

Протокол заседания НКС от 18 марта 2016 г.

Проект по актуальному направлению научно-технологического развития Российской Федерации

1. Название проекта по актуальному направлению

Магнетизм, наноспинтроника и технологии наноструктурирования металлических материалов

2. Ключевые слова

Магнетизм, наномагнетизм, спинтроника, наноспинтроника, магнитные наноматериалы, магнитные наноструктуры, магнитный неразрушающий контроль, наноструктурирование, металлические наноматериалы.

Magnetism, nanomagnetism, spintronics, nanospintronics, magnetic nanomaterials, magnetic nanostructures, magnetic nondestructive testing, nanostructuring, metallic nanomaterials.

3. Аннотация проекта по актуальному направлению

Актуальное направление «Магнетизм, наноспинтроника и технологии наноструктурирования металлических материалов» призвано обеспечить реализацию в России прорывных фундаментальных и прикладных исследований в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ «Индустрия наносистем». Ориентация исследований по магнетизму на изучение проблем наномагнетизма и спинтроники является устойчивой тенденцией современного развития мировой науки. «Дорожная карта магнетизма» (*R.L.Stamps, et.al. The 2014 Magnetism Roadmap. J.Phys.D: Appl. Phys. 2014, V.47, P.333001*) содержит 12 основных направлений, 4 из которых относятся к наномагнетизму, а 3 – к спинтронике. Национальная программа США «Исследовательская инициатива по наноэлектронике» предусматривает исследования по наноспинтронике как один из ключевых разделов. Достоверно установлено, что искусственно созданные магнитные наноструктуры на основе металлов могут обладать уникальными свойствами с колоссальным потенциалом их практического использования, а важнейшие эксплуатационные свойства функциональных магнитных и конструкционных металлических материалов могут быть кардинально улучшены путем их наноструктурирования, как в объеме, так и в поверхностных слоях, часто определяющих работоспособность изделий. Актуальность исследований в этом направлении определяются необходимостью наличия в России собственных передовых нанотехнологий как ключевого фактора суверенитета и безопасности государства. Дорожная карта актуального направления включает три взаимосвязанных раздела со следующей внутренней структурой:

1. Магнетизм.
 - 1.1 Фундаментальные основы физики магнитных явлений. Исследования магнитных взаимодействий на атомном и нано- уровнях в магнетиках. Первопринципные методы расчета электронной и спиновой структуры магнетиков и магнитных наноструктур.
 - 1.2 Новые магнито жесткие материалы. Высокоэнергетические постоянные магниты и высококоэрцитивные материалы. Наномагнетики.
 - 1.3 Новые магнитомягкие материалы. Нанокристаллические материалы с максимальной магнитной проницаемостью и высокой намагниченностью насыщения.
 - 1.4 Новые функциональные магнитные материалы: магнито стрикционные, магнитокалорические, мультиферроики, метаматериалы, молекулярные магнетики.
2. Наноспинтроника.
 - 2.1 Фундаментальные основы электронного спинового транспорта в планарных и латеральных наноструктурах, новые спиновые эффекты.
 - 2.2 Металлическая спинтроника: спиновый транспорт в наноструктурах на основе металлических ферромагнетиков, наногетероструктуры с гигантским магнетосопротивлением, спин-клапанные, спин-туннельные и спин-инжекционные наноструктуры.

- 2.3 Полупроводниковая спинтроника: спиновые явления в полупроводниковых материалах и гетероструктурах, биполярный транспорт в магнитных $p-n$ -переходах, квантовый магнитотранспорт в наносистемах с большим спиновым расщеплением, сильным спин-орбитальным взаимодействием, гибридные спин-инжекционные наноструктуры.
- 2.4 Органическая спинтроника. Гибридные металл-органические наноструктуры.
- 2.5 Магнетроника, магнетронные наноструктуры. Спинкалоритроника.
3. Технологии наноструктурирования металлических материалов.
- 3.1 Технологии получения магнитных наноструктур спинтроники, создание приборов и устройств наноспинтроники и магнетроники: магниторезистивных сенсоров, спиновых клапанов, спиновых диодов, спиновых транзисторов, элементов магнитной памяти (MRAM, HAMR), матричных магниторезистивных преобразователей для систем магнитной дефектоскопии и др.
- 3.2 Технологии наноструктурирования металлических магнитных материалов.
- 3.3 Технологии получения новых высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-, износо- и радиационно-стойких металлических наноматериалов и композитов.
- 3.4 Разработка технологий магнитного неразрушающего контроля и нанодиагностики функциональных и конструкционных материалов в процессе производства и эксплуатации в условиях экстремальных тепловых, механических и радиационных воздействий.

4. Обоснование актуальности направления для Российской Федерации

- 4.1. Прямое соответствие приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ «Индустрия наносистем». Прикладные аспекты соответствуют направлениям: «Информационно-телекоммуникационные системы», «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники», «Транспортные и космические системы», «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». Развиваемые по направлению технологии относятся к числу «Критических технологии РФ»: «8. Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии», «11. Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств», «14. Технологии наноустройств и микросистемной техники», «16. Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов», «17. Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов».
- 4.2. Представленное актуальное направление полностью отвечает следующим направлениям фундаментальных научных исследований «Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 гг.»: «8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости», «9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы», «45. Научные основы создания новых материалов с заданными свойствами и функциями, в том числе высокочистых и наноматериалов».
- 4.3. Наукоемкие технологии, развиваемые в рамках предлагаемого актуального направления, будут способствовать решению следующих задач «Стратегии национальной безопасности РФ»: «37. Инновационное развитие оборонно-промышленного комплекса РФ», «62. Снижение критической зависимости от зарубежных технологий и промышленной продукции», «69. Стимулирование и поддержка развития рынка инноваций, наукоемкой продукции, в том числе наукоемкой продукции с высокой добавочной стоимостью», «70. Восстановление полного научно-производственного цикла - от фундаментальных научных исследований до внедрения достижений прикладной науки в производство».

5. Цели и задачи, решаемые в рамках проекта по актуальному направлению

Целями проекта являются:

1. Получение новых фундаментальных знаний в области физики магнитных и спин-транспортных явлений, разработка новых магнитных материалов и магнитных наноструктур, современных технологий их получения и контроля, приборов и устройств спинтроники.
2. Получение новых фундаментальных знаний в области наноструктурирования металлических материалов за счет структурно-фазовых превращений, больших пластических деформаций,

радиационного воздействия и кристаллизации. Создание на этой основе эффективных технологий получения новых объемно- и поверхностно- наноструктурированных конструкционных и функциональных металлических и нанокompозитных материалов, обладающих сочетанием высоких физических и эксплуатационных свойств.

При выполнении работ по данному направлению будут решаться следующие задачи.

1. Развитие фундаментальных основ физики магнитных явлений, металлической, полупроводниковой и органической спинтроники, магноники, спинкалоритроники, включая проведение теоретических и экспериментальных исследований новых магнитных и спин-зависящих транспортных явлений в металлических, полупроводниковых и органических наноструктурах, нанокompозитных мультиферроиках, низкоразмерных наноматериалах, метаматериалах как основы создания перспективных приборов и устройств информатики, телекоммуникационных систем, робототехники.
2. Разработка новых магнитных наноматериалов и наноструктур спинтроники с высоким уровнем функциональных свойств для энергоэффективных и энергосберегающих технологий, транспортных и аэрокосмических систем, информационно-телекоммуникационных систем.
3. Разработка новых методов исследования и диагностики магнитных наноматериалов и наноструктур спинтроники, включая магниторезонансные, спектроскопические, фемтосекундные, терагерцовые и др.
4. Исследование и развитие фундаментальных физических принципов комплексного легирования, механизмов деформации, эволюции структуры и физико-механических свойств, структурных и фазовых превращений в металлических сплавах в условиях интенсивных высокоэнергетических термомодеформационных и радиационных воздействий, а также при последующих постдеформационных термических и химико-термических обработках.
5. Установление фундаментальных закономерностей и общих принципов наноструктурирования металлических сплавов и композитов, а также влияния на механические, трибологические, коррозионные, радиационные и специальные функциональные свойства этих наноматериалов различных механизмов упрочнения и развивающихся в них структурных и фазовых превращений. Теоретический и экспериментальный поиск путей создания новых конструкционных и функциональных наноструктурированных материалов. Разработка на этой основе наукоемких технологий получения новых высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-, износо- и радиационностойких, электрорезистивных и интеллектуальных наноструктурированных металлических материалов, наноструктурных лигатур и нанокompозитов, методов их магнитного неразрушающего контроля и диагностики.

6. Основные подходы к реализации проекта по актуальному направлению

Обеспечение мирового уровня исследований в сфере фундаментальных и поисковых работ, соответствующего уровню исследований в странах с лидирующей экономикой, формирование современной научно-технической базы, создание научно-технологического задела, востребованного секторами экономики – решение всех этих задач в России невозможно без получения принципиально новых знаний в области магнетизма, перехода на качественно новый уровень в области фундаментальных исследований магнитных и магнитоуправляемых материалов, наноструктур и систем. Уровень и характеристики этого класса материалов определяют конкурентоспособность как отдельных стран, так и ведущих отраслей их промышленности на мировом рынке, закладывают основу для геополитического доминирования уже в самом ближайшем будущем. Ведущими мировыми державами приняты государственные программы поддержки фундаментальных и прикладных исследований, направленные на обеспечение ведущих позиций своих исследовательских институтов и компаний на наиболее динамично развивающихся высокотехнологичных сегментах рынка. Так, согласно прогнозам, к 2020 году объем мирового рынка электродвигателей на постоянных магнитах (<https://www.alliedmarketresearch.com/permanent-magnet-motor-market>) составит 45,3 млрд. долларов США при ежегодных темпах роста 11,7%. К 2020 году объем мирового рынка датчиков перемещений, доминирующее положение на котором занимают датчики магнитного

поля и магнито-индуктивные датчики (<https://www.alliedmarketresearch.com/proximity-and-displacement-sensors-market>), составит 5,32 млрд. долларов США при ежегодных темпах роста 8,7%.

Ниже приведена дорожная карта проекта, включающая выполнение работ по трем взаимосвязанным направлениям.

1. Магнетизм.

1.1. Фундаментальные основы физики магнитных явлений: исследования магнитных взаимодействий в магнитоупорядоченных системах, первопринципные методы расчета электронной и спиновой структуры магнетиков и магнитных наноструктур на их основе.

1.2. Новые магнитожесткие материалы. Высокоэнергетические постоянные магниты и высококоэрцитивные материалы. Наномагнетики.

1.3. Новые магнитомягкие материалы. Нанокристаллические материалы с максимальной магнитной проницаемостью и высокой намагниченностью насыщения.

1.4. Новые функциональные магнитные наноматериалы: магнестрикционные, магнитокалорические, мультиферроики, метаматериалы.

2. Спинтроника.

2.1. Фундаментальные основы теории электронного спинового транспорта в планарных и латеральных наноструктурах, новые спиновые эффекты.

2.2. Металлическая спинтроника: спиновый транспорт в наноструктурах на основе металлических магнетиков, наногетероструктуры с гигантским магнетосопротивлением, спин-клапанные, спин-туннельные и спин-инжекционные наноструктуры.

2.3. Полупроводниковая спинтроника: спиновые явления в полупроводниковых материалах и гетероструктурах, биполярный транспорт в магнитных *p-n*-переходах, квантовый магнитотранспорт в наносистемах с большим спиновым расщеплением, сильным спин-орбитальным взаимодействием, гибридные спин-инжекционные наноструктуры.

2.4. Органическая спинтроника, спинкалоритроника.

2.5. Магноника, магнонные наноструктуры,

3. Технологии наноструктурирования и нанодиагностики.

3.1. Технологии получения магнитных наноструктур, создание приборов и устройств наноспинтроники и магноники: магниторезистивных сенсоров, спиновых клапанов, спиновых диодов, спиновых транзисторов, элементов магнитной памяти (MRAM, HAMR), матричных магниторезистивных преобразователей для систем магнитной дефектоскопии и др.

3.2. Технологии наноструктурирования металлических магнитных материалов.

3.3. Технологии получения новых высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-, износо- и радиационно-стойких металлических наноматериалов и композитов.

Разработка технологий магнитного неразрушающего контроля и нанодиагностики функциональных и конструкционных наноматериалов в процессе производства и эксплуатации в условиях экстремальных тепловых, механических и радиационных воздействий.

7. Уровень научных исследований по теме проекта в мире

Ведущие страны мира уделяют большое внимание фундаментальным и прикладным исследованиям в области магнетизма и спинтроники. Так, в США фундаментальные исследования в этом направлении ведутся в таких федеральных исследовательских центрах как Лос-Аламосская Национальная лаборатория, Аргоннская национальная лаборатория, Национальная лаборатория Сандиа, Окриджская национальная лаборатория, Национальная лаборатория сильных магнитных полей, университетах Гарварда, Принстона, Массачусетском технологическом институте. Фундаментальные и прикладные исследования ведутся в таких компаниях, как IBM, General Electric, Honeywell, Seagate и их филиалах с других странах. Организация исследований в других странах мира (Евросоюз, Япония, Китай) сходна. В странах Евросоюза в качестве лидеров можно выделить Институт им. П. Грюнберга, г. Юлих, ФРГ, Национальную лабораторию им. Л. Нееля, г. Гренобль, Франция, университет Сендай, Япония, Национальную ключевую лабораторию по магнетизму, Китай.

В национальных лабораториях и университетах основное внимание уделяется разработке физических основ создания принципиально новых магнитных и магнитоуправляемых материалов наноструктур и систем, в то время как в компаниях происходит разработка новых технологий и «доводка» фундаментальных результатов до организации промышленного выпуска устройств и приборов.

Датой «рождения» спинтроники как фундаментальной науки о спин-зависящих явлениях в материалах и наногетероструктурах является 1988 год, когда П. Грюнберг в Германии и А. Ферт во Франции, открыли явление гигантского магнитосопротивления в магнитных многослойных наноструктурах за что в 2007 году им была присуждена Нобелевская премия по физике. После этого существенно возросло как число принципиально новых исследуемых физических спин-зависящих явлений (спиновые явления прямого и обратного эффектов Холла, Зеебека, спин-торк процессы, магноника и другие) так и виды исследуемых материалов и наноструктур (ферро- и антиферромагнетики, мультиферроики, наногетероструктуры на их основе). Приоритетными направлениями в последние годы стали исследования в области магнетизма низкоразмерных наноструктур, получаемых методами тонкопленочных технологий, структура и динамика магнитных состояний и спин-зависящих явлений на границах раздела, использование в качестве сред для спинового транспорта магнитных переходных металлов, полуметаллов, широкозонных, узкощелевых магнитных и полумагнитных полупроводников, легированных переходными 3d и 4f-металлами. По данным WoS с 2000 по 2014 гг. наблюдался почти 50-кратный рост количества публикаций с ключевым словом «спинтроника».

В рамках национальной программы США «Исследовательская инициатива по нанoeлектронике» (Nanoelectronics Research Initiative, NRI) к 2020 году запланировано создать реально функционирующую альтернативу современной полупроводниковой КМОП электронике (beyond-CMOS) с характеристиками, принципиально недостижимыми на сегодняшнем уровне. Предполагается сделать это на основе материалов и устройств спинтроники, основанных на явлениях прямого и обратного спиновых эффектов Холла, Зеебека, спин-торк процессов и принципов магноники (перенос информации спиновыми волнами на частотах гигагерцового диапазона). В программах NRI только в США задействованы 35 университетов в 22 различных штатах. Программу активно поддерживают такие ведущие компании ИТ сектора, как IBM, Intel, Texas Instruments, Omicron, AMD и другие. В 2009 году общий объем финансирования составил 1,527 млрд. долларов США.

Также большое внимание уделяется фундаментальным и прикладным исследованиям в области металлических нано- и наноструктурированных материалов. Так за последние 15 лет по данным WoS количество публикаций, посвященных конструкционным и функциональным материалам, увеличилось в 7-8 раз, а число цитирований – в 100 раз. В настоящий момент в мире существует несколько крупных материаловедческих центров по получению объемных нанокристаллических материалов, определяющих мировой научный уровень результатов исследований. Инженерные аспекты пластической деформации, прерывистой и непрерывной динамической рекристаллизации, свойства, микроструктуру и дизайн наноструктурированных металлов и сплавов исследуют в Университете электрокоммуникаций (Токио, Япония), Университете Кюсю (Япония), Университете Южной Калифорнии (США), Государственном университете Северной Каролины (США), Австрийском технологическом институте, и других зарубежных научных организациях. Фундаментальные исследования формирования структурных неоднородностей нанометрового масштаба и природы неравновесных фазовых состояний в сплавах железа проводятся в университетах Wollongong (Австралия), Датском техническом университете, Tsinghua (Китай), Технологическом университете Нидерландов. Теоретические и экспериментальные исследования динамической прочности, процессов разрушения материалов при взрывном нагружении, многомасштабное моделирование поведения материалов под воздействием ударных волн ведутся в Ливерморской национальной лаборатории, национальной лаборатории Сандиа и Университете Миссисипи (США), Институте физики жидкостей китайской инженерной академии, и других международных научных организациях. Механизмы неустойчивости пластического течения и разрушения

металлов являются предметом активных исследований в Университете Бордо (Франция), Империял колледже (Великобритания). Технологии формирования металлических слоистых композитов методами сварки взрывом развиваются в Dynamic Materials Corporation (США), Институте электросварки им. Е.О. Патона Национальной Академии наук Украины. Научные группы в Centro Nacional de Investigaciones Metallurgicas (CENIM), Мадрид, Испания и Кембриджском университете (Великобритания) ведут работы по сталям с бескарбидным бейнитом.

В России аналогичные материалы разрабатываются в ИФМ УрО РАН, МИСиС, ИМЕТ РАН, ИФПМ СО РАН, ФГУП "Прометей", НИИ НМ им. ак. А.А. Бочвара, ФГУП ЦНИИчермет им. И.П.Бардина и многих других организациях.

Фундаментальные и прикладные исследования в области неразрушающего контроля активно ведутся в промышленно развитых странах мира. Ежегодные симпозиумы проводят Американское общество неразрушающего контроля (ASNT), Британский институт неразрушающего контроля (BINDT) и международный институт сварки (AWS). Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), членами которого являются сотрудники ИФМ УрО РАН, регулярно проводит всероссийские конференции. Имеющийся уровень приборной базы, как в России, так и за рубежом, не отвечает в полной мере требованиям современных технологий. Существующие приборы MagneGage (Великобритания, США), «Ферритоскоп» (Германия), ферритометры ФА-1, ФЦ-2, ФДВ-2 (Россия) позволяют регистрировать частицы феррита, размером более 1 микрона, а методы и средства контроля микроповреждений, выявляют выделение ферромагнитной фазы в количестве более 2 об. %. Однако на механические свойства более сильно влияют наноразмерные частицы. Предпринимаемые попытки создания магнитных методов и средств контроля, отвечающих наноуровню, в настоящее время не носят систематического характера.

Ведущими зарубежными научными центрами по диагностике и неразрушающему контролю являются: Институт неразрушающего контроля (г. Саарбрюкен, Германия); Федеральный институт исследования материалов (г. Берлин, Германия); Центр атомных исследований имени Индиры Ганди, (г. Кальпаккам, Индия); Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси (г. Минск, Белоруссия); Институт Ивате (г. Ивате, Япония).

8. Организации, подведомственные ФАНО России, которые могут участвовать в реализации проекта

Институт физики металлов имени М.Н.Михеева УрО РАН, г.Екатеринбург, Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, г.Санкт-Петербург, Институт общей физики им.А.М.Прохорова РАН, г.Москва, Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, г.Москва, Институт физических проблем им.П.Л.Капицы РАН, г.Москва, Институт радиотехники и электроники им.В.А. Котельникова, г.Москва, Институт физики им.Л.В.Киренского СО РАН, г.Красноярск, Институт физики микроструктур РАН, г.Н.Новгород, Институт спектроскопии РАН, г.Троицк, Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г.Черноголовка, Физико-технический институт им.Е.К.Завойского, г.Казань, Институт физики им.Х.И.Амирханова, ДНЦ РАН, г.Махачкала, ИМЕТ РАН, г. Москва, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, ИПСМ РАН, г. Уфа, Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск.

9. Организации, не подведомственные ФАНО России, которые могут быть партнерами при реализации проекта

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический государственный университет, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Московский физико-технический институт (Государственный университет), Московский инженерно-физический институт, Московский институт электронной техники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технологический университет", Нижегородский государственный университет им.Н.И.Лобачевского, Сибирский федеральный

университет (г. Красноярск), Уральский федеральный университет (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (г. Челябинск), ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» (г. Пермь), ФГБОУ ВПО «НГТУ» (г. Новосибирск) НПО Автоматики, АО «ГРЦ Макеева», ОАО «Российские железные дороги», ОАО «Трубная металлургическая компания» (г. Москва), ОАО «НК «Роснефть», ОАО «Газпром», ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», АО ЦНИИМ (г. С.-Петербург), НИИ Неорганических материалов им. А.А. Бочвара, ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина (г. Москва), ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина» (г. Снежинск), предприятия металлургического комплекса России, АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей».

10. Основные ожидаемые результаты реализации проекта и возможность их практического использования в Российской Федерации

Сроки реализации проекта – 10 лет. Основные ожидаемые результаты.

Направление 1. Магнетизм.

1.1. Новые результаты по теории фундаментальных магнитных взаимодействий в магнитоупорядоченных низкоразмерных системах, квантовых двумерных фрустрированных системах, геликоидальных магнетиках, солитонов и слабонелинейных волн; расчеты спинмагнетонных токов в двумерных электронных системах, решение обратной задачи магнитостатической дефектоскопии. Концепция и схемы объектно-ориентированного программного комплекса, объединяющего первопринципные методики расчета свойств основного состояния наноматериалов и модельные подходы для изучения их термодинамических свойств как универсального инструмента для решения задачи описания физических свойств наноматериалов и оптимизации их функциональных свойств.

1.2. Новый класс суперэнергоёмких магнитов с магнитной энергией $(BH)_{\max} \geq 50$ МГсЭ; и высококоэрцитивные магниты с коэрцитивной силой $H_c \geq 25$ кЭ, включая материалы на основе $Nd_2Fe_{14}B$.

1.3. Новые магнитно-мягкие нанокристаллические материалы, обладающие оптимальным сочетанием магнитных характеристик для электротехнических применений, решения задач магнитного экранирования и др.

1.4. Новые высокомагнитострикционные металлические и композитные материалы и материалы со структурными фазовыми переходами, управляемыми магнитным полем для мощных генераторов колебаний, двигателей микро- и наноперемещений нового поколения. Новые функциональные наноматериалы с управляемыми магнитными свойствами, а также материалы с повышенной термической стабильностью при температурах до 500°C для высокочувствительных датчиков электро- и радиотехнической аппаратуры общепромышленного и специального применения.

1.5. Новые низкоразмерные магнитные материалы и нанопорошки, способы их получения, с целью обеспечения их последующей стабилизации, наночастицы, устойчивые при агрессивных воздействиях, в частности, в условиях живых систем для целей адресной доставки лекарственных препаратов в живых организмах, магнитной гипертермии злокачественных опухолей, в качестве катализаторов и наполнителей для разработки новых композитных конструкционных и функциональных материалов.

1.6. Новые магнитные наноматериалы и наноструктуры со свойствами мультиферроиков, магнитные метаматериалы.

1.7. Новые методы исследования и диагностики магнитных наноматериалов: магниторезонансные, спектроскопические, фемтосекундные, терагерцовые и др. Данные об их свойствах в широком диапазоне частот.

Направление 2. Спинтроника.

2.1. Результаты теоретических исследований особенностей электронного спинового транспорта в планарных и латеральных наноструктурах.

2.2. Фундаментальные знания по металлической спинтронике, спиновому транспорту в наноструктурах на основе металлических магнитных материалов, технологиях синтеза наногетероструктур с гигантским магнетосопротивлением, спин-клапанных наноструктур.

2.3. Фундаментальные знания по полупроводниковой спинтронике, спиновым явлениям в полупроводниковых материалах и гетероструктурах, биполярному транспорту в магнитных $p-n$ -

переходах, квантовому магнитотранспорту в наносистемах с большими спиновыми расщеплениями, сильным спин-орбитальным взаимодействием.

2.4. Новые спин-туннельные и спин-инжекционные наноструктуры.

2.5. Новые фундаментальные и прикладные знания по магнонике и магنونным материалам, интегрированным системам магноники, спинтроники и электроники.

2.6. Новые приборы и устройства наноспинтроники: магниторезистивные сенсоры, элементы магнитной памяти (MRAM), матричные магниторезистивные преобразователи для систем магнитной дефектоскопии и др.

Направление 3. Технологии наноструктурирования и нанодиагностики металлических магнитных материалов.

3.1. Новые данные о фундаментальных физических принципах комплексного легирования, механизмах деформации, эволюции структуры и физико-механических свойствах, структурных и фазовых превращений в сплавах на основе железа, алюминия, меди, титана, никеля, магния, урана, благородных и тугоплавких металлов в условиях интенсивных высокоэнергетических термомеханических и радиационных воздействий, а также при последующих постдеформационных термических и химико-термических обработках.

3.2. Фундаментальные закономерности и новые общие принципы наноструктурирования металлических сплавов и композитов, а также влияния на механические, трибологические, коррозионные, радиационные и специальные функциональные свойства этих наноматериалов различных механизмов упрочнения и развивающихся в них структурных и фазовых превращений.

3.3. Новые конструкционные и функциональные наноструктурированные материалы.

Перспективные наукоемкие технологии получения новых высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-, износ- и радиационностойких, электрорезистивных и интеллектуальных наноструктурированных металлических материалов, наноструктурных лигатур и нанокомпозитов.

3.4. Новые технологии магнитного неразрушающего контроля перспективных функциональных и конструкционных высокопрочных, жаропрочных, коррозионно-, износ- и радиационностойких металлических наноматериалов для энергетики, атомной и аэрокосмической промышленности, машиностроения, транспорта и судостроения. Не имеющие аналогов методики магнитной диагностики фазового состава и структуры наноматериалов с повышенной (на 3-4 порядка) чувствительностью и подавлением магнитных помех для выявления малого содержания (0,01–0,1 об. %) ферромагнитных включений с локальностью от 1 мм, с глубиной контроля 2-10 мм. Новые принципы построения систем магнитного и электромагнитного контроля нефтегазопроводных труб большого диаметра на основе тонкопленочных матричных преобразователей, изготавливаемых с применением современных нанотехнологий спинтроники, а также технические решения и программное обеспечение для построения программно-аппаратных комплексов систем управления и обработки результатов магнитного контроля.

3.5. Новые магнитные методы нанодиагностики металлических материалов в процессе производства и эксплуатации в экстремальных условиях климатических, тепловых, механических и радиационных воздействий.

11. Потребители (заказчики) результатов исследований по проекту

Минобрнауки, Минтранс, Минприроды, Минобороны, предприятия ГК «Росатом» (НИИ Неорганических материалов им. ак. А.А. Бочвара, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина» (г. Снежинск), АО Институт реакторных материалов (г. Заречный)), предприятия ГК «Роскосмос» (НПО Автоматики, АО «ГРЦ Макеева»), ОАО «Российские железные дороги», АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»», ОАО «НК «Роснефть»», ОАО «Газпром», ЦНИИКМ «Прометей», предприятия металлургического и машиностроительного комплекса России (Магнитогорский металлургический комбинат, Ижевский металлургический завод, Красноярский металлургический завод, Выксунский металлургический завод (г. Выкса, Нижегородская область), ЗАО «Группа ЧТПЗ», ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь), Верх-Исетский металлургический завод, Нижнетагильский металлургический комбинат, ОАО

«НПК «Уралвагонзавод», ВСМПО «Ависма», ОАО «Северский трубный завод», Каменск-Уральский металлургический завод).

Заявитель проекта по актуальному направлению
научно-технологического развития Российской Федерации,
директор ИФМ УрО РАН,



академик РАН В.В.Устинов