурным изменениям - образуется специфическая разупорядоченная структура со случайным чередованием плотноупакованных атомных плоскостей - СПУ-структура с характерными положениями рефлексов. Также в [1] выявлена корреляция между структурой и размерами наночастиц: частицы CdS размером $2R \sim 2$ нм имеют аморфную структуру, при размерах $3 < 2R < 9$ нм — СПУ-структуру, а при $2R > 9$ нм - гексагональную структуру вюрцита, свойственную крупнокристаллическому сульфиду кадмия. Из проведенных исследований следует, что формирование структур в пленках CdS определяется размером образующихся наночастиц и толщиной пленок. Так в пленках CdS толщиной $d \leq 0.2$ мкм наблюдается структура вюрцита с размером наночастиц $2R > 9$ нм, в пленках $d < 1$ мкм - аморфная структура с $2R \sim 2$ нм, а в пленках $d \geq 1$ мкм - СПУ-структура с размером наночастиц $3 < 2R < 9$ нм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-03-00582) в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№01201253312).

Литература:

1. Кожевникова Н.С., Ворох А.С., Урицкая А.А. Наночастицы сульфида кадмия, полученные методом химического осаждения из растворов. // Успехи Химии. 2015. Т. 84. № 3. С. 225-250.

ПРИРОДА ВЫСОКОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ КВАЗИАМОРФНОГО СПЛАВА $Fe_{78}P_{20}Si_2$

Канныкин С.В.¹, Ильинова Т.Н.²

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н.

Бурденко, Воронеж

svkannykin@gmail.com

Цель работы – обоснование высокой локальной пластичности квазиаморфного металлического сплава $Fe_{78}P_{20}Si_2$.

Методом динамического наноиндентирования (НИ) установлено, что в «аморфном» и кристаллизованном состоянии механические характеристики сплава практически не отличаются (рис. 1а).

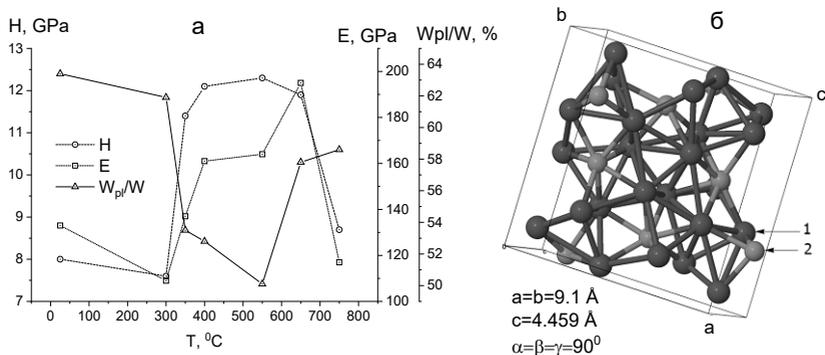


Рисунок 1 – Зависимость твердости, модуля упругости и доли пластической деформации от температуры термообработки (а), элементарная ячейка фазы Fe_3P (б) (1-Fe, 2-P)

Исходя из существенного различия скоростей охлаждения при создании «аморфных» сплавов и скорости элементарных процессов в твердых телах, сделано предположение о том, что сплав может состоять из предельно малоразмерных кластеров-зародышей кристаллических фаз данного состава.

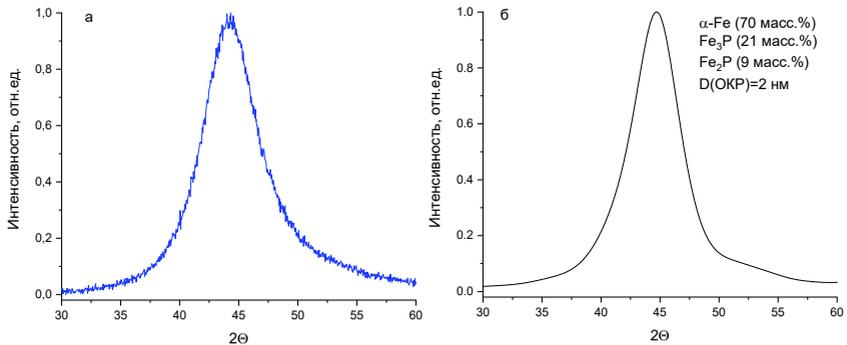


Рисунок 2 – Экспериментальная (а) и модельная (б) диффрактограмма сплава $\text{Fe}_{78}\text{P}_{20}\text{Si}_2$.

Сопоставление диффрактограмм сплава $\text{Fe}_{78}\text{P}_{20}\text{Si}_2$ (экспериментальной (а) и модельной (б), построенной по методу Ритвельда с учетом размерного эффекта) показало, что подобные сплавы можно рассматривать как один из вариантов предельного наноструктурирования кристаллических веществ.

Ввиду невозможности дислокационного механизма пластической деформации как в «аморфном», так и в кристаллизованном сплаве (вследствие низкой трансляционной симметрии (рис.1б)) сформулирован вывод о механизме пластической деформации при действии сосредоточенной нагрузки (НИ): межкластерное проскальзывание как аналог межнанозеренного проскальзывания (отрицательный эффект Холла-Петча).

ДРОБЛЕНИЕ И УПЛОТНЕНИЕ ЗЕРЕН MgB_2 КЕРНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

Михайлов Б.П.¹, Михайлова А.Б.¹, Никулин В.Я.², Силин П.В.²,
Боровицкая И.В.¹

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

²Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

borismix@yandex.ru

Аннотация:

В докладе представлена методика дробления и уплотнения зерен сверхпроводящего соединения MgB_2 в металлической оболочке под действием ударных волн. Для генерации ударных волн использована установка типа плазменный фокус. При этом установлено повышение плотности керамики и критического тока MgB_2 лент. Методами РФА и

электронной микроскопии выполнены исследования фазового состава, размеров блоков ОКР, изучена микроструктура сверхпроводящего порошка MgB_2 до и после обработки. Показано, что после воздействия, в зависимости от выбранного режима нанесения ударов, может происходить заметное измельчение кристаллитов, в том числе с образованием аморфной фазы.

Результаты экспериментов:

На рис.1. представлена микроструктура поперечного сечения MgB_2 зерна в исходном состоянии (а) и после ударно-волновой обработки (б). При сравнении указанных микроструктур заметна значительная разница. Видно, что в исходном состоянии порошок менее плотный, большое количество отдельных чешуек и пор. После обработки можно наблюдать образование уплотненной керамики, состоящей из более мелких зерен сцепленных и спрессованных друг с другом и образующих более однородный материал с меньшей пористостью.

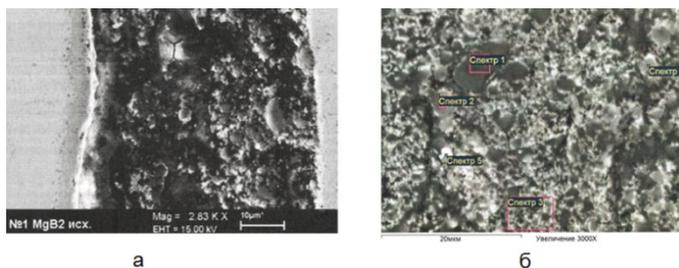


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения MgB_2 зерна в исходном состоянии (а) и после плазменной обработки (б).

Выводы:

- 1.Использование ударно -волнового воздействия позволяет одновременно уплотнить и измельчить зерна сверхпроводящего соединения MgB_2 вплоть до образование ультрадисперсных частиц.
- 2.При использовании различных режимов обработки структура сверхпроводящего зерна может изменяться, в том числе с образованием различных дефектов и микродеформаций, служащих дополнительными центрами пиннинга магнитных вихрей.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 16-12-10351 в части обработки образцов на установке Плазменный фокус и в рамках Госзадания № 075-00947-20-00 в части проведения структурных исследований.

**ВЫСОКОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ
ЛЕГИРОВАННОГО МЕДЬЮ КВАЗИДВУМЕРНЫХ
НАНОЧАСТИЦ CdSe ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ БЕЛОГО СВЕТА**

Саиджонов Б.М.¹, Зайцев В.Б.², Васильев Р.Б.¹⁻³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет наук о материалах, Москва

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Москва

bedil_saidjonov@mail.ru, romvas@inorg.chem.msu.ru

Коллоидные квазидвумерные наночастицы халькогенидов кадмия являются новыми представителями полупроводниковых нанокристаллов. Благодаря атомно-гладким поверхностям и толщинам в пределе 1 нм, квазидвумерные наночастицы халькогенидов кадмия характеризуются большим сечением поглощения и гигантской силой осциллятора переходов, что делает их привлекательным для получения светоизлучающих материалов и лазеров. В последнее время исследователи все больше внимание уделяют прямой генерации белого света с применением однофазных полупроводниковых наночастиц в связи с возможностью подавление эффекта самопоглощения излучения. В данной работе исследован потенциал однофазных и легированных медью квазидвумерных наночастиц CdSe для генерации белого света.

Квазидвумерные наночастицы CdSe были получены коллоидным методом синтеза. Определены условия роста однофазных квазидвумерных наночастиц CdSe, состоящих из 2.5, 3.5 и 4.5 молекулярных монослоев. Исследована зависимость люминесцентных и фотометрических свойств от условий синтеза. Установлено, что наночастицы CdSe, полученные при температурах синтеза <200°C, излучают белый свет благодаря сочетанию полос экситонного и дефектного испускания.

Показана возможность гибкого варьирования люминесцентных и фотометрических параметров образцов изменением условий синтеза.

Квантовый выход фотолюминесценции тонких популяций квазидвумерных наночастиц CdSe был ниже 10%, что ограничивает их приложение в качестве источника белого света. Для повышения квантового выхода фотолюминесценции и полного устранения самопоглощения, ультратонкая популяция квазидвумерных наночастиц CdSe была легирована медью. Показано, что варьированием концентрации меди, экситонная полоса эмиссии может быть полностью подавлена (Рис.1). Квантовый выход фотолюминесценции легированных наночастиц определяется концентрацией меди и достигает значения до 95%[1]. На основе однофазных и легированных медью квазидвумерных наночастиц CdSe были получены прототипы светодиодов белого свечения.

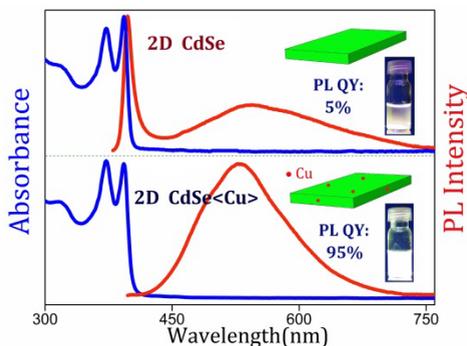


Рисунок 1 – Спектры оптического поглощения и испускания однофазных и легированных медью ультратонких квазидвумерных наночастиц CdSe.

1. B.M. Saidzhonov, V.B. Zaytsev, M. V Berekchiian, R.B. Vasiliev, Highly luminescent copper-doped ultrathin CdSe nanoplatelets for white-light generation // J. Lumin. 2020, 222, p. 117134.

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ЖЕЛЕЗА И УГЛЕРОДА

Старчиков С.С.¹, Баскаков А.О.¹, Любутин И.С.¹, Фролов К.В.¹,
Фунтов К.О.¹, Давыдов В.А.²

¹ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва

²Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Троицк,
Москва, sergey.s.starchikov@gmail.com

В последнее время большой интерес проявляется к наночастицам типа ядро-оболочка на основе соединений железа, инкапсулированные в углеродные оболочки.[1,2] Такие структуры обладают уникальными магнитными и электронными свойствами, а также высокой термической, химической и механической устойчивостью, что позволяет использовать для многих прикладных задач. Очень часто в качестве ядра нанокompозита предполагается использовать наночастицы оксидов железа, т.к. они достаточно хорошо изучены и просты в получении. Однако, вектор современных исследований наноматериалов для биомедицины постепенно смещается в сторону наночастиц карбидов железа, таких как Fe_7C_3 и Fe_3C , инкапсулированных в углеродные оболочки ($Fe_7C_3@C$, $Fe_3C@C$). Их рассматривают как наиболее перспективные на роль базовых магнитоуправляемых платформ для биомедицинских нанокompлексов широкого назначения [3, 4].

В недавней работе [2] нашей группой был установлен новый механизм трансформации ферроцена $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ при воздействии высокого давления 8 ГПа и высоких температур с образованием нанокompозитов карбидов железа $\text{Fe}_7\text{C}_3@\text{C}$ и $\text{Fe}_3\text{C}@\text{C}$ типа ядро-оболочка. Исследование кинетики данного механизма трансформации ферроцена до сих пор является открытым вопросом. Данная работа посвящена изучению фазового состава и свойств нанокompозитов карбидов железа, полученных при различных режимах обработки ферроцена при высоких давлениях и температурах.

Для изучения свойств полученных нанокompозитов использован комплекс методов, таких как порошковая рентгеновская дифракция, рамановская спектроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, электронная дифракция, элементный анализ и мёссбауэровская спектроскопия в широком диапазоне температур. Установлено, что при различном времени выдержки ферроцена образуются наночастицы карбидов железа типа ядро-оболочка состава $\text{Fe}_7\text{C}_3@\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{C}@\text{C}$ и аморфного пересыщенного углеродом карбида железа. Показано, что с увеличением времени выдержки средний размер частиц растет и при наибольшем времени выдержки доминирует фаза карбида Fe_3C .

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-00095) в части анализа порошковых рентгенограмм, мёссбауэровских и рамановских экспериментов и обработке результатов, и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части просвечивающей электронной микроскопии.

Литература:

- [1] Yu G., Sun B., Pei Y. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2010. V. 132. P. 935.
- [2] Baskakov A. O. et al. // Inorganic chemistry. 2018. V. 57. №. 23. P. 14895-14903.
- [3] Davydov V., Rakhmanina A., Kireev I. et al. // J. Mater. Chem. B. 2014. V. 2. P. 4250.
- [4] Alieva I., Kireev I., Rakhmanina A. et al. // Nanosyst. Physics. Chem. Math. 2016. V. 7. P. 158.

СЕКЦИЯ 5

***Инновационные применения
нанотехнологий и развитие методов
аттестации наноматериалов***

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОД-СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕРЕН МАГНИТОВ Nd-Fe-B

Кольчугина Н.Б.¹, Бурханов Г.С.¹, Скотникова К.², Прокофьев П.А.^{1,3},
Дормидонтов Н.А.¹, Сеган Т.², Курса М.², Юрица Я.², Бакулина А.С.¹,
Русинов Д.А.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, nkolchugina@imet.ac.ru*

²*Vysoka Skola Banska-Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, Katerina.Skotnicova@vsb.cz*

³*АО «Спецмагнит», Москва, pav3387@yandex.ru*

Ориентация современных технологий производства постоянных магнитов Nd-Fe-B на создание гетерогенного распределения тяжелых редкоземельных металлов (РЗМ) в зерне основной магнитной фазы связана с возможностью повышения функциональных характеристик магнитов при одновременной экономии дорогостоящих тяжелых РЗМ, мировые ресурсы которых ограничены. Разработка таких технологий связана с развитием научных основ процессов предлагаемых новых технологических операций, составляющих данные технологии. Последовательность технологических операций используемых нами для получения постоянных магнитов на основе системы Nd-Fe-B включает обработку сплава по методу стрип-кастинг, водородное охрупчивание сплава и обработку в среде водорода компонентов порошковой бинарной смеси, а также высокоэнергетический помол смеси в комбинации с механическим легированием сплава тяжелым РЗМ.

Исследована роль легирующих добавок РЗМ и их сплавов с переходными металлами в формировании фазового состава, микроструктуры и тонкой структуры зерен основной магнитной фазы на основе соединения Nd₂Fe₁₄B. Эти добавки вводились в сплав на стадии помола и механической активации в форме гидридов и гидрированных соединений TbH_x, DyH_x, ScH_x, Tb₃(Co,Cu)H_x, Dy₃(Co,Cu)H_x. В процессе спекания заготовок магнитов указанные добавки разлагались с образованием смеси тонких порошков РЗМ и Co-Cu и диффундировали в зерно основной магнитной фазы (зернограничная диффузия РЗМ и Co) и оставались в составе границ зерен (Cu и Sc - зернограничное структурирование). Получены новые данные о формировании

наногетерогенного (по распределению тяжелых РЗМ в пределах зерна) структурного состояния фазы $(NdR')_2Fe_{14}B$ ($R' = Tb, Dy, Ho, Pr$). Структура зерна, сформированная таким способом и состоящая из ядра (обедненного тяжелым РЗМ) и оболочки (обогащенной тяжелым РЗМ)», и наноразмерная композиционная неоднородность основной магнитной фазы приводят к увеличению структурно чувствительных магнитных параметров и к их повышенной стабильности в процессе низкотемпературного отжига. Такое специфическое распределение редкоземельных компонентов позволяет нам предположить реализацию механизма пиннинга доменных стенок наряду с механизмом задержки образования обратных доменов. Нами показано эффективное повышение коэрцитивной силы постоянных магнитов при небольшом снижении остаточной намагниченности, что свидетельствует в пользу существования предполагаемого механизма процессов перемагничивания.

Положительный эффект от использования водород-содержащих добавок показывает возможность введения компонентов магнитотвердого материала (тяжелых РЗМ и элементов, структурирующих границы зерен и ограничивающих их рост) на стадии помола порошков, а не на стадии выплавки сплава на основе системы Nd-Fe-B, что определяют получение как высококоэрцитивных так и высокоэнергетических магнитов из единого исходного сплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Соглашение № 14.616.21.0093 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0093) и Министерства образования, молодежи и спорта Чешской Республики, проект № LТARF18031.

Приглашенный доклад

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОВОЛОКОН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Платонов В.Б., Владимирова С.А., Румянцева М.Н., Гаськов А.М.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,
gaskov@inorg.chem.msu.ru*

Исследованы состав, микроструктура, электрофизические и сенсорные свойства гетероструктур на основе нановолокон оксида цинка ZnO/M^2O : ZnO/SnO_2 , ZnO/In_2O_3 , ZnO/Ga_2O_3 , ZnO/Co_3O_4 , ZnO/Fe_2O_3 , ZnO/NiO , полученных методом совместного электроформирования (electrospinning) с последующим отжигом при температуре 550°C.

Фазовый состав, элементный состав, диаметр и длина нановолокон и размер областей когерентного рассеяния (ОКР) определены комплексом методов: растровой электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Во всех случаях после отжига при температуре 550°C получены двухфазные материалы на основе простых и сложных оксидов. Морфология нановолокон ZnO зависит от концентрации прекурсора в полимерном растворе, увеличение концентрации прекурсора приводит к уменьшению размеров зерен и увеличению диаметра волокон. Природа второго компонента M²O существенно влияет на морфологию волокон оксида цинка, введение прекурсоров индия, кобальта и никеля приводит к формированию полых трубок диаметром 50-80 нм. Нановолокна образуют поликристаллические высокопористые системы с бимодальным распределением пор и широкими возможностями для диффузии молекул газов.

Сенсорные свойства гетероструктур определены на микроэлектронных чипах с платиновыми контактами и нагревателем в зависимости от состава газовой фазы и температуры 25-450 °C. Газовые смеси с контролируемым содержанием детектируемых газов CO (20 ppm), H₂ (200 ppm), NH₃ (20 ppm), H₂S (2 ppm) и NO₂ (1 ppm) получали смешением чистого воздуха и аттестованных газовых смесей в условиях контроля относительной влажности RH₂₅ = 0%, 30%, 60%. Толстые пленки на основе нановолокон получены нанесением пасты на подложки Al₂O₃ с последующим отжигом при 450°C для удаления связующего. Измерения проведены в проточной ячейке с использованием электронного контроллера температуры сенсоров и регистрации DC-электропроводности при постоянном напряжении 1.0 В. Сенсорные параметры: чувствительность, селективность, время отклика и возврата в исходное состояние зависят от состава материалов, которые по своим электрофизическим характеристикам можно разбить на 2 группы *n-n* и *n-p* гетероструктуры. Формирование сенсорных материалов на основе нановолокон ZnO и M²O *p*-типа проводимости приводит к снижению температуры максимального сенсорного сигнала. При детектировании газов восстановителей CO, H₂, NH₃, H₂S увеличение сенсорного сигнала (S) коррелирует с уменьшением энергии связи хемосорбированного кислорода на поверхности оксида: S(Co₃O₄) > S(NiO) > S(In₂O₃) > S(SnO₂) > S(ZnO) > S(Ga₂O₃) > S(Fe₂O₃).

Полученные результаты: условия синтеза нановолокон индивидуальных оксидов и гетероструктур на их основе, адсорбционные, электрофизические и сенсорные свойства материалов могут представлять

практический интерес для разработки газовых сенсоров для мониторинга окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-03-00091.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ БРОНЗОВОГО КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Рааб Г.И.², Аксенов Д.А.^{1,2}, Рааб А.Г.², М. Янечек³

¹*Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение ФГБНУ УФИЦ РАН, Уфа*

²*Институт физики перспективных материалов при УГАТУ, Уфа
3Карлов университет, Прага, Чехия*

a.r.n@list.ru

При создании надежных, с эксплуатационной точки зрения, современных высокоскоростных (ВС) электрифицированных дорог особого внимания заслуживают свойства контактной пары провод-токосъемник. В условиях возросших скоростей и пусковых токов, а также дополнительных нагрузок на провода от увеличенных в 3-4 раза сил натяжения необходимо обеспечивать высокую надежность контактных условий [1-3]. Одним из направлений этих работ является совершенствование физико-механических свойств контактного провода за счет создания научно и технически обоснованных условий ТМО, что и было предметом исследования в данной работе. В этой связи был разработан новый комбинированный процесс формообразования контактного провода методами изгиба и равноканального углового прессования по схеме Конформ, который исследовали, используя виртуальные и физические методы изучения. В качестве материала для исследований использован низколегированный медный сплав Cu-0,5Zr. Исходная заготовка прошла предварительную термомеханическую обработку, включая термическую обработку на твердый раствор и деформационную обработку непрерывным свободным изгибом. Виртуальные исследования проведены методом конечно-элементного компьютерного моделирования деформационной обработки с использованием программного комплекса Deform 3D. Начальная температура при моделировании принята 300 °С и установлена скорость вращения рабочего колеса 10 об/мин. Показано, что в процессе РКУП-Конформ с формообразованием провода в периферийной области очага деформации происходит деформационный разогрев до температуры более

чем 500 °С. Установлено, что в процессе деформации преобладают сжимающие напряжения, что, как правило, положительно влияет на качество получаемого изделия. Степень накопленной деформации при этом достигает $\epsilon \sim 5$. Проведены верификационные исследования с использованием экструдера РКУП-Конформ и получены экспериментальные длинномерные образцы контактного провода.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.586.21.0059 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0059).

Список литературы:

1. Y. Song, Z. Liu, F. Duan, Z. Xu, X. Lu. App. Math. Mod. 2018, 59, 20.
2. И.С. Гершман, Н.В. Миронос Вестник ВНИИЖТ. 2011, 3, 13.
3. Ю.Н. Логинов, Р.К. Мысик. Журнал СФУ. Техника и технологии 2014, 7, 3, 316-326.

ОТ НАНО- К ФЕМТО И ОБРАТНО. О ВОЗМОЖНЫХ ПУТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОКОНДЕНСИРОВАННОЙ МАТЕРИИ

Рязанцев Г.Б.¹, Высоцкий В.И.², Лавренченко Г.К.³, Недовесов С.С.², Бекман И.Н.¹, Бунцева И.М.¹

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, anis-mgu@mail.ru

²Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина, vivysotskii@gmail.com

³Институт низкотемпературных энергетических технологий, Одесса, Украина, lavrenchenko.g.k.@gmail.com

В докладе рассматриваются возможные механизмы создания гипертяжелых ядер методом электронно-ядерного коллапса [1], а нейтронного вещества – конденсацией ультрахолодных нейтронов (УХН) [2]. Принципиальная возможность создания таких объектов была ранее обоснована А. Б. Мигдалом [3], который предположил, что хорошо известное множество протон-нейтронных ядер с массовыми числами от 0 до 300 и минимумом энергии около 8 МэВ/нуклон при $A \square 60$ соответствует первой области, за пределами которой (начиная с заряда $Z \geq (\hbar c / e^2)^{3/2} \approx 1600$) существует другая область, описывающая возможное состояние ядерной материи, стабилизируемое за счет пионного конденсата. У этой области минимум энергии соответствует 20 МэВ/нуклон при $A \square 200000$.

Показано, что нейтронное вещество может быть реализовано при определенных условиях, а его систематизация может быть осуществлена в виде дополнения к Периодической системе. При решении таких проблем вполне реальным становится изучение не только физических, но и химических, и, возможно, инженерных и технических свойств. Мононейтронное вещество (УХН) получено в России еще в 1968 г. [4]. Полинейтронное вещество (ПНВ) существует пока только на нейтронных звездах, но вскоре вероятно его получение и в лаборатории. ПНВ придает стабильность уже на микроуровне Тамм-взаимодействие [1,5], бета-равновесие Хунда [6] и оно устойчиво не только на макроуровне (нейтронные звезды) за счет гравитационное взаимодействия. Возможность нейтронизации показана не только из-за гравитационного взаимодействия, но и посредством других механизмов (сверхкритическое увеличение атомного номера элементов посредством электронно-ядерного коллапса и конденсации ультрахолодных нейтронов), так что есть фундаментальная возможность получения нейтронного вещества в лабораторных условиях [1], также как и гипертяжелых ядер [2]. На основании трудов Мигдала, Тамма, Хунда утверждается возможность стабильного существования ПНВ (при $Z \gg 175$, $N \gg Z$, $A > 10^3 - 10^5$ и размером 200-300 и более фемтометров) на микроуровне, а не только на макроуровне, как сейчас считается в астрофизике. Рассматривается нейтронное вещество в качестве первичного космологического, кандидата на нерелятивистскую темную материю и его получение в лабораторных условиях. Необходимо учитывать возможность образования фрагментов ПНВ в качестве темного вещества (нейтральность, фемто-, пико- и наноразмеры, реликтовая охлажденность к настоящему времени затрудняют их обнаружение) уже в начальные моменты рождения Вселенной, что является доминирующим процессом (также как, и первичные черные дыры), а не термоядерный синтез из первоначального незначительного количества протонов. Наблюдаемая же часть Вселенной образуется из остаточной части первичных протонов и в дальнейшем распавшихся одиночных нейтронов и нестабильных фрагментов ПНВ (с $Z > 175$, $N \gg Z$, но $A < 10^3 - 10^5$).

Ключевые слова: нейтрон, нейтронное вещество, гипертяжелые ядра, электронно-ядерный коллапс, конденсация ультрахолодных нейтронов, темная материя.

1. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. // Foundations of Physics Letters (FoPL), v. 19, n. 1, pp. 21-36 (2006)

2. Ryazantsev G.B., Lavrenchenko G.K., Khaskov M.A., Beckman I.N. //ISINN-24. 24th International Seminar on Interaction of Neutron with Nucle. Dubna, JINR, Russia, pp. 65-74 (2017)
3. Мигдал А.Б. Теория конечных Ферми-систем и свойства атомных ядер. М.: Наука, 1983, 54
4. Шапиро Ф.Л. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1976, т. 2, 348
5. Тамм И.Е. Теория ядерных сил и атомного ядра. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1975, т. 1, 283-326
6. Hund F., Materie unter sehr hohen Drucken und Temperaturen // Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften. 1936, 15, 189-228

НОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ БЕСКИСЛОРОДНОГО ГРАФЕНА И ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ

Клименко И.В.¹, Трусова Е.А.², Щеголихин А.Н.¹, Юрина Л.В.¹,
Лобанов А.В.^{1,3}

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской Академии
Наук, Москва, inna@deom.chph.ras.ru

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской
Академии Наук, Москва, trusova03@gmail.com

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н.
Семенова Российской Академии Наук, Москва, avlobanov@mail.ru

С целью дальнейшего расширения практического применения фталоцианинов и придания им новых свойств авторы разработали синтез и охарактеризовали новые гибридные структуры графен - фталоцианин алюминия (AlCIPc) в N,N-диметилформамиде. Особенностью предлагаемого способа является использование взаимодействия бескислородного графена с органическим хромофором; при этом синтезированные гибридные структуры являются удачным примером симбиоза органических и неорганических молекул.

Бескислородный графен был получен из синтетического графита сонохимическим способом в виде микросуспензии, которая была исследована методами оптической спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии с дифракцией электронов, динамического светорассеяния, комбинационного рассеяния света и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами. Установлено, что происходит образование многослойного графена, который в органическом субстрате присутствует, главным образом, в виде листов со стороной более 200 нм и толщиной 3-5 нм.

Синтез гибридных структур проводили путем титрования раствора AlClPc в N,N-диметилформамиде декантированной суспензией графена. С помощью методов оптической спектроскопии были изучены спектрально-люминесцентные свойства полученной системы. Особое внимание было уделено агрегационным свойствам фталоцианина алюминия при изменении содержания графена в данных системах.

При сравнении спектров оптического поглощения в области Q-полосы установлено, что агрегаты, образуемые фталоцианином алюминия за счет дисперсионных взаимодействий между ароматическими системами, разрушаются в присутствии графена. Он способствует существованию AlClPc в виде мономеров и играет роль зарядокомпенсирующего лиганда, частично разделяющего макроциклы. Появление изобестической точки в области В-полосы спектра оптического поглощения гибридной структуры, возможно, является критерием образования аддукта – продукта прямого присоединения молекул AlClPc к графеновым листам. При этом молекулы AlClPc вступают в координационное взаимодействие с графеном с образованием комплекса с переносом заряда. Влияние содержания графена в гибридных структурах проявляется в том, что количество H-агрегатов AlClPc в системе уменьшается при увеличении концентрации графена. Отсутствие максимумов поглощения в области 705-780 нм, являющихся критерием образования J-агрегатов AlClPc, свидетельствует об их отсутствии во всех представленных образцах.

Полученные результаты представляют значительный интерес для разработчиков новых материалов для оптических хемосенсоров, полупроводников, электролюминесцентных материалов, фотосенсибилизаторов, а также фармацевтических субстанций для фотодинамической терапии онкологических и других заболеваний.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБХФ РАН (№ гос. регистрации 01201253304) и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0082-2018-0006, рег. номер № АААА-А18-118020890097-1).

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ВИСМУТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Кожемякин Г.Н.¹, Кийко А.В.², Кийко С.А.², Артемов В.В.¹

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН», Москва, genakozhemyakin@mail.ru, vkart55@yandex.ru*

²*Луганский национальный университет им. Владимира Даля, Украина kiyko46@mail.ru, sergiokiyko@gmail.com*

Полуметалл висмут (Bi) является перспективным материалом для научных исследований и практического применения вследствие особенности физико-химических свойств и зонной структуры. Он является одним из основных компонентов в поли- и монокристаллах термоэлектрических и топологических материалов [1,2]. Наноструктуры Bi предполагают открытие новых квантовых явлений, которые могут быть использованы для создания перспективных электронных приборов. Развитие методов получения наночастиц Bi во многом зависит от изучения взаимосвязи технологических условий получения с размерами, формой и количеством частиц.

В данной работе представлены результаты получения методом термического испарения наночастиц Bi на подложках из стеклоглерода и оксида алюминия с применением специально разработанной программы для определения их размеров, формы и плотности на изображениях электронного микроскопа.

Для получения наночастиц Bi применяли метод термического испарения в атмосфере аргона высокой чистоты. В качестве исходного материала использовали Bi чистотой 99,9999%, который массой ~ 1 г помещали в кварцевый тигель. Испарение проводилось в установке, позволяющей контролировать давление газа в камере, температуры расплава и подложек. Три подложки из стеклоглерода или оксида алюминия одновременно фиксировали на танталовом диске, закрепленном на вращающемся штоке, который позволял устанавливать подложки над отверстием в крышке тигля с испаряющимся Bi. Время термического испарения Bi на стеклоглеродные подложки составляло 10, 20 и 30 с, а на подложки из оксида алюминия – 30, 60 и 90 с. Температура расплава висмута в процессе испарения составляла 378 °С, а подложек – около 125 °С. Распределение нано- и микрочастиц Bi на подложках наблюдали и фотографировали в электронных сканирующих микроскопах (ЭСМ) JSM-6390LA и (ЭСМ) JSM 7401F.

На подложках из стеклоглерода и оксида алюминия были сформированы наночастицы с размерами 20-100 нм и микрочастицы Bi –

до 500 нм. Визуальную статистическую обработку полученных электронных микрофотографий с нано- и микрочастицами Bi выполняли, используя специально разработанную программу. С ее помощью были определены плотности нано- и микрочастиц Bi, средние значения размеров и коэффициентов формы. Средние размеры наночастиц на обеих подложках составляли от 30 до 40 нм, а средние размеры микрочастиц на стеклоглеродных подложках были в 2,5 раза выше, чем на подложках оксида алюминия. Форма большей части нано- и микрочастиц Bi на обеих подложках отличалась от сферической с коэффициентом формы 1,6. Плотность наночастиц Bi на стеклоглеродных подложках изменялась от 1.8×10^8 до 2.6×10^8 см⁻² при увеличении времени испарения от 10 до 30 с. Однако на подложках оксида алюминия плотность наночастиц Bi была выше и уменьшалась от 14.7×10^8 до 8×10^8 см⁻² при увеличении времени испарения от 30 до 90 с. Таким образом, разработанная программа позволила определить форму, размеры и плотность наночастиц на изображениях электронного микроскопа.

Литература:

1. Zemskov, V.S. Growth and investigation of thermoelectric properties of Bi-Sb alloy single crystals, Journal of Crystal Growth. – 2013. – Vol. 212. – N. 1-2. – P. 161-166.
2. Hasan, M. Z., Kane, S. L. Colloquium: Topological insulators, Rev. Mod. Phys. – 2010. – Vol. 82. – P. 3045-3067.

НАНОЧАСТИЦЫ ОКСИДА ТАНТАЛА КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ОНКОТЕРАНОСТИКИ

Кошечая Е.Д.^{1,4}, Назаровская Д.А.², Коробанова А.О.³, Морозов В.Н.⁴,
Кольванова М.А.⁴, Кривошапкин П.В.²

¹Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

³Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар

⁴Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна

ФМБА России, Москва

katiakosh@gmail.com

Одним из перспективных направлений в сфере разработки препаратов для эффективной диагностики и лечения раковых заболеваний является тераностика. Это подход, предполагающий создание одного препарата, который совмещает и диагностическую, и терапевтическую функции. Ввиду высокой распространенности рентгеновских методов (компьютерная томография, лучевая терапия), создание препаратов для

рентгеновской тераностики является первоочередной задачей. Среди класса наночастиц (НЧ), которые уже активно исследуются для этих целей, НЧ на основе оксида тантала выделяются своей высокой биосовместимостью и нетоксичностью, а также относительно низкой стоимостью [1]. Благодаря высокому коэффициенту поглощения рентгеновского излучения, они могут выступать основой для создания контрастных агентов для рентгеновской визуализации и радиосенсибилизаторов для лучевой терапии [2].

Таким образом, в данной работе были подобраны условия получения НЧ оксида тантала, размером до 100 нм (сольтермальным, золь-гель методы). Структура, состав и морфология НЧ были охарактеризованы при помощи рентгеновской порошковой дифракции, просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, метода Брунауэра-Эммета-Теллера. Коллоидно-химические характеристики водных золей на основе полученных НЧ изучены в широком диапазоне рН (3 – 9) и концентраций фонового электролита (0.001 – 0.15 М NaCl) методами динамического светорассеяния, лазерного доплеровского электрофореза, поверхностного потенциометрического титрования. Исследовано влияние времени ультразвуковой обработки на свойства дисперсий. В результате были подобраны условия (рН, время ультразвуковой обработки), позволяющие получать устойчивые водные золи с концентрацией 2 – 20 мг/мл. Стандартный МТТ-тест показал, что НЧ не оказывают существенного цитотоксического влияния на клетки (фибробласты сосочкового слоя дермы, мезенхимальные стволовые клетки) во всем исследуемом диапазоне концентраций (0 – 200 мкг/мл). Полученные золи обладают высокой рентгеноконтрастностью (450 HU для золя 20 мг/мл). Применимость водных золей в качестве контрастных агентов для компьютерной томографии была продемонстрирована *in-vivo*.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11078.

1. Yeh, B. M., , et al. (2017). Opportunities for new CT contrast agents to maximize the diagnostic potential of emerging spectral CT technologies. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 113, 201–222.

2. Bonitatibus, Jr., P. J., Torres, A. S., Goddard, G. D., FitzGerald, P. F., & Kulkarni, A. M. (2010). Synthesis, characterization, and computed tomography imaging of a tantalum oxide nanoparticle imaging agent. *Chemical Communications*, 46(47), 8956.

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ В СИСТЕМАХ Sr-(Gd, Pr)-Co-O: СИНТЕЗ, КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И КИСЛОРОДНАЯ НЕСТЕХИОМЕТРИЯ

Маклакова А.В., Власова М.А., Волкова Н.Е., Черепанов В.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург

anastasia_maklakova@mail.ru

Физико-химические свойства оксидов, образующихся в системах Ln-Me-Me'-O (где Ln – лантанид, Me – щелочноземельный металл, Me' – 3-d металл) зависят от их кристаллической структуры, на формирование которой существенное влияние оказывает содержание кислорода. В связи с этим информация о методах получения, физико-химических свойствах и стабильности оксидов при варьировании химического состава на сегодняшний день является актуальной.

Поэтому целью настоящей работы явились определение фазовых равновесий в системах Ln-Sr-Co-O (Ln = Gd, Pr), а так же оптимизация условий синтеза, определение кристаллической структуры и физико-химических свойств соединений, образующихся в данных системах.

Синтез образцов проводили по стандартной керамической и глицерин-нитратной технологиям. Заключительный отжиг проводили при 1100°C на воздухе в течение 240 часов с промежуточными перетираниями и последующим медленным охлаждением на комнатную температуру. Фазовый состав полученных оксидов контролировали рентгенографически. Идентификацию фаз проводили при помощи картотеки JCPDS и программного пакета «freak». Определение параметров элементарных ячеек из дифрактограмм осуществляли с использованием программ «CelRef 4.0», уточнение полнопрофильного анализа Ритвелда в программе «FullProf 2008».

Согласно результатам РФА в системах (Gd, Pr)-Sr-Co-O на воздухе установлено образование двух типов твердых растворов: $Sr_{1-x}Ln_xCoO_{3-\delta}$ и $Sr_{2-y}Ln_yCoO_{4-\delta}$, где Ln= Pr, Gd. Для всех однофазных оксидов были рассчитаны параметры элементарной ячейки и координаты атомов. Показано, что при увеличении концентрации ионов РЗЭ наблюдается уменьшение параметров и объёма элементарной ячейки для сложных оксидов, что связано с размерными эффектами.

Электротранспортные свойства измеряли 4хконтактным методом. При увеличении температуры наблюдается уменьшение общей электропроводности, что связано с выходом кислорода из подрешётки, что препятствует протеканию реакции диспропорционирования кобальта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-33-90058|19).

БИОПРЕПАРАТЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА И СЕЛЕНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И МЕДИЦИНЕ

Федотов М.А.¹, Фолманис Г.Э.¹, Гифер П.К.¹, Савченко Г.Д.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург

mikle_fed@mail.ru

Наночастицы в силу своих физических особенностей – ультрамалых размеров и большой удельной поверхности – обладают множеством полезных свойств, таких как повышенная каталитическая активность, способность проникать через мембраны клеток, биодоступность, низкая токсичность и др. [1] Эти особенности позволяют изготавливать на основе наноматериалов биологически активные препараты, которые могут с успехом применяться в различных областях сельского хозяйства для увеличения эффективности производства и в медицине, обладая при этом пролонгированным действием. Основой для таких препаратов являются суспензии наночастиц металлов и неметаллов, выступающих в роле микроэлементов.

В настоящей работе рассмотрены два способа получения биологически активных препаратов на основе наночастиц. Первый метод представляет собой химико-металлургический способ получения нанопорошков железа с последующим приготовлением суспензии [2]. Второй способ основан на методе лазерной абляции твердой мишени в жидкости [3].

Основные показатели эффективности применения биологически активных препаратов в сельском хозяйстве представлены в таблице:

Области применения	Показатели	
	Растениеводство	Повышение урожайности, % 15 - 30
Животноводство	Повышение темпов роста, % 20 - 25	Сохранность молоди, % 100
Птицеводство	Повышение темпов роста, % 15 - 20	Сохранность молоди, % 100
Кормопроизводство	Повышение содержания микроэлементов, % 200	Повышение питательной ценности кормов, % 65 - 70
Пищевая промышленность	Повышение содержания микроэлементов в продуктах питания, % 50	Расширение ассортимента функционального питания, % 25

Исследование влияния коллоидных растворов селена на развитие аллоксанового диабета у крыс показали предотвращение развития сахарного диабета 1 типа у крыс, снижение уровня глюкозы и гликированного гемоглобина в крови.

Литература:

1. Яппаров А.Х., Коваленко Л.В. Научное обоснование получения наноструктурных и нанокompозитных материалов и технологии их использования в сельском хозяйстве / под общ. ред. А.Х. Яппарова и Л.В. Коваленко. - Казань: Центр инновационных технологий, 2014. - 304 с.

2. Теплов О.А., Коваленко Л.В., Фолманис Г.Э., Федотов М.А., Фолманис Ю.Г. Процессы восстановления наноразмерного гематита водородом // Перспективные материалы, 2014, № 9, с. 53-58.

3. Федотов М.А., Фолманис Г.Э., Ролдугин В.И., Коваленко Л.В. Лазерная абляция селена в воде // Перспективные материалы, 2015, № 6, с. 32-36.

ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННЫЙ ПИРОЛИТИЧЕСКИЙ ГРАФИТ КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПОДЛОЖКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Чешев Д.Л.¹, Родригез Р.Д.¹, Мурастов Г.¹, Туан Хоанг Тран¹,
Матковиц А.², Шеремет Е.С.¹

¹Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет,
Томск,

²Горный университет Леобена, Леобен, Австрия
dimascabal@gmail.com

В течении последнего десятилетия двумерные материалы становятся все более популярной тематикой исследований многих

научных групп по всему миру. Вместе с этим, увеличивается как количество методик изучения, так и количество материалов, помогающих проводить исследования. В сфере исследований свойств наноматериалов хорошо себя зарекомендовала кремниевая (SiO_2/Si) подложка из-за её химической стабильности в контакте с исследуемыми образцами, низким показателем шероховатости поверхности. Благодаря интерференции появляется возможность увидеть одиночные слои исследуемых материалов на поверхности подложки. Однако отсутствие проводящих свойств делает ее непривлекательной для использования токопроводящих методов исследования. Высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ), напротив, обладая такими же свойствами, что и кремниевая подложка, является отличным проводником и позволяет использовать его в токопроводящих методах атомно-силовой микроскопии (АСМ), как, например, микроскопия диэлектрических сил, Кельвин-зондовая силовая микроскопия и отображение сопротивления растекания. Ван дер Ваальсовское взаимодействие между наноматериалом и подложкой дает возможность использовать ВОПГ для нанолитографии. Благодаря однородной поверхности и слоистой структуре материала, данная подложка способна усиливать оптический сигнал, что позволяет использовать ВОПГ для анализа структуры и химического состава двумерных материалов методами Рамановской спектроскопии.

Таким образом, данная работа предлагает использование высокоориентированного пиролитического графита в качестве универсальной подложки для исследования свойств двумерных материалов. В работе представлены результаты исследований единичных слоев GaSe , MoS_2 и ZnIn_2S_5 , механически осажденных на поверхность подложки. В качестве методов исследования были выбраны микроскопия диэлектрических сил, Кельвин-зондовая силовая микроскопия, микроскопия пьезоэлектрических сил и отображение сопротивления растекания. Спектры, полученные с помощью микро-Рамановской спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии, позволили изучить химические и структурные свойства исследуемых материалов, что, в совокупности с АСМ не только дает наиболее полную картину об исследуемом образце, но также и демонстрирует преимущества использования кристаллического графита в качестве универсальной подложки.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ДЕГИДРИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОПАНА НА КАТАЛИЗАТОРЕ V_2O_5/TiO_2

Никитина Н.А., Твердохлеб Д.А., Голосная М.Н., Агафонов А.А.
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет, кафедра физической химии, лаборатория
молекулярной спектроскопии, Москва*

Катализатор V_2O_5/TiO_2 используется в качестве катализатора в различных окислительных процессах: окисление циклогексана [1], окисление диоксида серы [2], восстановление оксидов азота аммиаком [3]. Система V_2O_5/TiO_2 широко применяется как катализатор окислительного дегидрирования пропана.

Применяемое в настоящее время неокислительное дегидрирование является энергоемким процессом. Окислительное дегидрирование является экзотермическим процессом и не приводит к образованию кокса. Все еще существует вопрос: какие кислородные центры активны в реакции селективного окисления? Моделирование активных центров катализатора и поиск ответа на данный вопрос стали целью представленной работы.

Для решения поставленной цели проведены расчеты с использованием программы VASP в рамках теории функционала плотности (PBE функционал, базис плоские волны) с использованием суперкомпьютера «Ломоносов» [4].

Катализатор был представлен как бесконечная структура с периодической симметрией. При моделировании активных центров использован кластерный метод.

Рассмотрен процесс окислительного дегидрирования пропана с участием различных форм кислорода ($V=O$, $V-O-V$, $V-O$ – Носитель), создана модель «Активный центр – Носитель». Однако существуют модели катализаторов, которые описывают гетеролитическое расщепление связи $C-H$ с образованием гидроксильных групп $V-OH$ на поверхности. Данная модель тоже была построена и учтена при оценке термодинамических параметров. Рассчитаны два пути адсорбции пропана на ванадилном кислороде и на активном центре групп $V-OH$. Дегидрирование пропана на активном центре $V-OH$ протекает энергетически более выгодно, чем на $V=O$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-33-00431.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы:

1. Bellifa A., Lahcene D., Tchenar Y.N., Choukchou-Braham A., Bachir R., Bedrane S., Kappenstein C. Appl. Catal. A Gen., 2006, 305, 1.
2. Ji P., Gao X., Du X., Zheng C., Luo Z., Cen K. Catal. Sci. Technol., 2016, 6, 1187.
3. Giakoumelou I., Fountzoula C., Kordulis C., Boghosian S. J. Catal., 2006, 239, 1.
4. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin Vl., Opanasenko V. "Lomonosov": Supercomputing at Moscow State University. In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science), Boca Raton, USA, CRC Press, 2013, 283.

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКОХИМИИ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАСПЛАВОВ ТРИАДЫ ЖЕЛЕЗА, СОДЕРЖАЩИХ ПАВ И ТУГОПЛАВКИЕ ЭКЗОГЕННЫЕ НАНОФАЗЫ

Бурцев В.Т., Анучкин С.Н., Самохин А.В., Алымов М.И.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, burtsev@imet.ac.ru

Нанотехнологии все шире внедряются в процессы получения стали и сплавов [1]. Ниже представлены библиометрические сведения о количестве отечественных публикаций об использовании тугоплавких нано и ультрадисперсных экзогенных частиц для модифицирования и инокулирования расплавов триады железа за последние 12 лет: 2008–3; 2009–5; 2010–6; 2011–2; 2012–4; 2013–4; 2014–6; 2015–5; 2016–3; 2017–4; 2018–4; 2019–3.

Не претендуя на полный объем информации, отметим следующее, что, во-первых, налицо постоянный тренд интереса к указанным проблемам. Во-вторых, кристаллизация металла и непрерывная разливка стали являются значимыми темами исследований и промышленного применения. В-третьих, жаропрочные никелевые сплавы, высоколегированные стали и чугуны стали также распространенными матрицами для введения наночастиц в расплав. В-четвертых, наиболее часто в виде наночастиц используются оксиды циркония, титана, иттрия, а также карбиды и сложные соединения этих металлов. В-пятых, в результате

модифицирования и инокулирования механические и другие свойства металлов и сплавов значительно улучшаются.

В ИМЕТ РАН проводятся систематические работы по взаимодействию наночастиц тугоплавких фаз (НЧТФ) расплавов железа и никеля с ПАВ и примесями цветных металлов (ПЦМ), что весьма актуально для сложнолегированных сплавов с целью рафинирования их от вредных примесей нетрадиционными способами. Исследовали взаимодействие НЧТФ Al_2O_3 ($d_{cp}=41$ нм), MgO (28 нм) и $MgAl_2O_4$ (65 нм) с ПАВ-ПЦМ (Sn,Sb,Cu) в модельных системах (мас. %): Fe-Sn (0,0561 %), Fe-Sb (0,0950 %) и Fe-Cu (0,0445%). Показали, что с учетом термодинамического анализа и опытов без введения НЧТФ удаление ПАВ-ПЦМ происходит в результате гетерофазного взаимодействия НЧТФ с ПАВ с образованием ансамблей и их удалением на границу раздела фаз Ме-газ/шлак/футеровка (подробно см.[2]). Экстремальные значения функций $\alpha_{ПАВ}$ составили (отн.%): в системе Fe-Sn- Al_2O_3 (41 нм) – 23,3 %, в Fe-Sn- MgO (28 нм) – 24,4 %, в Fe-Sn- $MgAl_2O_4$ (65 нм) – 29,8 %, в Fe-Sb- Al_2O_3 (41 нм) – 30,3 %, в Fe-Cu- Al_2O_3 (41 нм) – 16,9 %, в Fe-Cu- $MgAl_2O_4$ (65 нм) – 23,6 %.

В лабораторных условиях исследовали удаление Cu и Sn из сталей 12X18H10T, 10Г2ФБ и сплава ЭП708ВД. Показали, что после ввода НЧТФ Al_2O_3 (41 нм) α_{Cu} составляла до 35 %, а α_{Sn} до 25 % в зависимости от времени пребывания НЧТФ в расплаве (5-20 мин.) и их концентрации (0,06-0,18 мас %). Реализовали введение НЧТФ SiC и TiCNO в Fe-C-Si-содержащий расплав (литейный чугун) и экспериментально показали, что зависимости уменьшения ПАВ от содержания НЧТФ при 5 мин. выдержке однозначно свидетельствует о взаимодействии ПАВ с НЧТФ. Степень удаления ПАВ (отн. %) при этом составила: для НЧТФ SiC- $\alpha_S=39-55$ %; $\alpha_O=26-25$ %; для НЧТФ TiCNO- $\alpha_S=39-29$ %; $\alpha_O=32-37$ %, соответственно. Анализ исследованных чугунов показал положительное влияние введения НЧТФ SiC по сравнению с НЧТФ TiCNO на механические свойства, а высокие значения достигнуты при введении 0,02 мас. % НЧТФ SiC: величины предела текучести и предела прочности на сжатие выросли на 26 и 30 %, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ №19-08-00461 а.

Список литературы:

1. Колмаков А.Г., Баринов С.М., Алымов М.И. Основы технологий и применения наноматериалов. М.: Физматлит. 2012. 208 с.

2. Бурцев В.Т., Анучкин С.Н., Самохин А.В. Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. № 3. с. 5-15.

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПСЕВДО- α -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА

Андреев П.В.^{1,2}, Гудзь Д.А.², Сметанина К.Е.², Шадрин Я.С.²
¹ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых, Нижний Новгород

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
andreev@ihps.nnov.ru, andreev@phys.unn.ru

Титановые сплавы (например, ПТЗВ, ПТ7М), обладающие высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью в агрессивных средах, широко используются в ядерной энергетике и нефтехимической промышленности. Важной задачей является установление механизмов коррозионного разрушения, являющегося труднопрогнозируемым процессом.

Известно, что механическая полировка алмазной пастой титана сопровождается интенсивным наклёпом поверхностных слоев, при этом электрохимическая полировка приводит к обогащению поверхности титановых сплавов кислородом, что меняет характер дифракционной картины при РФА. Было решено провести исследование влияния обработки поверхности титановых сплавов на результаты рентгенодифракционных экспериментов.

Объектами исследования стали титановые сплавы ПТЗВ и ПТ7М полученные по стандартным режимам термомеханической обработки (горячая деформация в β -области), используемые для изготовления теплообменного оборудования современных ядерных энергетических установок, также был исследован образец технического титана ВТ1-0.

Обработка поверхности производилась в 8 этапов, включающих полировку алмазной пастой до шероховатости 1 мкм, электрохимическая полировка ($V=9$ В и $I=2.5$ А) с использованием электролита (75% H_2SO_4 и 25% HF), обработка концентрированным раствором HF.

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на порошковом дифрактометре “Shimadzu XRD-7000” ($CuK\alpha$, $\lambda=1.54$ Å) после каждого этапа обработки (см. рис. 1). Результаты сопоставлялись с данными исследований, полученными на РЭМ Jeol JSM-6490 с энергодисперсионным микроанализатором Oxford Instruments INCA 350.

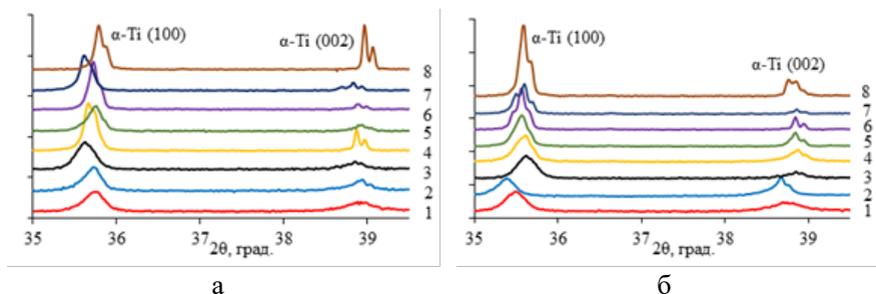


Рисунок 1 – Участки дифрактограмм образцов ПТЗВ (а) и ПТ7М (б) после: 1) полировки алмазной пастой с дисперсностью частиц 28/20 мкм, 2) 14/10 мкм, 3) 5/3 мкм, 4) 1/0 мкм, 5) электрохимической полировки в течение 30 с, 6) полировки алмазной пастой с дисперсностью частиц 1/0 мкм, 7) электрохимической полировки в течение 2 мин., 8) обработки HF

Электрохимическая полировка и обработка концентрированной плавиковой кислотой привели к видимому уменьшению ширины дифракционных максимумов и более явному проявлению их тонкой структуры, свидетельствующей о наличии по крайней мере двух кристаллических фаз в составе каждого из исследуемых образцов. Проведенные исследования в целом показали высокую зависимость данных рентгенодифракционных экспериментов от способа обработки поверхности рассмотренных титановых сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках гранта №19-73-00295.

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПЛАКИРОВАННОГО ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВЫМ ГРАНАТОМ

Дрожилкин П.Д.¹, Болдин М.С.¹, Алексеева Л.С.¹, Андреев П.В.^{1,2}, Каразанов К.О.¹, Сметанина К.Е.¹, Балабанов С.С.²

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

²ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых, Нижний Новгород

andreev@ihps.innov.ru, andreev@phys.unn.ru

Один из современных методов создания тугоплавких керамических нанокompозитов на основе Si₃N₄ заключается в нанесении ультратонких

покрытий легкоплавких оксидов на порошки нитрида кремния различной дисперсности и последующем их компактировании методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС).

Разработка технологии плакирования нанопорошков ультратонкими (в пределе нанотолщинными) слоями оксидов требует оптимизации режимов осаждения, в том числе и решения проблемы предварительной де-агломерации Si_3N_4 .

Порошковые композиции были получены тремя способами: (1) методом Печини (с добавлением лимонной кислоты) и (2) осаждением в желатиновой матрице, а также (3) методом распыления в вакууме. Полученные в результате синтезов промежуточные продукты отжигали постадийно в течение 2–8 ч при температурах 300, 500, 800, 1000 °С с диспергированием в агатовой ступке между стадиями.

Отожжённые до 1000 °С образцы порошков, а также их промежуточные продукты, отоженные в течение трех часов при температуре 300 °С, компактировались методом электроимпульсного плазменного спекания.

Спекание осуществлялось на установке “Dr. Sinter model SPS-625” (SPS Syntex, Япония) в вакууме в графитовой пресс-форме с внутренним диаметром 12 мм. Скорость нагрева составляла 50°С/мин, величина приложенного давления – 70 МПа, температура спекания варьировалась в пределах 1200–1680 °С.

Изучение фазового состава порошков после отжига при 500 и 1000 °С и керамик, полученных методом ЭИПС, проводилось методом рентгеновской дифракции на порошковом дифрактометре “Shimadzu XRD-7000” ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1.54 \text{ \AA}$) в диапазоне углов 2θ : 10 – 80° с шагом сканирования 0.04° и временем экспозиции 1 с. Изучение микроструктуры полученных порошков и керамик проводилось методом растровой электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490.

Определено, что после первого этапа отжига фаза YAG не сформировалась ни в одном из образцов, полученных разными методами. При спекании при 1000 °С в порошках, полученных методами (1–2) наблюдаются несколько фаз смешанных оксидов иттрия и алюминия, а также фаза сиалона. В порошке, полученном методом (3), фаз оксидов и сиалона не наблюдается, как и в полученных из этого порошка образцах керамики.

Нитрид кремния во всех экспериментах является двухфазным ($\alpha+\beta$) порошком, при компактировании при разных температурах соотношение фаз α и β различно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта №19-33-60084.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ ВИСКОЗЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ

Ельчанинова В.А., Осмова М.А., Находнова А.Н., Самойлов В.М.

АО «НИИГрафит», Москва, 11081996victory@gmail.com

Углеродные ткани (УТ) на основе вискозного волокна применяют для лечения ожогов и гнойных ран. Лечебное действие УТ обусловлено сорбцией раневых выделений и очищением раны от гноя и бактерий. Исходные УТ гидрофобны и не могут быть применимы для лечения ран. Для придания УТ сорбционных свойств используют электрохимическую обработку (ЭХО). Было исследовано влияние ЭХО на сорбционные свойства УТ. Исследования проводились на образцах УТ на основе вискозы марки ТГН-2, графитированной при 2400 °С. Во время ЭХО УТ помещалась в раствор электролита (H₂O, KJ, NH₄OH, спиртовой раствор йода) и подключалась к источнику питания в качестве анода. Плотность тока составляла 0,33А/м². Обработка осуществлялась с одной стороны. После ЭХО была снята кинетика сорбции 0.05% раствора хлоргексидина. Измерение сорбции проходило путём вычисления относительного увеличения массы образцов УТ в процессе сорбции раствора хлоргексидина. Кинетика сорбции для образцов УТ, прошедших ЭХО разной длительности, приведена на рис. 1. Значение сорбции, соответствующее насыщению, принято за сорбционную ёмкость (С). На рис. 2 приведена зависимость С от длительности ЭХО. Влияние длительности ЭХО на S_{уд} представлено на рис. 3а, а зависимость С от S_{уд} – на рис. 3б.

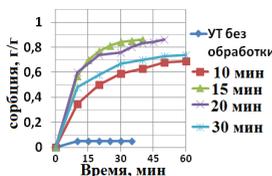


Рисунок 1 – Кинетика сорбции хлоргексидина образцами УТ после ЭХО.

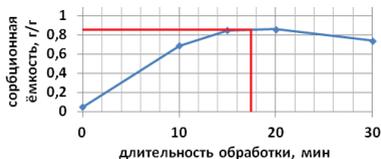


Рисунок 2 – Зависимость сорбционной ёмкости по хлоргексидину УТ от длительности ЭХО.

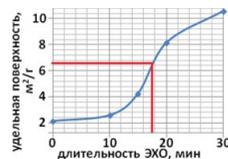


Рисунок 3 (а) – Влияние длительности ЭХО

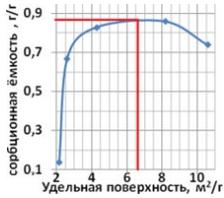


Рисунок 3 (б) – Зависимость сорбционной ёмкости УТ, подвергнутой ЭХО, от её удельной поверхности.

на удельную поверхность УТ.

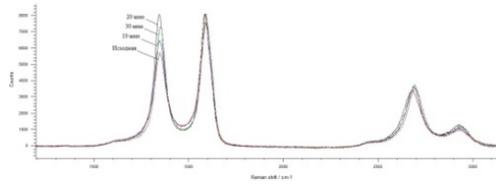


Рисунок 4 – Рамановские спектры с поверхности УТ.

Рамановские спектры регистрировали с помощью конфокального рамановского микроспектрометра Renishaw inVia Reflex. Установлена стойкая корреляция между параметром I_D/I_G и сорбционной ёмкостью УТ по хлоргексидину (рис. 4). Рост I_D/I_G соответствует снижению степени совершенства кристаллической структуры УВ и образованию дефектов, способных повышать сорбционные свойства УТ.

Выводы:

1. При длительности ЭХО ниже 15-20 минут наблюдается рост сорбционных свойств УТ. При дальнейшей обработке сорбционные свойства падают. При этом удельная поверхность продолжает расти.
2. Зависимость $S_{уд}$ от длительности ЭХО имеет точку перегиба, которая соответствует максимуму сорбционных свойств УТ.
3. Рост параметра I_D/I_G соответствует повышению сорбционной ёмкости УТ, что указывает на возможное влияние дефектов кристаллической структуры УВ на сорбционные свойства УТ.
4. Сорбционные свойства УТ определяются сложным механизмом, который может быть связан с наличием капилляров и пор в углеродном волокне ткани, заполнением поверхности полярными функциональными группами и формированием специфических дефектов.

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ГАЛЛИЯ

Кожемякин Г.Н.¹, Белов Ю.С.², Труфанова М.К.³

¹Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН», Москва, genakozhemyakin@mail.ru

²Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, ybs82@mail.ru

³Луганский национальный университет им. Владимира Даля, Украина, ritatru@mail.ru

Металлический галлий (Ga), обладая специфическими физическими свойствами, используется в качестве одного из компонентов для получения монокристаллов полупроводниковых соединений GaAs, GaN и высокоэффективных преобразователей солнечной энергии. Сплавы Ga с другими металлами применяют в термометрах, жидких затворах, электропроводящих контактах, диффузионных растворах и др. Изучение наночастиц Ga размерами 20-30 нм, полученных в порах опала и стекол кристаллизацией при высоком давлении до 10 кбар, позволило обнаружить новые полиморфные модификации и сверхпроводимость [1,2]. Изученные свойства Ga позволяют ожидать новых наноразмерных эффектов, что имеет важное научное и практическое значение. Одним из способов для получения наночастиц металлов является метод термического испарения, который мы применили для получения наночастиц Ga.

Получение наночастиц Ga методом термического испарения проводили в установке, обеспечивающей создание вакуума и подачу инертного газа. В качестве исходного материала использовали Ga чистотой 99,999%. Так как температура испарения Ga при атмосферном давлении составляет 2230 °С, то испарение Ga в экспериментах проводили в разреженной атмосфере аргона при давлении около $1 \cdot 10^4$ Па. Ga в количестве ~1 г помещали в кварцевый тигель закрытый танталовой крышкой, которая имела одно отверстие диаметром 5 мм. На вращающемся штоке над тиглем крепили танталовый диск с четырьмя отверстиями диаметрами 5 мм, сверху которых крепили одну кварцевую и три стеклоуглеродных подложки. Кварцевую подложку применяли для визуального наблюдения начала процесса испарения. Вращающийся шток периодически совмещал в течение заданного времени отверстия под подложками с отверстием в крышке тигля. Температура расплава Ga составляла 366 °С и 372 °С, а температура подложек в пределах 110-125 °С. Время испарения составляло 10, 15 и 20 с. Форму частиц и распределение их на подложках изучали в сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LA.

Форма частиц Ga была близка к сферической. Размеры нано- и микрочастиц Ga и их плотность определяли с помощью методов машинного обучения, обеспечивших поиск и выделение областей разного

размера на изображениях структур с применением интеллектуальных технологий анализа изображений. Интеллектуальный анализ изображений наноструктур обеспечил разделение областей изображений нано- и микрочастиц на 4 типа по порогу чувствительности. Установлено, что во всех 6 образцах наблюдались наночастицы размерами 30-100 нм. Максимальный размер микрочастиц достигал 500 нм. Плотность наночастиц составляла от 1×10^8 до $10,6 \times 10^8$ см⁻², а микрочастиц от $1,7 \times 10^8$ до $2,4 \times 10^8$ см⁻². Увеличение температуры расплава Ga значительно уменьшало плотность нано- и микрочастиц в пределах $(11-1) \times 10^8$ см⁻² при времени испарения 10 с и незначительно повышало плотность наночастиц $(3,3-3,9) \times 10^8$ см⁻² при времени испарения 20 с. Таким образом, разработанный метод получения наночастиц Ga методом термического испарения и интеллектуальный анализ изображений наноструктур позволили изучить влияние технологических параметров на размер и плотность нано- и микрочастиц Ga.

Литература:

1. E. V. Charnaya, C. Tien, M. K. Lee et al. Indium, N.-Y.: Nova Science Publ. Inc., 2013. P.

2. E. V. Charnaya, C. Tien, K. J. Lin, C. S. Wur, Yu. A. Kumzerov, Superconductivity of gallium in various confined geometries, Phys. Rev. B 58 (1998) 467.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МЕТАЛЛОКСИД/ПОЛИСАХАРИДНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭМУЛЬСИЙ ПИКЕРИНГА

Михайлов В.И.¹, Торлопов М.А.¹, Мартаков И.С.¹, Васенева И.Н.¹,
Ситников П.А.¹, Коваль Л.А.², Земская Н.В.², Падерин Н.М.³,
Кошечкина Е.Д.¹

¹Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

²Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

³Институт физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

system14@rambler.ru

Эмульсии – гетерогенные системы несмешивающихся жидкостей, в которых одна жидкость равномерно распределена в виде мелких капель по всему объему другой. Эмульсии Пикеринга представляют собой системы, в которых микрокапли стабилизированы твёрдыми частицами. Для формирования стабильных эмульсий частица должна хорошо смачиваться как гидрофильной, так и гидрофобной составляющей. Анизотропные нанокристаллы целлюлозы (НКЦ), получаемые методами контролируемой деструкции, активно исследуются в качестве таких стабилизаторов.

Известно, что кристаллические грани НКЦ структурно неэквивалентны, гидрофобная составляющая целлюлоз модификаций Ia и Ib, представлена краевыми плоскостями (200) β / (220) α .

В данной работе в качестве твёрдых поверхностно-активных веществ для стабилизации эмульсий Пикеринга использованы НКЦ, имеющие сходную надмолекулярную структуру и геометрию анизотропных стержнеобразных частиц, но отличающиеся функциональным составом поверхности – содержащие сульфатные или ацетатные группы. Кроме того, исследованы гибридные металлоксид(AlOOH)/полисахаридные частицы. Эмульсии получали путем смешивания водных дисперсий наночастиц и гибридов с фармакопейными маслами, пригодными для перорального введения (оливковое, вазелиновое), с помощью ультразвукового генератора PL-10-0.1 с частотой 22 кГц и мощностью 1000 Вт не более 3 минут.

Установлено влияние концентрации и природы нанокристаллов, концентрации электролита, а также соотношения AlOOH/НКЦ на размеры микрокапель и устойчивость эмульсий при длительном хранении. Показано, что НКЦ, содержащая поверхностные сульфатные группы, проявила слабые эмульгирующие свойства, включая системы с добавлением низкомолекулярного электролита $C(NaCl) \leq 120$ mM. Частично ацетилированные нанокристаллы целлюлозы обладают высокими эмульгирующими свойствами – для формирования устойчивых эмульсий «масло в воде» с размером капель 1-5 мкм достаточно массовой доли частиц НКЦ в диапазоне 0.5-1.0% (относительно массы эмульсии). В этом случае образование устойчивых эмульсий на основе оливкового и вазелинового масел наблюдается уже в системах без добавок электролита. Дополнительное введение электролита способствует снижению пороговой концентрации частиц ацетилированной НКЦ для получения устойчивой эмульсии. Показано, что хотя наночастицы AlOOH сами по себе являются сильными эмульгаторами и могут образовывать устойчивые эмульсии типа «масло в воде», для получения устойчивых эмульсий с применением гибридов AlOOH/НКЦ достаточно частиц с массовой долей AlOOH (относительно массы твердой фазы) от 10 до 55 %.

Результаты исследования полученных эмульсий на мышах (внутрижелудочно) не выявили признаков острой токсичности. Также нами осуществлён скрининг токсичности полученных эмульсий с использованием мушек *Drosophila melanogaster* в качестве модели оценки влияния на продолжительность жизни.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-73-10091. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Химия», ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОСКОПИИ
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА
АТТЕСТАЦИИ РАВНОМЕРНОСТИ ПРОГРЕВА УВ**

Осмова М.А., Самойлов В.М., Находнова А.Н., Вербец Д.Б.

АО «НИИГрафит», Москва, maria.osmova@gmail.com

Аннотация. Степень равномерности прогрева УВ является фактором, определяющим его структуру и физико-механические свойства. Так, целью данной работы являлась оценка информативности метода КР спектроскопии при аттестации данного свойства.

Материалы и методы. В качестве исследуемого образца использовали стандартное высокопрочное УВ марки Т-700. Сопоставление проводилось между исходным УВ и УВ прошедшими термообработку при фиксированной температуре нагревателя 3000 °С и скоростях протяжки 48 и 300 м/ч. Рамановские спектры УВ снимали с поверхности образцов поперечных шлифов филаментов УВ (рис. 1). Спектры регистрировали в широком спектральном диапазоне 700 – 3000 см⁻¹ с помощью конфокального рамановского микроспектрометра Renishaw inVia Reflex. Размеры пятна лазера составляют 0,5 мкм, мощность лазерного излучения 1 мВт. Возбуждающее излучение твердотельного Nd:YAG-лазера с диодной накачкой имело длину волны 532 нм.

Результаты и обсуждение. Результаты исследования представлены на рисунке 2. Из представленных данных видно, что параметр I_D/I_G является оптимальным параметром КР спектроскопии для определения неоднородности структуры УВ. Видно, что кристаллическая структура исходного УВ более упорядочена, чем термообработанного УВ. Оболочка филамента термообработанного УВ более структурирована, чем его середина. Из соотношения Туинстры-Кёнига (1) были рассчитаны значения размеров кристаллитов L_a . При термообработке наблюдается общая тенденция роста размера кристаллитов, при этом скорость роста кристаллитов на периферии примерно в 5 раз выше, чем в центре. Методом КР спектроскопии установлено: увеличение скорости протяжки не оказывает значительного влияния на значения параметра I_D/I_G на краю филаментов, но приводит к снижению I_D/I_G на 0,15 отн. ед. в области ядра. Так, УВ с большей скоростью протяжки обладает увеличенной степенью разориентации кристаллитов относительно оси волокна, что свидетельствует о росте неравномерности прогрева филаментов УВ с увеличением скорости протяжки.

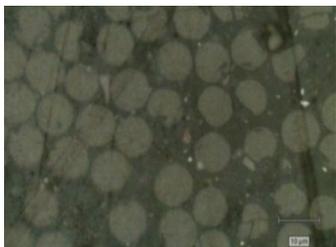


Рисунок 1 – Снимок поперечного шлифа филамента УВ методом оптической микроскопии.

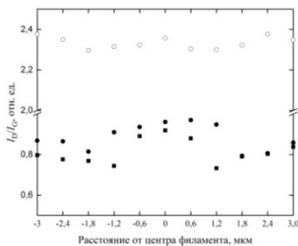


Рисунок 2 – Значения параметра I_D/I_G по поверхности поперечного шлифа филамента УВ: ○ – исходное УВ; ● – 300 м/ч; ■ – 48 м/ч.

$$\frac{I_D}{I_G} = \frac{C(\lambda)}{L_a} \quad (1)$$

где $C(\lambda)$, постоянная, зависящая от длины волны и энергии лазерного излучения, $C(\lambda=514 \text{ нм})$ примерно равна 4,4 нм

Выводы. Установлено, КР спектроскопия является чувствительной к микроструктуре УВ и информативной в определении степени совершенства кристаллической структуры термообработанного УВ, что делает ее оптимальным экспрессным методом аттестации равномерности прогрева филаментов.

ПОСЛОЙНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ WC + 10% Co

Сметанина К.Е., Андреев П.В., Ланцев Е.А., Востоков М.М.
Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
smetanina-ksenia@mail.ru

Твердые сплавы на основе WC – Co характеризуются высокой твердостью, высокой температурой плавления и высоким сопротивлением износу при трении о металлы и неметаллы. Одним из перспективных методов получения сплавов является метод электроимпульсного плазменного спекания порошка [1]. Поверхность частиц исходного порошка WC всегда содержит кислород, поэтому в спекаемом объеме при нагревании может возникать дефицит углерода из-за образования CO и CO₂, что приводит к нарушению стехиометрии и провоцирует образование хрупких η-фаз (Co_xW_yC_z).

Диффузия углерода с графитовой пресс-формы, в которую засыпается порошок, уменьшает этот эффект, поэтому поверхностный слой спеченного образца не будет содержать η-фазы, но на некотором

расстоянии от поверхности эти фазы могут существовать. В рамках проверки данной гипотезы был проведен послойный рентгеновский фазовый анализ.

Объектами исследования стали 3 образца твердых сплавов, изготовленные из порошка WC, полученного методом плазмохимического синтеза, и кобальта, нанесенного на поверхность частиц WC методом осаждения [2]. Спекание осуществлялось на установке “Dr. Sinter model SPS-625” в вакууме ($V=50^\circ\text{C}/\text{мин}$, $P=70$ МПа) при 1050°C , 2 образца – с дегазационной выдержкой при 850°C в течение 10 мин.

Поверхность спеченных образцов последовательно шлифовалась алмазными дисками и полировалась алмазной пастой до уровня шероховатости поверхности 1 мкм. Контроль высоты образцов после каждого этапа осуществлялся с помощью микрометра.

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на дифрактометре “Shimadzu XRD-7000” ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$).

Для определения глубины диффузии углерода были построены зависимости относительных интенсивностей избранных пиков входящих в состав образца кристаллических фаз $I_{\eta(511)}/I_{\text{WC}(111)}$ от суммарной величины удаленного слоя (см. рис. 1). Толщина поверхностного слоя образца, не содержащего η -фаз ($\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$), не превышает 100 мкм. Проведение дегазационной выдержки не оказало значительного влияния на эффект.

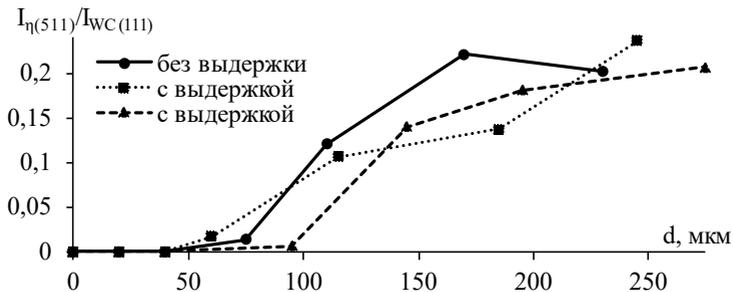


Рисунок 1 – Распределение $I_{\eta(511)}/I_{\text{WC}(111)}$ по глубине образцов, спеченных при 1050°C

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта №18-73-10177.

1. Панов В.С., Чувилин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / М.: МИСиС. 2001. С. 428.

2. Исаева Н.В., Благовещенский Ю.В., Благовещенская Н.В. и др. Получение нанопорошков карбидов и твердосплавных смесей с

применением низкотемпературной плазмы / Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. №3. С. 7-14.

ОБРАЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ И СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМЕ $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$

Шубабко О.Э., Вартамян М.А., Беляков А.В.

Российский химико-технологический университет им. Менделеева, Москва, cjgg@mail.ru

В земной коре находятся минералы в состав которых входят радиоактивные элементы присутствующие и в радиоактивных отходах (РАО). Возраст таких минералов может доходить до миллионов лет, при этом они остаются геологически и радиационно стабильными, поэтому для практических целей представляет интерес получение искусственных имитации таких материалов для захоронения РАО [1].

Получение искусственных минералов в чистом виде затруднено, по этому их часто изготавливают в виде поликристаллического материала, спеканием порошков. В связи с этим получаемый композит должен быть физико-химически, термически и радиационно-стойким.

Целью данной работы является исследование титанат-цирконатной матрицы, полученной по различным технологическим режимам с различным содержанием имитатора РАО. Рабочая матрица представляла собой $\text{TiO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, ее получали методом синтеза в твердой фазе из оксидов, изготовленных термическим разложением данных соединений: $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ в зависимости от температур их разложения.

Было синтезировано 6 составов материала на основе исходной матрицы, в качестве имитаторов вводили стабильные соединения BaCO_3 или SrCO_3 , в количестве 5, 10 и 15 масс %.

Исследования проводили на образцах, полученных методом холодного одноосного двустороннего прессования в виде балочек размером (40 × 6 × 4 мм). Обжиг проводили в воздушной среде при температуре 1400 °С в печи с нагревателями из карбида кремния. Выдержка при конечной температуре обжига составила 1 ч. Скорость нагревания составляла 2 град/мин. Оценивали интегральные структурные характеристики (плотность, открытую пористость) и механические свойства (прочность при изгибе). Результаты испытаний приведены в таблице.

Показатель	Исходная матрица	BaCO ₃			SrCO ₃		
		5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %
$\rho_k, \text{г/см}^3$	3,65	3,72	3,60	3,11	3,67	4,01	3,12
$\rho_0, \%$	7,3	7,90	12,79	35,70	7,81	3,77	39,06

Столь заметные различия свойств образцов хорошо согласуются с кристаллохимическими представлениями о процессах фазообразования в изучаемой системе. В отсутствие имитаторов основными фазами слагающими матрицу выступают $\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{ZrO}_2 \cdot \text{TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$, $0,4\text{MgO} \cdot 1,2\text{Al}_2\text{O}_3$ и TiO_2 .

При добавлении катиона Sr^{2+} (ионный радиус 1,18 Å) в первую очередь возможно взаимодействие с ZrO_2 и TiO_2 с выделением SrZrO_3 и SrTiO_3 .

С увеличением содержания Sr^{2+} с 5 до 10 масс % происходит его дальнейшее связывание в SrTiO_3 что ведет к увеличению плотности материала. При повышении до 15 масс % в системе находятся SrO и SrTiO_3 . Материал SrTiO_3 насытился относительно SrO и часть его остается в свободном виде (Эффект Киркендалла-Френкеля).

При введении катионов Ba^{2+} (ионный радиус 1,35 Å) идет образование BaTiO_3 . С увеличением содержания Ba^{2+} до 10 масс % катион Ba^{2+} начинает образовывать фазу $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$.

Дальнейшее увеличение до 15 масс % катион Ba^{2+} реагирует с TiO_2 с образованием титаната бария, маннардита, $\text{Ba}_{1,12}(\text{Ti}_8\text{O}_{16})$.

Список литературы:

1. Юдинцев С. В., Стефановский С. В., Никольский М. С., Стефановская О. И., Никонов Б. С./ Браннерит, UTi_2O_6 : кристаллохимия, синтез, свойства, применение для иммобилизации актинидных отходов / радиохимия, 2016, т. 58, п 4, с. 289–301

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	7
«РЕНТГЕНОАМОРФНЫЕ» ВЕЩЕСТВА И МАТЕРИАЛЫ КАК ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ	
<i>Иевлев В.М.</i>	9
МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ ПУТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ	
<i>Ляхов Н.З., Удалова Т.А., Григорьева Т.Ф.</i>	10
РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ СИНТЕЗА НАНОПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ	
<i>Самохин А.В., Цветков Ю.В.</i>	11
ПОРОШКОВЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
<i>Альмов М.И.</i>	13
СТРУКТУРНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ С СИЛИЦИДНЫМ И КАРБИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ	
<i>Карнов М.И.</i>	14
МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ КВАЗИДВУМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	
<i>Петухов Д.И., Садилов И.С., Чернова Е.А., Лукашин А.В., Елисеев А.А.</i>	15
МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА И СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<i>Колобов Ю.Р.</i>	16
НАНОСТРУКТУРНЫЙ ДИЗАЙН МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ	
<i>Валиев Р.З.</i>	19
ФОРМИРОВАНИЕ СМАЧИВАЮЩЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛА И ЕГО РОЛЬ В СВОЙСТВАХ И ТЕХНОЛОГИИ РОСТА УЛЬТРАТОНКИХ СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ	
<i>Плюснин Н.И.</i>	19
СЕКЦИЯ 1	
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ	
СИНТЕЗА НАНОПОРОШКОВ	21
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ	
МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРЕВРАЩЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ И В МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	
<i>Мелихов И.В., Веденягин В.В., Аджиев С.З.</i>	23

ВЛИЯНИЕ СУЛЬФАТ ГРУПП НА ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТНЫЕ
БИОМАТЕРИАЛЫ

Хайрутдинова Д.Р., Гольдберг М.А., Смирнов С.В., Антонова О.С., Оболкина Т.О., Крохичева П.А., Баринов С.М. 24

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Ni-Pt

Варыгин А.Д., Попов А.А., Шубин Ю.В., Плюснин П.Е., Шарафутдинов М.Р. 26

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ ГАФНАТОВ ЕВРОПИЯ
И ЛАНТАНА И ИХ ФАЗОВАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Воротыло С., Еремеева Ж.В., Бардасова К.В., Капланский Ю.Ю., Ахметова А. 27

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДОВ ИТТРИЯ И
ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Крутикова И.В., Иванов М.Г. 28

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НАНОКРИСТАЛЛА

Магомедов М.Н. 29

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ УСЛОВИЯМИ СИНТЕЗА, СТРУКТУРНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ
НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ОЛОВА, ДОПИРОВАННЫХ 3d И 4f
ЭЛЕМЕНТАМИ

Подурец А.А., Колоколов Д.С., Фомкина А.С., Одегова В.С., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Вознесенский М.А., Осмоловская О.М. 31

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА
СОСТАВА SnO₂@ SnO₂ (TiO₂, ZnO): СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКУЮ
АКТИВНОСТЬ

Подурец А.А., Барр М., Осмоловский М.Г., Бобрышева Н.П., Бахманн Ж., Осмоловская О.М. 33

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ПОЛУЧЕНИЯ
УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Co-
Pt, Ni-Pt

Попов А.А., Шубин Ю.В. Плюснин П.Е., Бауман Ю.И., Мишаков И.В., Шарафутдинов М.Р. 34

О МЕХАНИЗМАХ КОАЛЕСЦЕНЦИИ И СПЕКАНИЯ НА НАНОМАСШТАБАХ

Самсонов В.М., Талызин И.В., Васильев С.А., Алымов М.И. 35

О РАЗМЕРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА РОСТА
(КРИСТАЛЛИЗАЦИИ) НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Небольсин В.А., Свайкат Н., Ожогина Л.В. 37

ПОЛУЧЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ НАНОПОРОШКОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ
ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТО

Синайский М.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Кирпичёв Д.Е., Астаиов А.Г., Фадеев А.А., Литвинова И.С., Цветков Ю.В. 39

ПОВЕДЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СВОБОДНЫХ НАНОПОРОШКОВ (Sm,Er) ₂ Fe ₁₇ -(N,H), ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОМОЛА	
<i>Терёшина И.С., Веселова С.В., Вербецкий В.Н., Каминская Т.П., Горбунов Д.И., Савченко А.Г.</i>	40
УПРАВЛЯЕМЫЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ НАНОПОРОШКОВ СИСТЕМЫ W-Ni-Fe В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА	
<i>Фадеев А.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Дорофеев А.А., Завертяев И.Д., Синайский М.А., Пахило-Дарьял И.О., Цветков Ю.В.</i>	41
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГРЕГАЦИИ НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ, НАПРАВЛЕННАЯ НА ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	
<i>Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Мелихов И.В.</i>	44
НОВЫЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА И МОДИФИКАЦИИ МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<i>Ахмадуллина Н.С., Скворцова Н.Н., Образцова Е.А., Степахин В.Д., Кончечков Е.М., Каргин Ю.Ф., Шишилов О.Н.</i>	45
ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ	
<i>Барбин Н.М., Якупова Л.В., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г.</i>	47
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ TiO ₂ -MoO ₃ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	
<i>Боборико Н.Е.</i>	49
РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦИРКОНО-АЛЮМО-ИТТЕРБИЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
<i>Волченкова В.А., Казенас Е.К., Андреева Н.А., Овчинникова О.А., Пенкина Т.Н., Родионова С.К., Смирнова В.Б., Фомина А.А., Подзорова Л.И., Ильичева А.А.</i>	50
МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕОЛИТА ZSM-5 ПУТЕМ ОБРАБОТКИ В ЩЕЛОЧИ И КИСЛОТЕ	
<i>Кузнецова А.В., Латыпова А.Р.</i>	52
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ ОРГАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КРЕМНЕЗЕМОВ	
<i>Лебедев М.Д., Латыпова А.Р., Румянцев Е. В., Долуда В.Ю.</i>	53
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРФОЛОГИЕЙ И РАЗМЕРНОСТЬЮ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПИРОЛИЗОМ СМЕСИ МОНОСИЛАНА И АЦЕТИЛЕНА	
<i>Новиков Н.Н., Ершов И.А., Пустовой В.И., Красовский В.И., Исхакова Л.Д., Чайков Л.Л.</i>	54
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И РАСЧЕТНЫЙ ПОДХОДЫ К ВАРЬИРОВАНИЮ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИАПАТИТА	
<i>Садецкая А.В., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Осмоловская О.М., Вознесенский М.А.</i>	56

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГРАФИТА В ПРОЦЕССЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ <i>Фазлитдинова А.Г., Тюменцев В.А.</i>	58
СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА ПУТЕМ СОЗДАНИЯ СТРУКТУР $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SnO}_2$ <i>Черепанова Н.Д., Абдуллин И.Р., Бобрышева Н.П., Осмоловский М.Г., Вознесенский М.А., Осмоловская О.М.</i>	59
СЕКЦИЯ 2 НАНОСТРУКТУРНЫЕ ПЛЕНКИ И ПОКРЫТИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ	63
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ ВЛИЯНИЕ РАСХОДА C_2H_4 И N_2 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПЛЁНОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ КАТОДА $\text{TaSi}_2\text{-ZrSiB}$ <i>Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Сытченко, А.Д., Бондарев А.В., Курбаткина В.В., Пацера Е.И., Левашов Е.А.</i>	65
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕНИЯ <i>Макаров А.В., Кориунов Л.Г., Черненко Н.Л.</i>	66
нелинейные электрические элементы, СОЗДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЗРАЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ АКЦЕПТОРНОЙ И ДОНОРНОЙ ПРИМЕСИ <i>Аракелян А.А., Овсепян Р.К., Агамалян Н.Р., Кафадарян Е.А., Мнацаканян Г.Г., Петросян С.И.</i>	68
ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ФОТОХРОМНЫХ НАНОЧАСТИЦ <i>Барачевский В.А.</i>	69
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОВПРОДОВ $\text{Fe}/(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ <i>Дворецкая Е.В., Кравчук К.С., Усейнов А.С., Коплак О.В.</i>	71
ДИСПЕРГИРОВАНИЕ СУБСТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ <i>Иевлев В.М., Прижимов А.С., Донцов А.И.</i>	73
МЕМРИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ВИСМУТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ <i>Зотов А.В., Колесников Н.Н., Борисенко Д.Н., Трофимов О.В., Тулин В.А.</i>	74
БИНАРНЫЕ И СЛОЖНЫЕ ХЕМОСТИМУЛЯТОРЫ И МОДИФИКАТОРЫ В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК НА InP И GaAs <i>Томина Е.В., Сладкопевцев Б.В., Ильясова Н.А., Кострюков В.Ф., Миттова И.Я.</i>	76
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРОЗИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МАХ ФАЗЫ Ti_3SiC_2 В ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЕ CO <i>Истомин П.В., Истомина Е.И., Нагуткин А.В., Грасс В.Э.</i>	77
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК, ВЫРАЩЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУР <i>Ковалёва А.С., Миттова И.Я., Сладкопевцев Б.В., Чернышова Н.В.</i>	78

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ SN-МАТРИЦЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ НАНОРАЗМЕРНЫМ ПОРОШКОВЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ $Al-CuO_x$, ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
<i>Лебедев Е.А., Сорокина Л.И., Камолов А.Р., Рязанов Р.М., Сыса А.В.</i>	80
ПОДХОДЫ К МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНОК	
<i>Мелихов И.В., Аджиев С.З., Рудин В.Н., Савинов В.П.</i>	82
УПРАВЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЕЙ И СОСТАВОМ ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ h -BN И ИХ СВОЙСТВА	
<i>Меренков И.С.</i>	83
ТЕРМИТНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ	
<i>Мяжков В.Г., Быкова Л.Е., Жигалов В.С.</i>	84
ВЛИЯНИЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ДОБАВОК НА МИКРОТВЁРДОСТИ ХРОМОВЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	
<i>Насрауи М., Литовка Ю.В.</i>	86
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	
<i>Насырбаев А.</i>	87
КОМБИНИРОВАННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА-МАРАНГОНИ И ЕЕ РОЛЬ В ОБРАЗОВАНИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ	
<i>Невский С.А., Грановский А.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е.</i>	89
МЕХАНИЗМЫ ИНАКТИВАЦИИ БАКТЕРИЙ НАНОЧАСТИЦАМИ Pt и Fe НА ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЯ $TiCaPSON$	
<i>Пономарев В.А., Швейко А.Н., Пермьякова Е.С., Попов З.И., Штанский Д.В.</i>	90
ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ WC-AG	
<i>Романов Д.А., Московский С.В., Соснин К.В., Филяков А.Д., Громов В.Е.</i>	92
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЁНОК ДИОКСИДА ТИТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕАКЦИЙ ГИДРОЛИЗА ПАРАМИ АММИАКА И ОКИСЛЕНИЯ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА	
<i>Скворцова И., Гулина Л.Б.</i>	93
ЦИКЛИЧЕСКИЕ УДАРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ БОРНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ Zr-B(N), Mo-B(N), Cr-B(N) И Ti-B(N)	
<i>Сытченко А.Д., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Погожев Ю.С.</i>	95
НЕРАВНОВЕСНОЕ ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПЛАВОВ FeTiB, FeZrN В ПЛЁНКАХ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ	
<i>Теджетов В.А., Шефтель Е.Н., Харин Е.В., Усманова Г.Ш., Кирюханцев-Корнеев Ф.В.</i>	96

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК SiO _x ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ <i>Терехов В.А., Теруков Е.И., Ундалов Ю.К., Барков К.А., Минаков Д.А., Занин И.Е., Сербин О.В., Середин П.В., Голощапов Д.Л., Трапезникова И.Н.</i>	98
СИНТЕЗ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФАЗ В СИСТЕМЕ Cu-Sn-S ОТЖИГОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ В ПАРАХ СЕРЫ <i>Буданов А.В., Власов Ю.Н., Котов Г.И., Руднев Е.В., Терновая В.Е.</i>	100
НОВЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ И ИХ СИНТЕЗ МЕТОДОМ ИОННОГО НАСЛАИВАНИЯ <i>Толстой В.П., Канева М.В., Левшакова А.С., Федотова Н.А.</i>	101
СТАТИЧЕСКИЕ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК СИСТЕМЫ Fe-Ti-B <i>Шефтель Е.Н., Харин Е.В., Теджетов В.А., Усманова Г.Ш., Бобровский С.Ю., Зезюлина П.А., Розанов К.Н., Кирюханцев-Корнеев Ф.В.</i>	102
АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫЕ ХРОМОМ – НАНОКОМПОЗИТНАЯ СТРУКТУРА И ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СУХОГО И ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ <i>Хруцов М.М., Буяновский И.А., Марченко Е.А., Самусенко В.Д., Антонова О.С.</i>	104
ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ СВЕРХУПРУГОГО ТВЕРДОГО УГЛЕРОДА ИЗ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРИТОВ ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ <i>Черногорова О.П., Дроздова Е.И., Лукина И.Н., Екимов Е.А., Прокопенко Д.А., Апостолова М.О.</i>	106
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРА НАНОКРИСТАЛЛА ТАНТАЛА <i>Магомедов М.Н.</i>	107
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИНДИЯ <i>Норченко Е.К., Семенча А.В., Батурова Л.П.</i>	108
ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МЕХАНИЗМУ ФРАНКА–ВАН ДЕР МЕРВЕ <i>Войцеховский А.В., Лозовой К.А., Винарский В.П., Дирко В.В.</i>	110
МНОГОСЛОЙНЫЕ УНИПОЛЯРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ HgCdTe ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ <i>Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Каширский Д.Е., Горн Д.И., Лозовой К.А., Дирко В.В.</i>	111
ИМПЕДАНС ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ С ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЕЙ <i>Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Копылова Т.Н., Десятеренко К.М.</i>	113

ТОНКИЕ ФОЛЬГИ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЯ С САМАРИЕМ ДЛЯ ДИФУЗИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДОРОДА <i>Горбунов С.В., Г.С. Бурханов, Кольчугина Н.Б., Рошан Н.Р., Филимонов Г.А.</i>	114
ВЛИЯНИЕ РАЗРУШАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НАНЕСЕНИИ ЗАЩИТНЫХ НАНОПЛЕНOK <i>Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Гылымбеков М.А.</i>	116
ЭФФЕКТ ОЧИСТКИ И НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕМБРАННОЙ ФОЛЬГИ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ <i>Иевлев В.М., Донцов А.И., Морозова Н.Б., Рошан Н.Р., Прижимов А.С., Горбунов С.В.</i>	117
КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ГОЛЬМИЯ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ МЕХАНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПЛЕНКАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ВЧМР <i>Дыбов В.А., Касьянов А.К., Белоногов Е.К.</i>	121
ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ БЕЛЫХ СЛОЕВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ <i>Жаворонкова Е.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е.</i>	123
ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ, ТОПОГРАФИИ И СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНOK ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ППК – CdS С РОСТОМ СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ <i>Иванова О.П., Криничная Е.П., Кривандин А.В., Завьялов С.А., Журавлева Т.С.</i>	124
ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПЛЕНOK СИЛИЦИДОВ ВА И ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ В Si(111) И Si(100) <i>Комилов Т.С., Клечковская В.В., Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Игамов Б.Д.</i>	126
ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ Zr-Mo-Si-B-(N) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ HR TEM <i>Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Логинов П.А., Левашов Е.А.</i>	127
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И MORFOЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНOK НА ОСНОВЕ ПОЛИ - n - КСИЛИЛЕНА С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ <i>Клименко И.В., Криничная Е.П., Завьялов С.А., Журавлева Т.С.</i>	129
СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГИБРИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНOK ППК–PbSe И ППК–ZnSe <i>Криничная Е.П., Иванова О.П., Завьялов С.А., Журавлева Т.С.</i>	130
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНOK ИНТЕРКАЛИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОНОСЛОЕВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ <i>Криничная Е.П., Иванова О.П., Голубь А.С., Лененко Н.Д., Журавлева Т.С.</i>	132
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК ПОВЕРХНОСТИ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ <i>Лежнин Н.В., Чалина М.А., Макаров А.В., Осинцева А.Л.</i>	133

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ОТКЛИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ $\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{V}_{20,2}$ И $\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{10,3}\text{V}_{17}$ ПОСЛЕ ОТЖИГА <i>Пермякова И.Е., Дмитриевский А.А., Блинова Е.Н.</i>	135
ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ TRIP/TWIP СТАЛЕЙ <i>Просвирнин Д.В., Ларионов М.Д., Колмаков А.Г., Ларионова А.В., Пруцков М.Е., Пивоварчик С.В.</i>	137
ОЦЕНКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВНЕДРЕНИЕМ ИНДЕНТОРА ВИККЕРСА ДЛЯ КЕРАМИКИ <i>Колмаков А.Г., Просвирнин Д.В., Пруцков М.Е., Ларионов М.Д., Ларионова А.В., Пивоварчик С.В.</i>	138
ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПЛЁНОК СИЛИЦИДОВ Ва И ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ В Si(111) И Si(100) <i>Камилов Т.С., Ключковская В.В., Рысбаев А.С., Орехов А.С., Хужаниёзов Ж.Б., Игамов Б.Д.</i>	140
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК Li-Nb-O В ПРОЦЕССЕ ВЧМР <i>Сериков Д.В., Дыбов В.А., Касьянов А.К., Белоногов Е.К.</i>	141
СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ И ТВЕРДОГО СПЛАВА КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ В МАТРИЦЕ ОКСИДОВ КРЕМНИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Строзова А.С., Ковалевский А.А.</i>	143
КРАЙ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПЛЕНОК НИОБАТА ЛИТИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФОТОННОГО ОТЖИГА <i>Сумец М.П., Белоногов Е.К., Иевлев В.М., Дыбов В.А., Сериков Д.В.</i>	145
ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ Ge/Si СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ Si/SiO ₂ /Si (100) <i>Сушков А.А., Павлов Д.А., Денисов С.А., Чалков В.Ю.</i>	147
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Zr-Si-V <i>Сытченко А.Д., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов Е.А.</i>	148
СУБСТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР <i>Юраков Ю.А., Пешков Я.А., Ивков С.А., Ситников А.В., Домашевская Э.П.</i>	150
СЕКЦИЯ 3 ОБЪЕМНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ	153
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ И ДЕФОРМАЦИИ <i>Аронин А.С., Абросимова Г.Е.</i>	155

ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС СДВИГА В ОБЪЕМНОМ АМОРФНОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ <i>Хрипливец И.А., Глезер А.М., Сундеев Р.В.</i>	156
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ КОМПОНЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ <i>Абросимова Г.Е., Аронин А.С.</i>	157
НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ОСОБО ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ И НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ СВЯЗКОЙ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА <i>Авдеевко Е.Н., Зайцев А.А., Коняшин И.Ю., Замулаева Е.И., Левашов Е.А.</i>	159
МЕХАНИЗМЫ ФРАГМЕНТАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ С ГЦК, ОЦК И ГПУ РЕШЕТКОЙ ПРИ СВОБОДНОМ ИЗГИБЕ <i>Аксенов Д.А., Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Рааб А.Г.</i>	160
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ ИЗ СПЛАВА Cu-0,6Cr, ПОДВЕРЖЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ <i>Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Аксенов Д.А., Рааб А.Г.</i>	162
ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ СПЛАВОВ Al-Mg ₂ Si С ДОБАВКАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ <i>Бочвар Н.Р., Рыбальченко О.В., Леонова Н.П., Табачкова Н.Ю., Рыбальченко Г.В., Рохлин Л.Л.</i>	163
ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНОГО ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА <i>Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.</i>	165
ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАНОСТРУКТУРОВАННОСТИ В КАМЕННОУГОЛЬНОМ ПЕКЕ, ОКИСЛЕННОМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОГРАФИТА <i>Дмитриев А.В., Пыхова Н.В., Кульницкий Б.А.</i>	166
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Ni-Mn- In ПОСЛЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ <i>Калетина Ю.В., Калетин А.Ю., Пилюгин В.П.</i>	167
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РКУП В ОБОЛОЧКЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ Ti-Ni <i>Карелин Р.Д., Хмелевская И.Ю., Комаров В.С., Андреев В.А., Перкас М.М., Юсупов В.С., Прокошкин С.Д.</i>	169

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ НИКЕЛИДА ТИТАНА <i>Комаров В.С., Хмелевская И.Ю., Карелин Р.Д., Кавалла Р., Юсупов В.С., Прокошкин С.Д.</i>	171
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОРИСТОЙ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКЕ ГИДРОКСИАПАТИТА В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ <i>Иевлев В.М., Костюченко А. В., Кочлар Г.С.</i>	172
СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНОЙ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ $Me^{IV}B_2-(Me^{IV}, Mo)Si_2$, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДАМИ СВС И ГП <i>Лемешева М.В., Погожев Ю.С., Потанин А.Ю., Левашов Е.А., Вершинников В.И., Рупасов С.И.</i>	173
СКЛОННОСТЬ К ЭПИТАКСИАЛЬНОМУ РОСТУ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ В СИСТЕМЕ <i>Логонова И.С., Сазера М.В., Солонин А.Н.</i>	175
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ 07Г2МФБ И Ст.20 ЗА СЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ <i>Лунев В.А., Рыбальченко О.В., Беляков А.Н., Долженко А.С., Токарь А.А., Морозов М.М., Юсупов В.С., Добаткин С.В.</i>	177
ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА ZX11 <i>Мартыненко Н.С., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В., Темрашева Д.Р., Просвирнин Д.В., Терентьев В.Ф., Колтыгин А.В., Белов В.Д., Морозов М.М., Юсупов В.С., Добаткин С.В., Эстрин Ю.З.</i>	178
ВЛИЯНИЕ РАСПАДА ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В НИЗКОЛЕГИРОВАННОМ МЕДНОМ СПЛАВЕ Cu-Cr-Zr <i>Морозова А. И., Ткачев М. С., Беляков А. Н., Кайбышев Р.О.</i>	180
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>Неласов И.В., Колобов Ю.Р., Липницкий А.Г.</i>	181
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛЕАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ <i>Остроумова Г.М., Орехов Н.Д., Стегайлов В.В.</i>	183
ЭФФЕКТ ВОЗРАСТАНИЯ МОДУЛЯ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ ДО 600 ГПА ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРА НАНОАЛМАЗА ДО 2-5 НМ <i>Попов М.Ю., Чуркин В.Д., Хабибрахманов А. И., Сорокин П.Б., Бланк В.Д.</i>	184
ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ, ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ СВС-КЕРАМИКИ <i>Потанин А.Ю., Погожев Ю.С., Рупасов С.И., Швындина Н.В., Левашов Е.А.</i>	185

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРНУЮ ТРАНСФОРМАЦИЮ И УПРОЧНЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ AISI 304L <i>Рааб А.Г., Рыбальченко О.В., Добаткин С.В., Рааб Г.И., Ла П.</i>	187
ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ <i>Рыбальченко О.В., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.Ю., Мартыненко Н.С., Бочвар Н.Р., Рыбальченко Г.В., Табачкова Н.Ю., Токарь А.А., Рааб Г.И., Добаткин С.В.</i>	188
ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СПЛАВА Cu-7%Cr ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ <i>Мартыненко Н.С., Страумал П.Б., Бочвар Н.Р., Аксенов Д.А., Рааб Г.И., Добаткин С.В.</i>	189
УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ КАРБИДОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НАНОПОРОШКОВ СИСТЕМЫ <i>Терентьев А.В., Благовещенский Ю.В., Исаева Н.В., Нохрин А.В., Ланцев Е.А., Андреев П.В., Сахаров Н.В.</i>	191
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНА И НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОГО И ЛАЗЕРНОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ <i>Токмачева-Колобова А.Ю., Прокошкин С.Д., Манохин С.С., Колобов Ю.Р.</i>	192
ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА КРУПНОЗЕРНИСТЫЙ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ СПЛАВ Ti-50,8 ат.% Ni <i>Чуракова А.А., Гундеров Д.В.</i>	194
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТИНОВЫХ И РОДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ, НАНЕСЕННЫХ НА ОКСИД АЛЮМИНИЯ БАЙЕРИТНОГО РЯДА <i>Шефер К.И., Рогожников В.Н., Ковтунова Л.М., Стонкус О.А., Ларина Т.В., Четырин И.А., Супрун Е.А.</i>	195
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОРОШКОВ МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА Nd ₁₅ Fe ₇₈ B ₇ <i>Абдурахмонов О.Э., Юртов Е.В., Савченко А.Г., Савченко Е.С.</i>	197
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РКУП НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ <i>Аксенов Д.А., Рааб Г.И.</i>	198
КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК <i>Гурьянов С.А.</i>	199
СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ВЫСОКОКОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ В СИСТЕМЕ <i>Зайцев А.А., Авдеев Е.Н., Коняшин И.Ю., Замулаева Е.И., Левашов Е.А.</i>	201

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА НАПОЛНЕННОГО НАНОАЛМАЗАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА <i>Кузнецов Н.М., Вдовиченко А.Ю., Белоусов С.И., Чвалун С.Н., Швидченко А.В., Ююина Е.Б., Вуль А.Я.</i>	202
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЧАСТИЦ СЛОИСТЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СРЕДЕ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА <i>Кузнецов Н.М., Бакиров А.В., Белоусов С.И., Чвалун С.Н.</i>	204
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ <i>Манохин С.С., Токмачева-Колобова А.Ю., Карлагина Ю.Ю., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В., Колобов Ю.Р.</i>	205
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК <i>Осотова О.И., Ильина М.В., Гурьянов А.В., Рудык Н.Н., Ильин О.И.</i>	207
УПРОЧНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПРИ РАСПАДЕ ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА СПЛАВОМ МАГНИЯ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ ИТТРИЕВОЙ ГРУППЫ <i>Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Табачкова Н.Ю., Тарытина И.Е., Лукьянова Е.А.</i>	208
СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КАРБОКСИЛАТОВ НИКЕЛЯ (II) С АНИОНАМИ НАСЫЩЕННЫХ МОНОКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ – ПРЕКУРСОРОВ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ <i>Сапрыкин Р.В., Семенов С.А., Джардималиева Г.И.</i>	210
ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ IN VITRO ПРОТИВ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК МАГНИЕВОГО СПЛАВА WE43 <i>Мартыненко Н.С., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В., Темралиева Д.Р., Серебряный В.Н., Рааб Г.И., Добаткин С.В., Эстрин Ю.З.</i>	211
ВЛИЯНИЕ МАЛОГО СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ <i>Шурыгина Н.А., Черетаева А.О., Глезер А.М., Дьяконов Д.Л., Медведева А.Д., Сундеев Р.В., Томчук А.А.</i>	213
НАНОПОРОШКОВЫЙ НИКЕЛЬ С ТРИМОДАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ, КОНСОЛИДИРОВАННЫЙ МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ-РАСТВОРЕНИЯ <i>Шустов В.С., Зеленский В.А., Анкудинов А.Б., Гнедовец А.Г., Алымов М.И.</i>	214
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОПОРОШКА ЖЕЛЕЗА НА СПЕКАЕМОСТЬ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА Fe-30Cr-10Co <i>Шустов В.С., Зеленский В.А., Анкудинов А.Б., Устюхин А.С., Милаев И.М.</i>	216

СЕКЦИЯ 4	
НАНОКОМПОЗИТЫ	219
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕТАЛЛОВ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ <i>Блантер М.С., Борисова П.А., Бражский В.В., Ляпин С.Г., Филоненко В.П.</i>	221
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ОКСИДНЫХ 3D НАНОКОМПОЗИТОВ: ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ <i>Ходан А.Н., Быков А.В., Коновко А.А., Мартынов А.Г., Бирин К.П., Горбунова</i> <i>Ю.Г., Цивадзе А.Ю.</i>	222
ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ НА 4-ХВАЛЕНТНЫЕ КАТИОНЫ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ГИДРОКСИАПАТИТОВЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Антонова О.С., Гольдберг М.А., Оболкина Т.О., Смирнов С.В., Баринов С.М.</i>	224
ЭФФЕКТ СПОНТАННОГО СВРАЧИВАНИЯ АТОМНО-ТОНКИХ ГИБРИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ <i>Куртина Д.А., Козина Л.Д., Гаршев А.В., Васильев Р.Б.</i>	225
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА <i>Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., Козаков А.Т., Никольский А.В.</i>	227
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩЕГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ В2 <i>Капланский Ю.Ю., Левашов Е.А., Коротыцкий А.В., Бычкова М.Я.</i>	230
ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ <i>Кузнецова А.С., Ермакова Л.Э., Анфимова И.Н., Антропова Т.В.</i>	231
ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ И ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ <i>Ланцев Е.А., Нохрин А.В., Болдин М.С., Попов А.А.</i>	232
ГРАФЕН, ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЙ АРОМАТИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ: СИНТЕЗ, ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЕ В ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ <i>Липовка А.А., Родригес Р.Д., Халелов А., Постников П.С., Дорожко Е.В., Амин</i> <i>И., Мурастов Г., Чен Дж., Шен В., Трусова М.Е., Чехими М., Шермет Е.С.</i>	234
ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ TiAl/Ti3Al <i>Логинов П.А., Капланский Ю.Ю., Пацера Е.И., Авдеенко Е.Н., Левашов Е.А.</i>	235
МАГНИТОАКТИВНЫЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ЖЕЛЕЗО, КОБАЛТ И НИКЕЛЬ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ. <i>Мусатова В.Ю., Семенов С.А., Джардималиева Г.И., Смирнова О.Д.</i>	237

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СПЕКАНИЕ КЕРАМИКИ $ZrO_2-Al_2O_3$, СОДЕРЖАЩЕЙ СИЛИКАТ НАТРИЯ И ОКСИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ <i>Оболкина Т.О., Гольдберг М.А., Антонова О.С., Смирнов С.В., Качанов Г.П., Егоров А.А., Баринов С.М.</i>	238
ГИБРИДНЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ <i>Румянцева М.Н., Насриддинов А.Ф., Токарев С.Д., Федорова О.А., Гаськов А.М.</i>	240
СИНТЕЗ МИКРОТРУБОК ЛЕПИДОКРОКИТА С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА <i>Стрыканова В.В., Гулина Л.Б., Толстой В.П.</i>	242
МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ W, M <i>Удалова Т.А., Восмериков С.В., Григорьева Т.Ф., Девяткина Е.Т., Ляхов Н.З.</i>	243
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
НАНОРАЗМЕРНЫЕ ОКСИДЫ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ С ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ <i>Александрова Г.П., Сапожников А.Н., Сухов Б.Г.</i>	246
КОМПОЗИЦИОННЫЕ ФОТОННО-ПЛАЗМОННЫЕ ПЛЕНКИ СО СТРУКТУРОЙ ИНВЕРТИРОВАННОГО ОПАЛА КАК НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ГКР <i>Аиууров М.С., Еремина Е.А., Абдусаторов Б.А., Климонский С.О.</i>	247
НАНОСТРУКТУРНЫЕ ГЕКСАЦИАНОФЕРАТЫ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ АСИММЕТРИЧНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ <i>Кречетов И.С., Берестов В.В., Астахов М.В.</i>	249
ВЫБОР ДАВЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАЦИИ НАНОПОРОШКОВ <i>Гуцаленко Ю.Г., Геворкян Э.С.</i>	251
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ БРОМИДОМ СЕРЕБРА И МЕДИ <i>Гирсова М.А., Головина Г.Ф., Куриленко Л.Н., Антропова Т.В.</i>	252
ВЛИЯНИЕ ЛИГАНДОВ НА КАТИОННЫЙ ОБМЕН АТОМНО-ТОНКИХ НАНОЧАСТИЦ CDSE <i>Графова В.П., Платонов В.Б., Дорофеев С.Г., Васильев Р.Б.</i>	254
СЕМИКАРБИДНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАТАХ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА <i>Геворкян Э.С., Руцки М., Гуцаленко Ю.Г.</i>	255
ОСОБЕННОСТИ АТОМНОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ <i>Домашевская Э.П., Буйлов Н.С., Гуда А.А., Тригуб А.Л., Чукавин А.И., Ситников А.С.</i>	257
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ НА СТРУКТУРУ ПЛЕНОК CdS <i>Иванова О.П., Криничная Е.П., Кривандин А.В., Завьялов С.А., Журавлева Т.С.</i>	258

ПРИРОДА ВЫСОКОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ КВАЗИАМОРФНОГО СПЛАВА $Fe_{78}P_{20}Si_2$ <i>Канныкин С.В., Ильинова Т.Н.</i>	260
ДРОБЛЕНИЕ И УПЛОТНЕНИЕ ЗЕРЕН MgV_2 КЕРНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН <i>Михайлов Б.П., Михайлова А.Б., Никулин В.Я., Силин П.В., Боровицкая И.В.</i>	261
ВЫСОКОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННОГО МЕДЬЮ КВАЗИДВУМЕРНЫХ НАНОЧАСТИЦ CDSE ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ БЕЛОГО СВЕТА <i>Саиджонов Б.М., Зайцев В.Б., Васильев Р.Б.</i>	263
СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ЖЕЛЕЗА И УГЛЕРОДА <i>Старчиков С.С., Баскаков А.О., Любутин И.С., Фролов К.В., Фунтов К.О., Давыдов В.А.</i>	264
СЕКЦИЯ 5 ИННОВАЦИОННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АТТЕСТАЦИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ	267
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОД-СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕРЕН МАГНИТОВ <i>Кольчугина Н.Б., Бурханов Г.С., Скотницова К., Прокофьев П.А., Дормидонтов Н.А., Сеган Т., Курса М., Юрица Я., Бакулина А.С., Рушинов Д.А.</i>	269
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОВОЛОКОН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ <i>Платонов В.Б., Владимирова С.А., Румянцева М.Н., Гаськов А.М.</i>	270
КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ БРОНЗОВОГО КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ <i>Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Аксенов Д.А., Рааб А.Г., М. Янечек</i>	272
ОТ НАНО- К ФЕМТО И ОБРАТНО. О ВОЗМОЖНЫХ ПУТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОКОНДЕНСИРОВАННОЙ МАТЕРИИ <i>Рязанцев Г.Б., Высоцкий В.И., Лавренченко Г.К., Недовесов С.С., Бекман И.Н., Бунцева И.М.</i>	273
НОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ БЕСКИСЛОРОДНОГО ГРАФЕНА И ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ <i>Клименко И.В., Трусова Е.А., Щеголихин А.Н., Юрина Л.В., Лобанов А.В.</i>	275
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ВИСМУТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ <i>Кожмякин Г.Н., Кийко А.В., Кийко С.А., Артемов В.В.</i>	277
НАНОЧАСТИЦЫ ОКСИДА ТАНТАЛА КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ОНКОТЕРАНОСТИКИ <i>Кошечкина Е.Д., Назаровская Д.А., Коробанова А.О., Морозов В.Н., Колыванова М.А., Кривошапкин П.В.</i>	278

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ В СИСТЕМАХ <i>Маклакова А.В., Власова М.А., Волкова Н.Е., Черепанов В.А.</i>	280
БИОПРЕПАРАТЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА И СЕЛЕНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И МЕДИЦИНЕ <i>Федотов М.А., Фолманис Г.Э., Гифер П.К., Савченко Г.Д.</i>	281
ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННЫЙ ПИРОЛИТИЧЕСКИЙ ГРАФИТ КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПОДЛОЖКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Чешев Д.Л., Родригез Р.Д., Мурастов Г., Туан Хоанг Тран, Матковиц А., Шеремет Е.С.</i>	282
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ДЕГИДРИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОПАНА НА КАТАЛИЗАТОРЕ <i>Никитина Н.А., Твердохлеб Д.А., Голосная М.Н., Агафонов А.А.</i>	284
ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКОХИМИИ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАСПЛАВОВ ТРИАДЫ ЖЕЛЕЗА, СОДЕРЖАЩИХ ПАВ И ТУГОПЛАВКИЕ ЭКЗОГЕННЫЕ НАНОФАЗЫ <i>Бурцев В.Т., Анучкин С.Н., Самохин А.В., Алымов М.И.</i>	285
ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПСЕВДО- α -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА <i>Андреев П.В., Гудзь Д.А., Сметанина К.Е., Шадрина Я.С.</i>	287
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПЛАКИРОВАННОГО ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВЫМ ГРАНАТОМ <i>Дрозжилкин П.Д., Болдин М.С., Алексеева Л.С., Андреев П.В., Каразанов К.О., Сметанина К.Е., Балабанов С.С.</i>	288
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ ВИСКОЗЫ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ <i>Ельчанинова В.А., Осмова М.А., Находнова А.Н., Самойлов В.М.</i>	290
УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ГАЛЛИЯ <i>Кожмякин Г.Н., Белов Ю.С., Труфанова М.К.</i>	292
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МЕТАЛЛОКСИД/ПОЛИСАХАРИДНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭМУЛЬСИЙ ПИКЕРИНГА <i>Михайлов В.И., Торлопов М.А., Мартаков И.С., Васенева И.Н., Ситников П.А., Коваль Л.А., Земская Н.В., Падерин Н.М., Кошечкина Е.Д.</i>	293
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА АТТЕСТАЦИИ РАВНОМЕРНОСТИ ПРОГРЕВА УВ <i>Осмова М.А., Самойлов В.М., Находнова А.Н., Вербец Д.Б.</i>	295
ПОСЛОЙНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ WC + 10% C <i>Сметанина К.Е., Андреев П.В., Ланцев Е.А., Востоков М.М.</i>	296

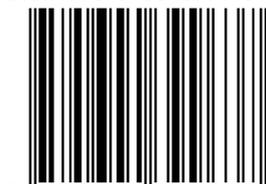
ОБРАЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ И СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМЕ
Шубабко О.Э., Вартанян М.А., Беляков А.В. 298

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

VII Всероссийская конференция по наноматериалам

Материалы публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-6043996-3-7



9 785604 399637