



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ



Институт физики металлов
имени М. Н. Михеева
Уральского отделения
Российской академии наук

Научный совет РАН по физике конденсированных сред

ОДИННАДЦАТЫЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

**8-12 октября 2018
г. Екатеринбург**

Сборник тезисов одиннадцатого научно-практического семинара
«Актуальные проблемы физики конденсированных сред»,
8-12 октября 2018 год, Екатеринбург

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Российская академия наук
- Научный Совет РАН по физике конденсированных сред
- Уральское отделение РАН
- Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения РАН

При финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований

Научно-практический семинар, традиционно совмещённый с выездной сессией Научного Совета РАН по физике конденсированных сред, включает доклады по широкому кругу проблем физики конденсированных сред с опорой на научную и организационную деятельность всех секций Научного Совета: теории твёрдого тела, нанотехнологий и наноматериалов, физики кристаллов, физики высоких давлений, магнетизма, физики сегнетоэлектриков и диэлектриков, физики поверхности, неразрушающих физических методов контроля, исследований конденсированных сред ядерно-физическими методами и физики прочности и пластичности. Представлены как результаты экспериментов, так и теоретического моделирования, а также новые экспериментальные методы и технологические процессы. Большая часть исследований по представленным проблемам поддерживается РФФИ. Об актуальности перечисленных направлений свидетельствуют большое число ежегодных международных конференций, специализированных научных изданий и международных исследовательских проектов, посвященных этим проблемам.

<http://sovets.fks.issp.ras.ru/>

ISBN 978-5-9500855-3-6

(с) Уральское отделение Российской академии наук, 2018

Сопредседатели оргкомитета

Профессор, доктор физ.-мат. наук Б.Б. Страумал
Академик РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук Н.В. Мушников

Сопредседатели программного комитета

Член-корреспондент РАН В.В. Кведер
Академик РАН Н.В. Мушников

Программный комитет:

Чл. корр. РАН В.В. Кведер – сопредседатель
Академик РАН Н.В. Мушников – сопредседатель
Проф., д. ф.-м. н. А.А. Левченко – зам. председателя
Проф. д.ф.-м.н. В.Е. Антонов
Проф. д.ф.-м.н. В.И. Бетехтин
Проф. д.ф.-м.н. А.М. Глезер
Проф. д.ф.-м.н. К.Н. Ельцов
Чл. корр. РАН М.Ю. Каган
Чл. корр. РАН М.И. Карпов
Чл. корр. РАН М.В. Ковальчук
Проф. д.т.н. Ю.К. Новоселов
Акад. РАН В.В. Осико
Акад. РАН А.С. Сигов
Акад. РАН В.В. Устинов
Акад. РАН М.В. Садовский
Чл. корр. РАН А.Б. Борисов

Организационный комитет

Проф., д. ф.-м. н. Б.Б. Страумал – сопредседатель
Академик РАН Н.В. Мушников – сопредседатель
Проф., д. т. н. В.В. Попов – зам. председателя
К. ф.-м. н. И.Н. Чугуева – зам. председателя
Д.ф.-м.н. А.П. Носов
Д.ф.-м.н. М.А. Коротин
Д.ф.-м.н. В.Н. Костин
К.ф.-м.н. И.Ю. Арапова
К.ф.-м.н. Е.Г. Герасимов

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА НА УРАЛЕ: НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИФМ УРО РАН

Мушников Н. В., Устинов В. В.

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
mushnikov@imp.uran.ru*

В докладе приведен краткий исторический обзор развития научных направлений ИФМ УрО РАН от момента его создания до настоящего времени.

Уральский физико-технический институт основан в 1932 г. на базе выделенной из Ленинградского физико-технического института группы из 32 сотрудников, многие из которых стали впоследствии всемирно известными учеными. Первые направления научной деятельности института были ориентированы на поддержку металлургической и машиностроительной промышленности Урала и включали изучение магнитных и электрических явлений, фазовых превращений в сплавах, пластической деформации металлов, электронографию. Первым директором института был назначен научный аспирант Михаил Николаевич Михеев, который возглавлял институт (с перерывами) до 1986 года. На базе УралФТИ в 1939 г. был создан Институт металловедения, металлофизики и металлургии, который в 1945 г. был преобразован в Институт физики металлов.

Направления научной деятельности института, заложенные при его создании, развиваются и трансформируются с развитием физики твердого тела. Однако неизменным остается уникальное сочетание электронной физики, магнетизма и физики прочности и пластичности. Во всем мире известны созданные С.П. Шубиным и С.В. Вонсовским полярная и s-d обменная модели металла, в развитие которых в институте выполнены многочисленные работы по теории и моделированию электрических, магнитных и тепловых свойств переходных металлов, их сплавов и соединений. Основоположник магнитного материаловедения на Урале Я.С. Шур внес неоспоримый вклад в создание и совершенствование трансформаторных сталей, экспериментальное развитие микромагнетизма, разработку высокоэнергоемких постоянных магнитов. В работах В.Д. Садовского и его школы предложены и развиты представления о двухстадийности фазовой перекристаллизации и структурной наследственности в сталях, внесшие существенный вклад в теорию термической обработки. Работами Р.И. Януса, М.Н. Михеева и их учеников созданы физические основы магнитной дефектоскопии и магнитного структурного анализа ферромагнитных материалов.

Сегодня ИФМ УрО РАН – крупнейший академический институт в Уральском федеральном округе и ведущий в России в области исследования физики магнитоупорядоченных материалов, металлических наноструктур, физического металловедения, углеродных наноматериалов, теории сильнокоррелированных электронных систем, радиационной физики твердого тела. В настоящее время численность института составляет 727 человек, из них 417 – научные сотрудники.

Материально-техническая база института позволяет получать и исследовать конденсированные вещества (металлы, полупроводники, композиты и др.) в условиях воздействия температур (от 1.5 К до 4000 К), давлений (от 10^{-11} мм рт.ст. до 400 тыс. атм), постоянных (до 12 Тесла) и импульсных (до 40 Тесла) магнитных полей, нейтронного (до $5 \cdot 10^{13}$ н/см²), электронного (до 5 МэВ), ионного (до 2 МэВ) и лазерного излучений; изучать химический состав и кристаллическую, магнитную, электронную структуры в макро- и микрообъемах, в том числе на межкристаллитных и внутрикристаллитных поверхностях раздела; определять разнообразные характеристики физических и физико-механических свойств конденсированных веществ.

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ НИКЕЛЯ, ХРОМА И ЖЕЛЕЗА НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ С ДИСЛОКАЦИЯМИ И РОСТОВЫМИ ВАКАНСИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Кведер В. В., Хорошева М. А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
твердого тела Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл., Россия
kveder@issp.ac.ru*

Широкое применение дешевого мульти-кристаллического кремния, содержащего значительное количество дислокаций и точечных дефектов и примесей, для производства солнечных элементов стимулирует интерес к исследованию взаимодействия примесей с дислокациями [1] и их влияния на электронные свойства кремния. Конечная цель таких исследований – разработка методов «инженерии дефектов» для такого кремния, т.е. нахождения оптимальных технологических условий термообработок и геттерирования, позволяющих изготавливать из такого кремния высокоэффективные солнечные элементы.

В данной работе мы исследовали взаимодействие атомов никеля, железа и хрома с дислокациями, используя емкостную спектроскопию глубоких уровней (DLTS) и измерения тока, наведенного лазерным излучением (LBIC) для контроля электрической активности дефектов и дислокаций до и после диффузии указанных примесей.

Нами было показано, что атомы никеля, собранные на дислокации, значительно увеличивают рекомбинационную активность дислокаций, тогда как атомы золота на дислокациях электрически неактивны [2]. Что касается атомов железа и хрома, то ситуация несколько иная. После диффузии хрома и железа электрон – дырочная рекомбинация на дислокациях сильно увеличивается (см. Рис.1), но это связано с образованием преципитатов силицида железа и хрома на дислокациях. В этом случае электрическая активность дислокаций сильно зависит от размера преципитатов, который определяется скоростью охлаждения образца.

Установлено также, что электрически неактивные ростовые вакансионные NV дефекты в образцах вступают в реакцию с атомами хрома, формируя центры зарождения преципитатов хрома. Размер и плотность преципитатов сильно зависят от концентрации ростовых вакансионных дефектов и скорости охлаждения образца после диффузии хрома.

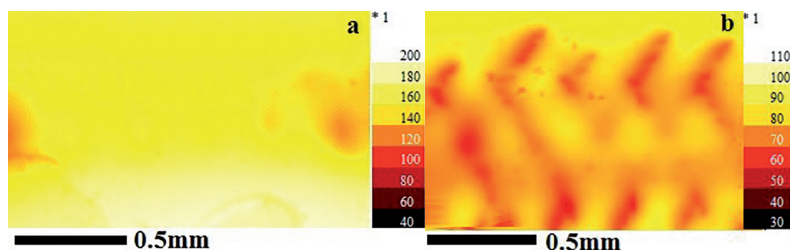


Рис.1. Карты диффузионной длины дырок, измеренные в одном и том же месте одного и того же образца n-Si с дислокациями: (а) до диффузии хрома, (б) после диффузии хрома при 850°C и медленного охлаждения.

- [1]. Michael Seibt and Vitaly Kveder - Chapter 4: in the book "Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications", Edited by Sergio Pizzini, Wiley (John Wiley & Sons Ltd), ISBN 9780470661116, published in 2012.
[2]. V. Kveder, M. Khorosheva, M. Seibt, Solid State Phenomena **242**, 147-154 (2016).

ЭМИССИОННАЯ МЕССБАУЭРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

Попов В. В.

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
vpopov@imp.uran.ru*

Наиболее широко применяемой методикой мессбауэровской спектроскопии является абсорбционная ядерная гамма-резонансная (ЯГР) спектроскопия. Однако ее использование для исследования границ зерен (ГЗ) ограничено в силу ряда причин. Эмиссионная ЯГР спектроскопия, в которой образец служит источником γ -квантов, предоставляет больше возможностей.

Метод исследования ГЗ, основанный на использовании ускоренной диффузии по ГЗ в сочетании с эмиссионной мессбауэровской спектроскопией, разработан в лаборатории диффузии ИФМ УрО РАН [1]. С тех пор выполнено большое количество мессбауэровских исследований границ зерен в крупно- и ультрамелкозернистых поликристаллических металлических материалах [2]. На основании этих исследований, в частности, разработана уточненная модель зернограничной диффузии, которая адекватно описывает данные как диффузионного, так и мессбауэровского эксперимента [3]. В настоящей работе сделан краткий обзор возможностей использования эмиссионной ЯГР спектроскопии для исследования ГЗ и полученных к настоящему времени результатов.

Наиболее широкие возможности имеются при исследовании ГЗ рекристаллизационного происхождения в крупнозернистых материалах. В этом случае на основании результатов эмиссионной ЯГР спектроскопии можно судить о механизме зернограничной диффузии, определить температурную зависимость коэффициента зернограничной сегрегации, сделать определенные заключения о составе ГЗ и приграничных областей кристаллитов.

Сложнее использовать эмиссионную ЯГР спектроскопию для исследования ГЗ в ультрамелкозернистых (УМЗ) материалах, поскольку нельзя исключить миграции ГЗ и протекания в них процессов возврата уже в процессе приготовления образцов-источников. Тем не менее, проведенные нами исследования показывают, что применение эмиссионной ЯГР спектроскопии оказалось исключительно полезным для выявления особого, деформационно-модифицированного («неравновесного») состояния ГЗ в УМЗ материалах, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД), и оценки отклонения состояния таких ГЗ от состояния ГЗ рекристаллизационного происхождения [4]. В частности, показано, что применение эмиссионной ЯГР спектроскопии позволяет выявить наличие избыточного свободного объема в таких ГЗ, что является одним из основных признаков неравновесных границ. Заключение о неравновесном характере ГЗ в материалах, полученных ИПД, сделанное на основании мессбауэровских исследований, подтверждается результатами исследования зернограничной диффузии [5].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема “Спин”, номер госрегистрации № АААА-А18-118020290104-2), при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект 18-10-2-37).

- [1]. V. N. Kaigorodov and S. M. Klotsman. Phys. Rev. B. 49 (1994) 9374–9399.
- [2]. V.V. Popov. Phys. Met. Metallog. 113(13) (2012) 1257–1289.
- [3]. V.V. Popov. Solid State Phenom. 138 (2008) 133–144.
- [4]. В. В. Попов, А. В. Сепреев, А. В. Столбовский. ФММ. 118(4) (2017) 372–379.
- [5]. В. В. Попов, А. В. Сепреев. ФММ. 118(11) (2017) 1149–1154.

ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЭВТЕКТИК В СИСТЕМАХ Nb-Nb₃Si И Nb-Nb₂C

Карпов М. И.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия
karpov@issp.ac.ru

Создание новых более тугоплавких жаропрочных материалов для газотурбинных двигателей является одной из важнейших задач современного материаловедения. Это связано с тем, что используемые в настоящее время для этих целей никелевые суперсплавы имеют низкую температуру плавления ~1400°C, которая ограничивает их собственную максимальную рабочую температуру интервалом 1100-1150°C и температуру газа на входе в турбину значениями 1300-1400°C. Повышение температуры газа на входе в турбину является очень важным как с технической точки зрения, поскольку чем выше температура газа в двигателе, тем выше термодинамическая эффективность его работы, так и с экологической, поскольку чем выше температура газа в двигателе, тем меньше загрязнение атмосферы оксидами углерода и нитридами.

В этой связи значительный интерес представляют сплавы на основе системы Nb-Si и Nb-C. Температура плавления эвтектики Nb-Nb₃Si составляет 1920°C. Температура эвтектики в системе Nb-Nb₂C составляет 2339°C. Если исходить из того, что собственная рабочая гомологическая температура никелевых сплавов составляет ~0,8 (отношение собственной рабочей температуры в градусах Кельвина к температуре плавления в градусах Кельвина), то обратный пересчет дает для сплавов системы Nb-Nb₃Si значение ожидаемой собственной рабочей температуры 1525°C, а для сплавов системы Nb-Nb₂C – 1816°C.

В настоящем сообщении представлены результаты измерения механических свойств в широком температурном интервале 2-х сплавов на основе системы Nb-Nb₃Si с 10 и 20 ат% Si и 2-х сплавов на основе Nb-Nb₂C с 20 ат% C. Показано, что сплавы первой группы способны выдерживать длительные нагрузки требуемого уровня при температурах, не превышающих 1300°C. Сплавы второй группы состава Nb₄₀Mo₄₀C₂₀ выдерживают высокие длительные нагрузки даже при 1500°C. Эти сплавы имеют хорошую перспективу для разработки на их основе особо жаропрочных сплавов нового поколения для нужд авиакосмической техники и энергетики.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ

Сагарадзе В. В., Козлов К. А., Катаева Н. В.

*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
vsagaradze@imp.uran.ru*

В работах ИФМ УрО РАН предложен метод сдерживания радиационного распухания аустенитных нержавеющих сталей типа ЧС 68 в результате их легирования 1 мас.% Ti ($X_{16}H_{15}M_{37}T_1$), что вызывает радиационно-индуцированное выделение дисперсных интерметаллидов Ni_3Ti при наиболее опасных температурах эксплуатации металлических оболочек тепловыделяющих элементов. Выделяющиеся частицы способствуют усилению рекомбинации вакансий и междоузельных атомов и значительно уменьшают вакансионное порообразование.

В последнее время в институте ведутся работы по созданию новых дисперсно упрочненных оксидами (ДУО) радиационно-стойких реакторных сталей с рекордными характеристиками жаропрочности. Получение ДУО-сталей связано с предварительным измельчением и растворением исходных достаточно крупных Y-Ti оксидов в стальном порошке при обработке смеси порошков в мельнице. Последующее высокотемпературное спекание порошка приводит к выделению дисперсных упрочняющих оксидов размером 2-5 нм. В институте реализован новый нетрадиционный подход к созданию ДУО-сталей, заключающийся в том, что в качестве носителя кислорода при механическом легировании использовались не трудно растворимые Y-Ti оксиды с высокой энергией межатомной связи, а малоустойчивые оксиды железа (патент РФ № 2307183), которые в процессе холодной деформации растворяются существенно легче в металлической матрице, чем оксиды иттрия или титана. Последующий отжиг механически легированной кислородом стали приводит к выделению упрочняющих наноксидов иттрия (титана), если эти элементы были предварительно введены в состав стали. При этом время до разрушения в процессе ползучести образцов ДУО стали при 700°C увеличивается более, чем на порядок.

Для доказательства возможности деформационного растворения оксидов железа в стальной матрице при обработке в мельнице был выполнен специальный «изотопный» эксперимент, заключающийся в механосинтезе смеси $^{56}Fe_3O_4 + ^{57}Fe$. Оксид $^{56}Fe_3O_4$ не обнаруживается мессбауэровским методом из-за отсутствия в нем резонансного изотопа ^{57}Fe . Холодная деформация смеси ($\epsilon \sim 8$) при сдвиге под давлением 8 ГПа приводит к существенному изменению спектра: наряду с секстетом матрицы α ^{57}Fe (37 %) формируется дублет нестехиометрического вюститита (16 %) и незначительное количество (2 %) магнетита. Наибольший парциальный вклад (45 %) дает секстет с уширенными линиями, относящийся к твердому раствору кислорода в железе («Fe-O»).

Чтобы еще больше облегчить получение ДУО сталей, было предложено использовать в качестве носителя кислорода (при механическом легировании) тонкие оксидные пленки на поверхности частиц порошка стали. В предлагаемом способе не требуется затрат времени на многократное измельчение частиц оксидов, так как толщина оксидной пленки уже составляет всего десятки нанометров. Этот метод создания ДУО-сталей был опробован на чистом железе, упрочняемом оксидами железа. Несмотря на то, что в образцах наблюдалась рекристаллизованная структура, упрочнение железа оксидами железа в отсутствие каких-либо легирующих элементов (за исключением кислорода) было сопоставимо с упрочнением стали Y-Ti оксидами ($\sigma_{0.2} \sim 600$ МПа).

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Х-ПИНЧЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВЕЩЕСТВА С НАНОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Чайковский С. А.

Институт электрофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия
Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия
chaikovsky@iep.uran.ru

Название «Х-пинч» получила сборка скрещенных тонких проволочек, устанавливаемых между электродами импульсного генератора тока, в силу аналогии этой конфигурации с буквой «Х». Х-пинч был предложен в Физическом институте им. П.Н. Лебедева, г. Москва, и апробирован в экспериментах на генераторе «Дон» в 1982 году. В экспериментах было показано, что при пропускании по Х-пинчу импульса тока с амплитудой сотни килоампер в области перекрестия формируется яркий источник мягкого рентгеновского излучения, обладающий малыми размерами (≤ 1 мкм) и малой длительностью импульса (≤ 1 нс), получивший название «горячая» точка. За счет малого размера «горячей» точки могут быть достигнуты чрезвычайно высокие значения плотности мощности излучения ($\sim 10^{15}$ Вт/см²), что делает Х-пинч одним из самых ярких в настоящее время лабораторных источников излучения.

Большое количество экспериментов, демонстрирующих уникальность источника излучения на основе Х-пинча, проведено на сравнительно высокоомных (порядка 1 Ом) импульсных генераторах, габариты и вес которых не позволяют использовать их в качестве диагностического средства в других лабораториях. В настоящее время активно ведутся исследования по реализации компактных импульсных радиографов с Х-пинчем в качестве источника мягкого рентгеновского излучения ($h\nu = 1 - 10$ кэВ). Сравнительно малые размеры и вес установки позволяют транспортировать ее в любую лабораторию. При этом имеется возможность обеспечить пространственное разрешение ~ 1 мкм при времени экспозиции кадра ~ 1 нс, а интенсивность источника позволяет регистрировать качественные теневые изображения исследуемых объектов на расстоянии вплоть до 3 м от источника.

В докладе обсуждаются перспективы использования малогабаритных генераторов тока с нагрузкой в виде Х-пинча для проведения радиографических исследований плазменных и других объектов с наносекундным временным разрешением в мягком рентгеновском диапазоне спектра, а также для проведения динамических рентгенодифракционных исследований структуры вещества.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00728).

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРУСТРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ГЕЙЗЕНБЕРГА НА КУБИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ

Муртазаев А. К.^{1,2}, Рамазанов М. К.^{1,3}, Курбанова Д. Р.¹, Муртазаев К. Ш.²

¹Институт физики ДНЦ РАН, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

³Отдел математики и информатики ДНЦ РАН, Махачкала, Россия
sheikh77@mail.ru

Проблема исследования фазовых переходов (ФП) и критических свойств в спиновых системах с фрустрациями является одной из центральных в современной физике конденсированного состояния [1]. Спиновые системы с фрустрациями во многом проявляют свойства, отличные от соответствующих нефрустрированных систем.

В данной работе, нами предпринята попытка исследовать ФП и критическое поведение антиферромагнитной модели Гейзенберга на кубической решетке с учетом взаимодействий первых и вторых ближайших соседей внутри слоев решетки. Интерес к этой модели обусловлен тем, что при учете антиферромагнитных взаимодействий вторых ближайших соседей данная модель становится фрустрированной.

Исследуемая модель описывается следующим гамильтонианом:

$$H = -J_1 \sum_{\langle i,j \rangle} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j) - J_2 \sum_{\langle i,l \rangle} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_l), \quad (1)$$

где $\vec{S}_i$ – трехкомпонентный единичный вектор $\vec{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$. Решетка состоит из двумерных квадратных слоев, сложенных по ортогональной оси. Первый член в формуле (1) характеризует антиферромагнитное взаимодействие всех ближайших соседей, которое берется одинаковым как внутри слоев, так и между слоями ($J_1 < 0$). Второй член характеризует антиферромагнитное взаимодействие вторых ближайших соседей, находящихся в том же слое ($J_2 < 0$). $r = J_2/J_1$ – величина взаимодействия вторых ближайших соседей.

Исследования проводились на основе высокоэффективного репличного алгоритма метода Монте-Карло [2-5]. Для расчета статических критических индексов использовались соотношения теории конечно-размерного скейлинга [6]. Получены значения всех основных критических индексов. Отметим, что полученные нами значения критических индексов отличаются от соответствующих значений критических индексов для нефрустрированной трехмерной модели Гейзенберга [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-02-00214-а.

- [1]. В.С. Доценко. УФН **165**, 481 (1995).
- [2]. М.К. Рамазанов, А.К. Муртазаев. Письма в ЖЭТФ **101**, 793 (2015).
- [3]. М.К. Рамазанов, А.К. Муртазаев. Письма в ЖЭТФ **103**, 522 (2016).
- [4]. М.К. Рамазанов, А.К. Муртазаев. Письма в ЖЭТФ **106**, 72 (2017).
- [5]. А.К. Муртазаев, М.А. Магомедов, М.К. Рамазанов. Письма в ЖЭТФ **107**, 265 (2018).
- [6]. P. Peczak, A.M. Ferrenberg, and D.P. Landau. Phys. Rev. B **43**, 6087 (1991).
- [7]. M. Campostrini, M. Hasenbusch, A. Pelissetto et al. Phys. Rev. B **65**, 144520 (2002).

РЕШАЯ СТАРЫЕ И НОВЫЕ ЗАГАДКИ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ИСПОЛЬЗУЯ ЗОННЫЕ РАСЧЕТЫ

Стрельцов С. В.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
streltsov@imp.uran.ru

В данном докладе будут обсуждаться результаты исследования трех систем: минерала калаверит AuTe_2 , двуокиси железа FeO_2 и его гидрата, которые, как предполагается, являются одним из ключевых материалов в нижней мантии Земли, а также CuAl_2O_4 , имеющего необычайные магнитные свойства и являющегося так называемым спин-орбитальным материалом на основе $3d$ ионов переходного металла (ПМ).

Золото – инертный элемент, который образует относительно небольшое количество соединений. Среди них уникальный материал – калаверит, AuTe_2 , представляющий редкий пример природного минерала с несоизмеримой кристаллической структурой. Более того, это одна из немногих систем на основе Au, которые становятся сверхпроводящими. Используя первопринципные зонные расчеты, мы объясняем эти необычные явления в картине с отрицательной энергией переноса заряда, причем дырки в основном находятся в полосах Te 5p. Этот сценарий объясняет несоизмеримую кристаллическую структуру AuTe_2 , а также предлагает возможный механизм сверхпроводимости [1].

Недавнее открытие диоксида FeO_2 [2], который может быть важным компонентом нижней мантии Земли и может служить дополнительным источником кислорода и воды [2], открывает новые перспективы для геофизики и геохимии. Это также чрезвычайно интересный материал с физической точки зрения. Мы обнаружили, что его свойства сильно отличаются от хорошо изученного ранее пирита FeS_2 . FeO_2 оказался металлом с ионами Fe, имеющими валентность $3+$, а FeS_2 – изолятор с Fe^{2+} . Более того, хотя FeS_2 диамагнитен, FeO_2 является магнитным с нетривиальной температурной зависимостью магнитной восприимчивости [3]. В условиях нижней мантии Земли существует также и гидрат FeO_2H_x , который рассматривается как один из составляющих т.н. слой D', разделяющий ядро Земли и нижнюю мантию [4]. Мы показали, что магнитные свойства FeO_2 и FeO_2H_x совершенно разные, и обсуждаем физические причины этих различий и взаимосвязь между магнитными и электронными свойствами в этих очень важных для геофизики соединениях железа.

Спин-орбитальные (СО) моттовские изоляторы представляют собой новую парадигму в физике магнитных материалов. На их свойства в значительной степени влияет спин-орбитальная связь, которая, в частности, приводит к сильно анизотропному обменно-взаимодействию между СО запутанными крамерсовскими дублетами в $4d$ и $5d$ соединениях ПМ. Мы покажем, что очень похожая ситуация может быть реализовываться в купратах. Особое внимание будет уделено CuAl_2O_4 , в котором не наблюдается какого-либо дальнего магнитного упорядочения вплоть до очень низких температур. Будет показано, что сильные кулоновские корреляции и СО связь приводят к подавлению ян-теллеровских искажений в CuAl_2O_4 . Таким образом, СО-запутанное состояние $j_{\text{eff}}=1/2$ естественным образом реализуется в ситуации конфигурации t_{2g}^5 , что, в свою очередь, объясняет необычные магнитные свойства CuAl_2O_4 [5].

[1]. S.V. Streltsov *et al.*, будет опубликовано в PNAS DOI: 10.1073/pnas.1802836115

[2]. Q. Hu *et al.*, Nature 534, 241 (2016)

[3]. S.V. Streltsov *et al.*, Sci. Rep. 7, 13005 (2017)

[4]. J. Liu *et al.*, Nature 551, 494 (2017)

[5]. S. Nikolaev *et al.*, не опубликовано

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Анисимов В. И., Коротин М. А.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
michael.korotin@imp.uran.ru

Любая зонная программа для расчёта электронной структуры предназначена для теоретического исследования *идеальных* кристаллов. Для исследования *реальных* веществ создаются как физические модели «неидеальности» (отличия реальных веществ от идеальных), так и дополнительные компьютерные программы для решения этих физических моделей.

В качестве реальных веществ в докладе будут обсуждаться легированные соединения, включая нестехиометрические соединения и соединения *d*- и *f*-металлов.

В качестве физической модели «неидеальности» – хаотичное (неупорядоченное) расположение примесных атомов в узлах кристаллической решётки.

В качестве способа решения такой модели – приближение когерентного потенциала.

В качестве программы, реализующей приближение когерентного потенциала – наша собственная разработка [1], имеющая Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

На рисунке показаны области существования различных зарядовых и магнитных состояний примесных ионов Fe, легирующих широкозонный полупроводник In_2O_3 . В элементарной ячейке In_2O_3 атомы In находятся в двух различных кристаллографических позициях In1 (8*b*) и In2 (24*d*). Эти узлы имеют разную локальную симметрию, и примеси Fe в этих узлах ведут себя по-разному. При $x \approx 3$ реализуется парамагнитное состояние ионов Fe. В области $2.99 \geq x \geq 2.95$ ионы Fe (8*b*) остаются парамагнитными, в то время как ионы Fe (24*d*) упорядочиваются ферромагнитно, переходя из зарядового состояния Fe^{3+} в состояние Fe^{2+} с уменьшением величины магнитного момента. При $x < 2.95$ все примесные ионы переходят в состояние Fe^{2+} и взаимодействуют ферромагнитно. Таким образом, ферромагнетизм при комнатной температуре определяется наличием ионов Fe^{2+} , которые появляются вследствие нестехиометрии по кислородной подрешётке.

Представляемый подход когерентного потенциала оказался очень востребованным в совместных теоретических и экспериментальных исследованиях: список публикаций текущего года [2–7] не полон, поскольку ограничен объёмом тезисов.

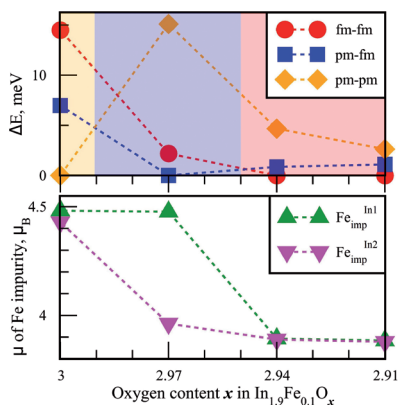


Рисунок. Вычисленные внутренние энергии твёрдого раствора $\text{In}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_x$ в различных магнитных состояниях примесных ионов Fe относительно основного магнитного состояния (сверху) и локальные магнитные моменты примесных ионов Fe (снизу).

- [1] М.А. Коротин *и др.* (2012) DOI:10.1134/S0021364011230068.
- [2] Michael A. Korotin *et al.* (2018) DOI:10.1002/pssb.201700477.
- [3] М.А. Коротин *et al.* (2018) DOI:10.1016/j.cocom.2018.03.007.
- [4] М.А. Коротин *et al.* (2018) DOI:10.1016/j.physb.2018.06.010.
- [5] М.А. Коротин *et al.* (2018) DOI:10.1016/j.tsf.2018.08.037.
- [6] Veronika M. Zainullina *et al.* (2018) DOI:10.1016/j.ssc.2018.09.006.
- [7] N.A. Skorikov *et al.* (2018) DOI:10.1007/s10948-018-4843-0.

МАГНЕТИЗМ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ПРОБЛЕМЫ И КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ

Ермаков А. Е., Уймин М. А., Губкин А. Ф., Королев А. В., Розенфельд Е. В.,
Куркин М. А., Молочников Л. С., Минин А. С., Волегов А. С., Бухвалов Д. В.
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
ermakov@imp.uran.ru

Презентация посвящена обобщённому анализу структурного состояния и обсуждению ключевых проблем природы появления магнетизма в нанокристаллических разбавленных магнитных полупроводниках (ZnO , In_2O_3 , TiO_2 и т.п.), нелегированных и легированных 3d-металлами. Основные проблемы при исследовании структуры и описания магнитных свойств будут продемонстрированы на типичном примере нанокристаллического диоксида титана TiO_2 , легированного Co и Fe. Особое внимание уделено рафинированию образцов и их очистке от посторонних примесей и фаз любой природы. Структурная и магнитная аттестация образцов осуществлялась методами X-ray анализа, ТЕМ, ЭПР спектроскопии и СКВИД магнитометрии. В докладе обсуждается и устанавливается фундаментальная природа основного магнитного и структурного состояния $\text{TiO}_2:(\text{Fe},\text{Co})$ как сразу после синтеза, так и последующих обработок.

Показано, что структурное и магнитное состояние должно анализироваться с учётом фазовой неустойчивости оксидов на основе матрицы TiO_2 при превышении предела растворимости 3d-допанта в матрице. Анализ данных ЭПР и СКВИД магнитометрии свидетельствуют о наличии парамагнетизма и антиферромагнитных взаимодействий между ионами Fe^{3+} . Показано, что использование широко распространённого закона Кюри-Вейсса при обработке магнитных данных (например, температурной зависимости восприимчивости) не позволяет корректно определить как концентрацию носителей магнитного момента, так и природу и концентрацию АФ вклада.

Для количественного описания магнитных свойств образцов $\text{TiO}_2:(\text{Fe},\text{Co})$ впервые предложено использовать квантово-механическую модель на основе парамагнитных центров и димеров с разной величиной обмена в парах. Модель базируется на предположении, подтверждённом данными ЭПР, что в системе TiO_2 существуют комплексы 3d-металлов, которые, в самом простейшем случае, можно аппроксимировать набором димеров с различным обменным взаимодействием внутри пары. Исследование продемонстрировало эффективность квантово-механической модели димеров и невзаимодействующих парамагнитных центров для количественного описания магнитных свойств системы $\text{TiO}_2:(\text{Fe},\text{Co})$ в широком интервале составов и температур с двумя параметрами обмена внутри пар – $J_1 \sim 1$ К и $J_2 \sim 100$ –300 К. Оценки величины АФ обменных взаимодействий в димерах методом теории функционала плотности (DFT) хорошо согласуются с квантовой моделью.

Один из основных фундаментальных выводов работы состоит в том, что распределение допантов в матрице TiO_2 даже при малых концентрациях примесей 3d-металлов не является случайным, а наблюдается их кластеризация, и, как следствие, димеризация спинов, как на поверхности, так и в ядре наночастиц.

Полученные в исследовании результаты по низкоразмерному магнетизму имеют достаточно общую природу и могут быть распространены на широкий класс разбавленных магнитных полупроводников.

МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СПИНТРОНИКА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СЕНСОРИКИ

Устинов В. В., Миляев М. А.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
milyaev@imp.uran.ru

В Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН разработана магнетронная технология получения магнитных наноструктур, обладающих гигантским магнитосопротивлением (ГМС). По своим функциональным характеристикам синтезированные наноструктуры не уступают зарубежным аналогам и являются лучшими ГМС материалами в России. Такие материалы относятся к объектам металлической спинтроники. На их основе могут разрабатываться высокочувствительные магнитные сенсоры и новые изделия магнитоэлектроники. Синтез многослойных наноструктур осуществляется с помощью прецизионной магнетронной установки MPS 4000C6 (ULVAC, Япония) на кремниевых и других пластинах диаметром до 100 мм.

Значительный опыт накоплен в части изготовления и исследования магнитных металлических сверхрешеток и спиновых клапанов различных композиций. Разработаны методы оптимизации их функциональных характеристик [1]. К настоящему времени получены: сверхрешетки $[\text{CoFe}/\text{Cu}]_n$ с величиной ГМС до 80% при комнатной температуре (рис. 1), сверхрешетки $[\text{CoFeNi}/\text{Cu}]_n$, обладающие величиной ГМС (25–30) %, чувствительностью (0.3–0.5) %/Э, высокой линейностью характеристики и слабым гистерезисом; металлические клапаны с величиной ГМС до 12 % и повышенной температурной стабильностью (рис. 2). Отработаны способы получения безгистерезисных спиновых клапанов, представляющих интерес для применения в аналоговых измерительных устройствах. Полученные в ИФМ УрО РАН ГМС материалы с оптимизированными функциональными характеристиками используются для разработки новых элементов сенсорики на двух предприятиях: АО «НПО автоматики» (Екатеринбург) и НПК «Технологический центр» (Зеленоград).

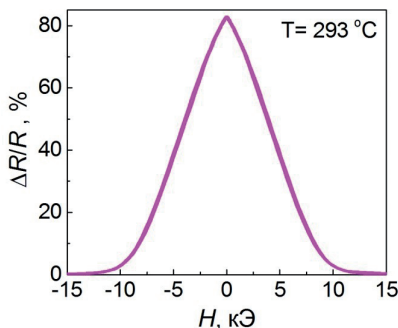


Рисунок 1. Магнитосопротивление
сверхрешетки $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(15\text{\AA})/\text{Cu}(9.5\text{\AA})]_{28}$

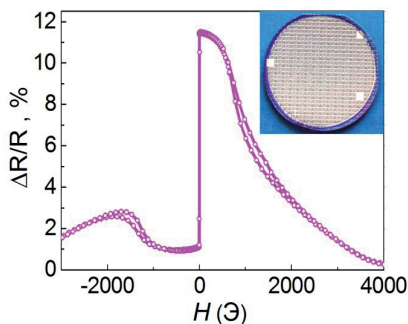


Рисунок 2. Магнитосопротивление
спинового клапана с синтетическим
антиферромагнетиком.

[1]. V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova. Giant magnetoresistance of metallic exchange-coupled multilayers and spin valves. ФММ, 2017, v.117, №13, pp. 38-97.

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ МЕДИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Страумал Б. Б., Мазилкин А. А.

*Институт физики твёрдого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия
straumal@issp.ac.ru*

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) всегда приводит к сильному измельчению зёрен. Логично предположить, что в двух- и многофазных сплавах ИПД должна всегда вызывать фрагментацию частиц второй фазы и их растворение в матрице. Однако не так давно было установлено, что – в отличие от этой общепринятой точки зрения – ИПД может приводить к распаду пересыщенного твёрдого раствора и формированию частиц второй фазы. В данной работе мы анализируем (как экспериментально, так и теоретически) конкуренцию между этими одновременными процессами: (1) растворением преципитатов и (2) распадом пересыщенного твёрдого раствора с образованием частиц второй фазы. В результате возникает динамическое равновесие между этими процессами, а концентрация второго компонента в твёрдом растворе достигает некоторого стационарного значения.

В данной работе мы изучили воздействие кручения под высоким давлением (КВД) на поведение двухфазного сплава Cu–3.9 масс. % Ag в двух состояниях: (1) литом, где в твёрдом растворе (Cu) содержалось 1.9 ат.%, а остальные 2 ат.% Ag содержались в метких частицах второй фазы, и (2) практически однородном твёрдом растворе с растворёнными 3.9 ат.% Ag, полученном отжигом при $T=780^{\circ}\text{C}$, 900 час. с последующей закалкой. КВД при комнатной температуре в литых образцах приводит к частичному растворению частиц серебра в матрице, а в гомогенизированных образцах – к частичному распаду твёрдого раствора (Cu). В результате, после КВД концентрация серебра в твёрдом растворе оказывается одинаковой (около 2.9–3.0 ат.% Ag). Таким образом, эта концентрация не зависит от исходного состояния и сильно превышает предел растворимости серебра в меди при температуре КВД (комнатной).

В работе также предложена модель, описывающая динамическое равновесие между растворением частиц и распадом твёрдого раствора. Предположив, что КВД фиксирует концентрацию на границах раздела частиц и матрицы, мы показали, что вызванный КВД диффузионный массоперенос определяет наблюдаемую стационарную концентрацию в матрице и средний размер частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-48-03598, 14-42-03621, 15-53-06008, 15-08-09325, 16-53-12007).

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР В ПЕРЕХОДНЫХ D - МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ БОЛЬШОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

**Пилиugin В. П., Воронова Л. М., Гапонцева Т. М., Дегтярёв М. В., Егорова Л. Ю.,
Пацелов А. М., Толмачёв Т. П., Хлебникова Ю. В., Чашукина Т. И.**
Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
pilyugin@imp.uran.ru

На широком классе переходных d - металлов и сплавов с различной подвижностью дислокаций исследовано влияние сдвиговой деформации под высоким давлением в диапазоне температур 80 – 600 К на механизмы формирования в них нано- и субмикроструктурных структур и конечный размер кристаллитов. Объектами исследования выбраны чистые d - металлы, в том числе тугоплавкие (i), сплавы, в основном на основе железа и никеля (ii), интерметаллиды (iii), гидриды чистых металлов и гидриды интерметаллидов (iiii). Наличествует много параметров снижения подвижности дефектов кристаллической решётки. В их число входят как фундаментальные параметры, определяющие вид, энергию и направленность атомных связей, так и теплофизические свойства, и режимы деформации. Каждый из этих прямо или опосредованно взаимосвязанных параметров оказывает влияние на зарождение, плотность и подвижность дефектов кристаллического строения металлов, в первую очередь точечных и линейных, т.е. дислокаций.

В результате рентгеновских и электронно-микроскопических исследований тонкой структуры металлов и сплавов, продеформированных на различные величины и в различных температурных и барических условиях, получены следующие обобщённые результаты.

В элементах с доминирующей металлической связью (Cu, Ni, Fe, Mo, Ta, Nb) высокая подвижность дислокаций обеспечивает фрагментацию структуры через образование и совершенствование дислокационной ячеистой структуры. Размеры кристаллитов в этих металлах и сплавах определяются динамическим равновесием процессов накопления дефектов и их стока и аннигиляции (возврат, динамическая и постдинамическая рекристаллизация) и составляют 40-150 нм, форма кристаллитов близка к равноосной. В элементах и сплавах с пониженной подвижностью дислокаций (Ni-Mn, Fe-Mn, Co) фрагментация структуры идёт через образование микроструктур полосчатого типа – двойников, полос локализованной деформации. Размеры кристаллитов этих металлов меньше, т.е. 20-50 нм, их форма менее совершенна. В металлах и сплавах с выраженными ковалентными связями и низкой подвижностью дислокаций (Mn, NiTi, Pd-H, TiAl-D) деформация приводит к образованию нанокристаллитов, 3-5 нм, и/или аморфных структур. Предложена обобщённая формула для среднего размера нанокристаллитов, возникших в результате фрагментирования исходной моно- или поликристаллической структуры, при большой эластической деформации под давлением. В формуле учитываются фундаментальные физические и механические параметры металлов и режимы их бародеформационных обработок.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Макаров А. В.

Институт физики металлов имени М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
av-mak@yandex.ru

Рассмотрены современные технологии интенсивного поверхностного пластического деформирования, обеспечивающие повышение прочности и износостойкости сталей и сплавов за счет формирования в их поверхностном слое субмикро- и нанокристаллических структур. Особое внимание уделено финишным фрикционным и ультразвуковым обработкам (инденторами), которые в отличие от некоторых других способов наноструктурирования (сдвиг под давлением, обработка SMAT – surface mechanical attrition treatment и др.) обладают высоким потенциалом промышленного использования в современном машиностроительном производстве.

Изучены трибологические аспекты наноструктурирующих обработок сплавов деформирующим индентором, связанные: 1) с обоснованием технологических условий обработок по критериям величины коэффициента трения, отсутствия адгезионного схватывания и усталостных микротрещин; 2) с установлением эффективности применения обработок для улучшения трибологических свойств сталей мартенситного, аустенитного классов и хромоникелевых лазерных наплавов.

Предложены комбинированные деформационно-термические наноструктурирующие обработки (фрикционная обработка + отпуск / отжиг), обеспечивающие для сталей со структурой мартенсита 2-3-кратный рост твердости и износостойкости при сохранении удовлетворительной пластичности, а для нержавеющей CrNi-сталей со структурой метастабильного аустенита – дополнительное упрочнение мартенсита деформации карбидами хрома при старении или формирование высокопрочной наноструктуры аустенита в результате деформационного прямого $\gamma \rightarrow \alpha'$ - и обратного (при нагреве) $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращений. Высокотемпературный отжиг после фрикционной обработки повышает до 1000°C теплостойкость NiCrBSi лазерного покрытия.

В развитии деформационных методов поверхностного наноструктурирования и упрочнения стальных поверхностей разработан новый способ – ультразвуковая ударно-фрикционная обработка – УЗУФО (Патент РФ 2643289). В отличие от стандартной ультразвуковой ударной обработки УЗУФО проводится по методу наклонного удара индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, что позволяет усилить фрикционную составляющую взаимодействия индентора с металлом и, соответственно, увеличить сдвиговую составляющую пластической деформации. Проведение обработки без применения контактной жидкости обеспечивает более высокую деформацию поверхностного слоя вследствие роста коэффициента (силы) трения, а использование защитной газовой атмосферы предотвращает охрупчивание диффузионно-активного высокодисперсного поверхностного слоя кислородом. Это также способствует накоплению в слое деформаций, достаточных для реализации ротационного механизма пластичности, ответственного за наноструктурирование.

Продemonстрировано использование фрикционной обработки в комбинации с последующим плазменным азотированием для активизации химического модифицирования металлических поверхностей. Достигнутый при этом рост износостойкости в условиях склерометрических испытаний впервые объяснен не только увеличением глубины азотирования в наноструктурированный слой, но и более плавным переходом от высокопрочного азотированного слоя к низкопрочной матрице стали.

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Иванов М. Г.

Институт электрофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия

max@iep.uran.ru

Применение наночастиц во многих областях науки и технологий зачастую требует использования частиц все меньшего размера. Оптимизированные классические методы, такие как механический размол и дробление, уже не обеспечивают необходимый размер и однородность 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. Известно, что наночастицы могут быть получены в результате испарения материала под действием лазерного излучения и последующей конденсации паров. Этот метод позволяет получать высокочистые слабоагрегированные наночастицы различных материалов с узким диапазоном дисперсии по размерам [1]. Однако до сих пор этот метод не получил широкого распространения из-за относительно низкой производительности и высоких удельных энергозатрат. Научный коллектив ИЭФ УрО РАН в течение последних 20 лет развивал данную технологию, сначала с помощью импульсно-периодического CO₂ лазера, а с 2009 г. с помощью волоконных иттербиевых лазеров. Нами показано, что метод лазерной абляции позволяет получать слабоагрегированные сферические частицы со средним размером 15-20 нм и узким диапазоном дисперсии, обеспечивая при этом высокую производительность и низкие удельные энергозатраты [2]. Специфической особенностью таких наночастиц является их метастабильное фазовое состояние. Так, например, наночастицы оксида иттрия при лазерном синтезе формируются в метастабильной моноклинной сингонии, которая переходит в стабильную кубическую только при высокотемпературном отжиге, что, с одной стороны, накладывает ограничение на применение таких наночастиц, а с другой, открывает новые направления их использования [3].

В представленном докладе подробно рассматриваются специфические свойства наночастиц оксидов, в первую очередь оксида иттрия, допированного редкоземельными ионами, полученных методом лазерного синтеза, их возможное применение в качестве нанолитографов и маркеров, а также их использование для спекания высокопрозрачной керамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-52-53039-ГФЕН_а).

[1] E. Müller, C. Oestreich, U. Popp, *KONA Powder and Particle* **13** (1995) 79-88.

[2] Yu. Kotov, O. Samatov, M. Ivanov, et al., *Technical Physics* **56**(5) (2011) 652-655.

[3] M. Ivanov, U. Kynast, M. Leznina, *J. Lumin.* **169** (2016) 744-748.

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Щербинин В. Е., Костин В. Н.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
kostin@imp.uran.ru

Большинство современных методов электромагнитной диагностики предполагают воздействие на объект контроля постоянным или переменным магнитным полем [1]. Однако имеются публикации по магнитным методам дефектоскопии и структуроскопии в так называемых “геомагнитных полях”. Процесс контроля заключается в регистрации и анализе неоднородностей намагничивания, возникающих в процессе “жизненного цикла” объектов контроля. При этом игнорируется повсеместное существование магнитных полей природного и техногенного происхождения, многократно превосходящих поле Земли и делающих неопределенным магнитное состояние объектов. Выдаваемый за диагностический признак так называемого “метода магнитной памяти металлов” переход нормальной компоненты магнитного поля через ноль формируется независимо от структурно-фазового или напряженно-деформированного состояния ферромагнетика, и место такого перехода меняется под действием даже слабых неоднородных полей (рис. 1).

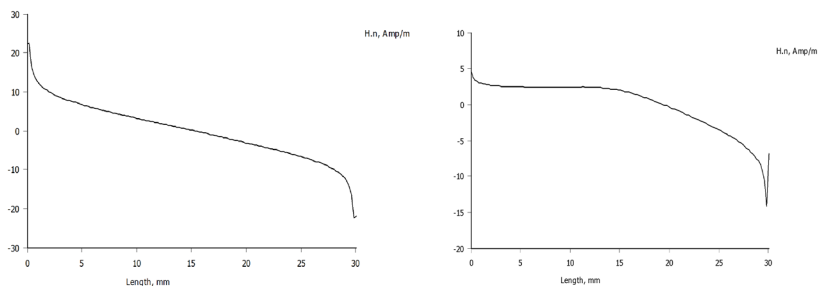


Рис. 1. Изменение распределения нормальной компоненты магнитного поля по длине цилиндрического стержня при его смещении относительно источника слабого магнитного поля: в центре соленоида (слева); у торца соленоида (справа).

Установлено, что возникающая во многих случаях необходимость многопараметрового контроля может быть обусловлена как нелинейностью взаимосвязей контролируемых параметров с измеряемыми параметрами контроля, так и необходимостью учета условий измерений [2]. Сформулированы основные критерии, которым должны отвечать перспективные многоцелевые системы активного электромагнитного контроля, и приведены примеры их реализации [2, 3].

[1]. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. 266 с.

[2]. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23-34.

[3]. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 37-43.

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глезер А. М.

ГНЦ РФ «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

НИТУ «МИСус», Москва, Россия

a.glezer@mail.ru

Среди большого числа современных материалов центральное место занимают конструкционные материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, механизмов, приборов и других изделий. Они характеризуются заметным разнообразием форм, размеров и условий эксплуатации и подвергаются всевозможным механическим нагрузкам (статическим, динамическим, циклическим и т.п.) при различных температурах и в среде различных жидких и газообразных веществ. Вышеуказанные условия определяют, с одной стороны, разнообразие типов конструкционных материалов, используемых в современной технике (от специальных сплавов до пластмасс), и, с другой стороны, широкий спектр предъявляемых к ним требований.

В докладе рассмотрены основные характеристики конструкционных наноматериалов. Описаны особенности дефектной структуры и закономерности механического поведения. Особое внимание уделено объемным и композиционным наноматериалам. Приведены примеры практического использования уникальных свойств наноматериалов в качестве перспективных конструкционных материалов.

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ СЕЛЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Ушаков И. В.^{1,2}, Шайдуллина Г.Р.¹

¹ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, Россия

ushakoviv@mail.ru

Первые методики лазерной обработки твердых материалов были основаны на использовании лазерной техники как источника энергии для сварки, закалки, аморфизации поверхности пр. Однако лазерная обработка твердых материалов имеет большие перспективы развития. Это связано с тем, что лазерный луч обладает временной, спектральной и пространственной структурой [1]. Используя лазерное излучение, мы можем избирательно воздействовать на различные процессы в твердых материалах. Благодаря таким свойствам лазерного излучения возможно формировать материалы с заданной структурой и комплексом физических характеристик [2].

Известна технология использования сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств деталей авиационной техники, а также для оптимизации комплекса механических и коррозионных свойств деталей газотурбинных двигателей. К настоящему времени показана эффективность данного подхода [3].

Однако в ряде случаев для модифицирования свойств поверхности металлических сплавов можно эффективно использовать лазерное излучение. Существуют методы лазерного воздействия, направленные на изменение состояния локальных областей с целью повышения эксплуатационных характеристик материала в целом. При этом влиять на свойства материала можно не столько путем воздействия на весь материал в целом, сколько воздействуя на локальные области. Существенным преимуществом таких методов обработки является возможность избирательного воздействия на дефектные области.

Таким образом, из всего многообразия методов обработки особый интерес представляют способы воздействия, обеспечивающие возможность эффективного избирательного управления процессами в локальных областях твердых материалов.

В данной работе для формирования свойств поверхностных слоев металлических сплавов вместо предложенной в работе [3] методики использована методика селективной лазерной обработки тонких металлических пленок, подробно рассмотренная в работе [2]. Экспериментальные результаты показали, что методика селективной лазерной обработки с учетом некоторой корректировки параметров лазерного излучения пригодна для формирования механических и коррозионных свойств металлических сплавов.

[1]. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3-32.

[2]. Ушаков И.В., Сафронов И.С. Механические характеристики тонкой ленты многокомпонентного аморфно-нанокристаллического металлического сплава, обработанного серией наносекундных лазерных импульсов // Тяжелое машиностроение. 2012 г. № 10. С. 6-9.

[3]. Шулов В.А., Энгелько В.И. и др. / Кратерообразование на поверхности деталей из титановых сплавов при облучении сильноточными импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов, 2015, № 5, С. 22-28.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК И ДОПУСТИМЫХ РАССТОЯНИЙ ДО ГРАНИЦ ОБРАЗЦА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЯЗКОСТИ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ АМОРФНО- НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Ушаков И. В.^{1,2}, Симонов Ю. В.¹

¹ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, Россия
ushakoviv@mail.ru

В качестве одного из новых способов определения механических свойств тонких лент аморфно-нанокристаллических металлических сплавов выступает методика механических испытаний, в основе которой лежит процесс локального нагружения нанесённых на подложку образцов инденторами различной геометрической формы. Наиболее подробное описание сущности данного способа, а также алгоритмы его практической реализации приведены в патенте [1]. Успешность применения указанной методики и корректность получаемых при этом результатов тесно связаны с необходимостью учёта влияния границ образца и областей лазерной обработки на симметрию и воспроизводимость анализируемых микрокартин разрушения. Важно, что вблизи указанных участков образцов существенно изменяются картины разрушений по сравнению с получаемыми в необработанных центральных областях образца. Необходимо определить расстояния, при которых полностью исключается воздействие пограничных зон и областей лазерной обработки на механизм формирования симметричной микрокартины разрушения.

Исследования проводили на образцах аморфного металлического сплава $\text{Co}_{71,66}\text{B}_{4,73}\text{Fe}_{3,38}\text{Cr}_{3,14}\text{Si}_{17,09}$, переведённых в нанокристаллическое состояние изотермическим печным отжигом при температуре 700-1050 К. Образцы подвергали лазерной обработке излучением оптического квантового генератора ELS-01. Механические испытания образца производили на микротвердомере ПМТ-3.

Анализировали результаты испытаний на следующих областях образца: центральных участках; участках лазерной обработки; участках вблизи границы лазерной обработки; участках вблизи границы образца. Установлены диапазоны нагрузок, при воздействии которых происходит образование характерных микрокартин разрушения, анализ которых позволяет определять параметр вязкости микроразрушения. Показано влияние лазерной обработки и границы образца на симметрию микрокартин разрушения и их «пригодность» для анализа и выявления вязкости микроразрушения. Установлено, что морфология и симметрия микрокартин разрушения зависят от того, в какой из указанных выше областей было проведено локальное нагружение. Для каждой из приведённых выше областей образца найдены минимально допустимые расстояния между соседними областями нагружения, исключающие нежелательное влияние предыдущего испытания на последующее. Экспериментально установлены интервалы расстояний от границ образца до точки приложения индентора, условно разграничивающие «центральные» и краевые области образца. На основе экспериментально полученных результатов сформулированы требования по корректному проведению механических испытаний образца в соответствии с приведённым в патенте [1] способом.

[1]. Ушаков И.В., Батомункеев А.Ю. Способ определения коэффициента вязкости микроразрушения тонких плёнок из многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Патент на изобретение 2561788 С1 РФ. – 2015 г.

Одиннадцатый научно-практический семинар «Актуальные
проблемы физики конденсированных сред»,
8-12 октября 2018, Екатеринбург

Сборник тезисов

Книга издана в авторской редакции
Ответственный за выпуск М.А. Коротин
Компьютерная верстка и дизайн: Е.В. Шестакова
Подписано в печать 04.10.2018. Тираж 50

Отпечатано:
Участок оперативной полиграфии УрО РАН,
620990, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

ISBN 978-5-9500855-3-6

