

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



ФГБНУ «Научно-исследовательский институт –  
Республиканский исследовательский  
научно-консультационный центр экспертизы»

Приоритетное направление развития науки,  
технологий и техники  
«Индустрия наносистем»

**ОБЪЁМНО-НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ  
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ  
НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ:  
ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ,  
ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ**

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

Подготовлен при финансовой поддержке  
Минобрнауки России.  
Использованы материалы, предоставленные  
экспертами Федерального реестра экспертов  
научно-технической сферы Минобрнауки России

**МОСКВА 2015**

## Оглавление

Введение.....	3
1. Позиционирование технологий получения объёмно-наноструктурированных материалов в инновационных системах.....	4
2. Анализ исследований и разработок объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов.....	7
2.1. Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов.....	8
2.2. Перспективные исследования и разработки объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов.....	11
3. Библиометрический анализ исследований и разработок в области наноструктурированных материалов с повышенной прочностью и методов интенсивной пластической деформации.....	26
Заключение.....	29
Список литературы.....	30

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Нанотехнологии, продукция, объёмно-наноструктурированные, конструкционные материалы, металл, сплав, приоритетные направления развития науки и техники, исследования и разработки (ИиР), инициатива, сеть, секторальная инновационная система, инвестиции, metallurgy, интенсивная пластическая деформация (ИПД), промышленные технологические методы, полуфабрикат, нанокристаллический, ультрамелкозернистый, сталь, алюминий, магний, медь, титан, сплав, сверхпластичный, сверхпрочный, модифицирование, возврат, старение, катанка, проволока, медицинские имплантаты, память формы, аморфный, квазикристаллический, нанопорошок, длинномерный профиль, прогноз, стратегия, программа, РАН, внедрение, инновации, комбинированный, совмещённый, малотоннажное производство, библиометрия, патентование.

## KEYWORDS:

Nanotechnology, marketable products, bulk nanostructured, engineering materials, metal, alloy, the Science and Technology (S&T) Priorities, Research and Development (R&D), Initiative, Network, Sectoral Innovation System, investment, metallurgy, Severe Plastic Deformation (SPD), processing approaches, semiproduct, nanocrystalline, ultrafine-grained, steel, aluminium, magnesium, copper, titanium, alloy, superplastic, ultrastrong, inoculation, retrogression, re-aging, rod, wire, medical implants, shape-memory, amorphous, quasi-crystal, nanopowder, long-measuring shape, forecast, strategy, program, RAS, introduction, innovation, combined, integrated, small-scale industries, bibliometrics, patenting.

## **Введение**

**Разработка и внедрение нанотехнологий (НТ) является одним из ключевых направлений мирового технологического прогресса**, сопоставимое по значению с информатикой и связью, или биотехнологиями. От развития нанотехнологий и создания на их основе новых материалов в значительной степени зависит прогресс в электронике, медицине, материаловедении, механике, машиностроении, космической отрасли.

Особенность настоящего момента состоит в том, что нанотехнологии из сферы исследований вышли на технологический рынок и являются наиболее динамично развивающимся сегментом. Между основными странами уже завязалась борьба за ниши мирового рынка.

Прогноз Национального научного фонда США предполагал, что в 2015 г. мировой нанорынок вырастет до 1 трлн долл. В 2007 г. авторитетные компании *Cientifica* и *Lux Research* пересмотрели оценки. По их данным в 2015 г. рынок нанопродукции возьмет планку в 3 трлн долл. Более 40% рынка приходится на США, страны ЕС занимают около 34%, а доля стран Азии составила около 23%. При этом азиатский регион развивается наиболее динамично [1].

По прогнозам американской ассоциации *National Science Foundation*, объём мирового рынка материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, полученных с использованием НТ, в ближайшие 10 – 15 лет может достичь 340 млрд долл. [2].

Согласно официальным данным, на начало 2008 г. в России было всего 75 производителей, которые выпускали товары с использованием НТ на общую сумму 7 млрд руб. **В 2015 году производство товаров отечественной наноиндустрии должно вырасти до 900 млрд руб.** [3].

В настоящее время фундаментальные и поисковые исследования, а также образовательную деятельность в сфере наноиндустрии осуществляют **более 250 российских организаций**. Несмотря на это, сегодня Россия значительно отстает от мировых нанотехнологических лидеров - США, Японии, стран Евросоюза по абсолютным показателям развития науки, технологий, степени промышлен-

ного освоения и коммерциализации разработок наноиндустрии [4].

**Исследования и разработки по созданию конструкционных материалов (КМ) на основе металлов, таких как наноструктурированные (НС) стали, сплавы, керамики и др. относятся к числу приоритетных направлений науки и техники во всех ведущих странах мира.** Особенno большое количество наноматериалов создано в последние годы.

В аналитическом обзоре:

- изложено состояние проблемы исследований и разработок объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов;
- проведен обзор перспективных методов и технологий получения и промышленного производства наноструктурированных КМ;
- проанализировано развитие мирового и российского рынков наноструктурированных конструкционных материалов.

## **1 Позиционирование технологий получения объёмно-наноструктурированных материалов**

В большинстве экономически развитых странах драйвером рынка являются малые предприятия. Около 70% от общего числа компаний, работающих в наноиндустрии, приходится на их долю.

**Более 55 стран разработали программы по образу и подобию американской Национальной нанотехнологической инициативы, которые направлены на создание сбалансированных и адаптивных инновационных систем в области НТ [4]. В России до 2013 г. были профинансираны и выполнены ряд ФЦП по развитию исследований и разработок в области нанотехнологий, созданию инфраструктуры и подготовке кадров, ряд отраслевых программ Минпромторга России. Мощным стимулом явилась Президентская инициатива «Программа развития наноиндустрии в Российской Федерации до 2015 г.». Эти программы обеспечили, как совершенствование элементов пока еще существенно фрагментированной национальной инновационной системы (таких как**

РАН, вузовская наука, ГНЦ, отраслевые НИИ, малый бизнес, инновационная инфраструктура и т.д.), так и встраивание в неё новых элементов секторальной инновационной системы в области нанотехнологий, таких как центры коллективного пользования научным оборудованием. **В качестве базового элемента НИС в области НТ необходимо отметить создание Национальной нанотехнологической сети, включающей более 500 научных и научно-производственных институтов** при ключевой роли НИЦ «Курчатовский институт». В сфере наноиндустрии чрезвычайно важным представляется создание ГК «РОСНАНО» и развертывание отраслевых программ Минпромторга России, ГК «Ростехнологии», ГК «Роскомос», ГК «Росатом».

В России нанотехнологии финансируются, в основном, из бюджетных средств. После принятия Президентской инициативы положение России среди стран-лидеров существенно изменилось (Рисунок 1).

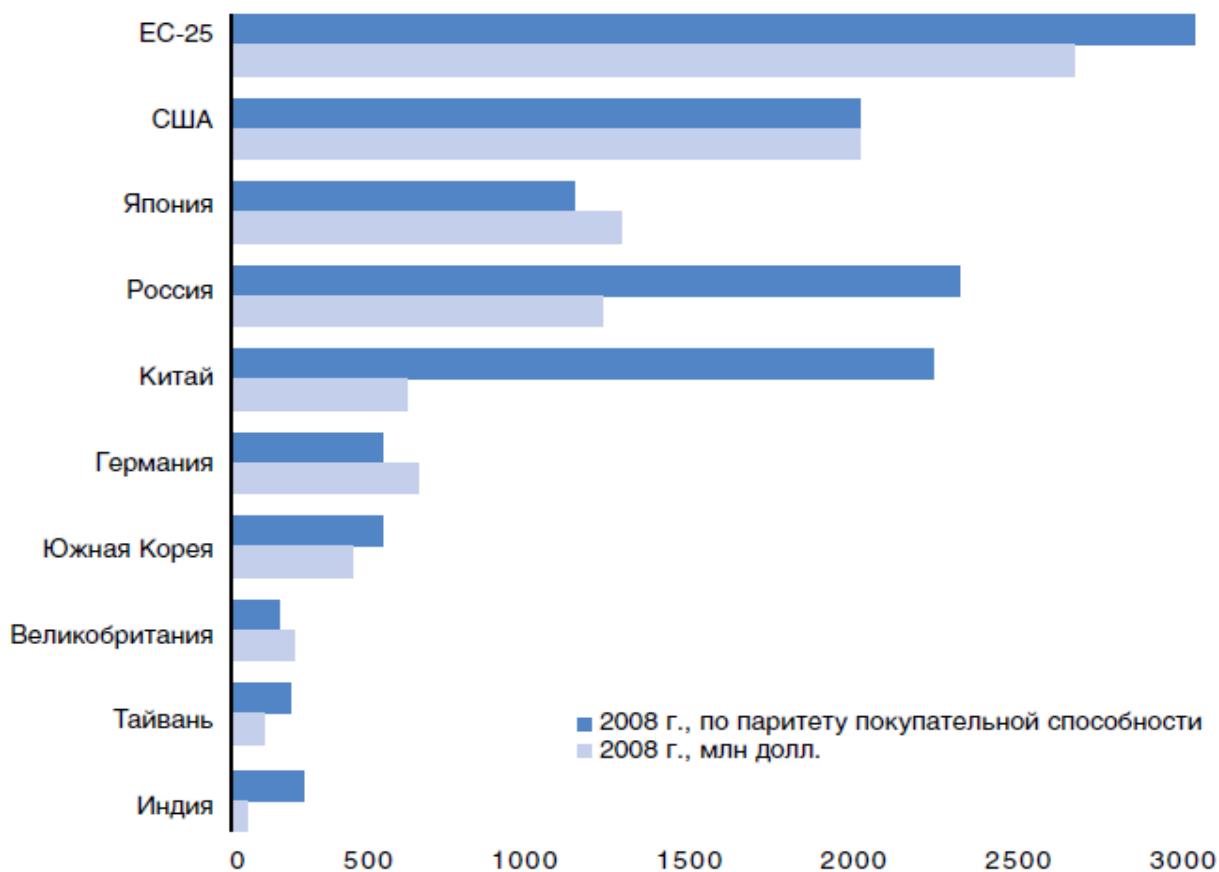


Рисунок 1 – Инвестиции в нанотехнологии стран-лидеров, млн долл.

По данным *Cientifica*, 25 стран ЕС в 2008 г. инвестировали в «нано» из бюджета 2440 млн долл., США – 1821, Япония – 1128, Россия – 1076 млн долл.

Таким образом, Россия вышла на четвертую позицию. Однако, если проводить расчеты по паритету покупательной способности, то в 2008 г. Россия уступила лишь ЕС-25. **Доля России в глобальных бюджетных инвестициях в «нано» составила около 20%.** Это – беспрецедентный для России факт [4].

Распределение расходов федерального и региональных бюджетов по направлениям развития науки РФ в общих расходах на ИР в 2011 году приведено на рисунке 2. Из рисунка следует, что НТ бюджетами недофинансируются. Хотя, согласно «Карте научных организаций по нанообластям» ИП РАН, в 2011 г. около 70% организаций относились именно кnanoиндустрии [5].

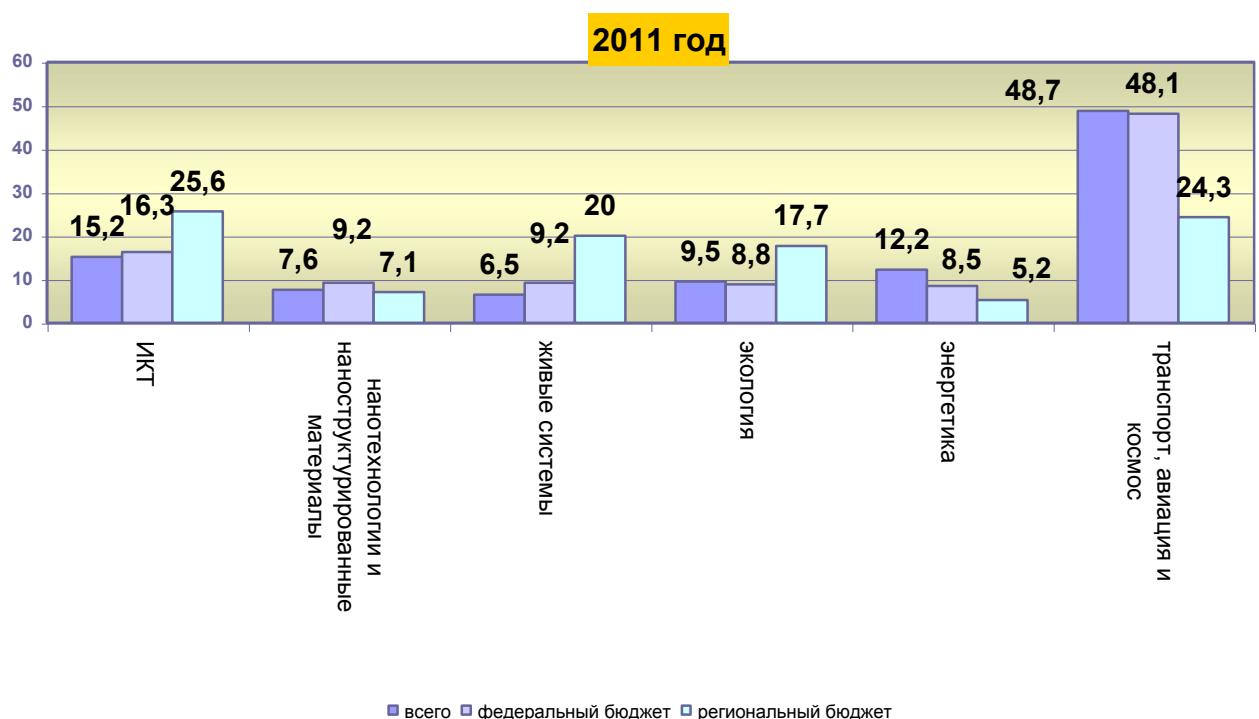


Рисунок 2 – Распределение расходов федерального и региональных бюджетов по направлениям развития науки РФ в общих расходах на исследования и разработки в 2011 г.

Развитие нанотехнологий, обладающих потенциалом переформирования производственных цепочек, дает России возможность быстрого рывка в области **создания отечественной технологической базы передового уровня**, локализации производств технологически сложной продукции, а также наращивания участия бизнеса в технологическом развитии [5, 6].

## **2 Анализ исследований и разработок объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов**

Применимость того или иного конструкционного материала определяется комплексом свойств, включающих соотношение между прочностью и пластичностью, вязкость разрушения, характеризующих т.н. *конструкционную прочность*.

Металлические материалы обладают наилучшим соотношением между прочностью и пластичностью по сравнению с другими материалами, поэтому **доля сплавов и сталей в общем объёме конструкционных материалов в мировой практике превышает 90% [7]**. В обозримом будущем для большинства инженерных сооружений, машин и технологического оборудования различного назначения **основными КМ будут оставаться металлы и их сплавы**.

Конструкционные материалы выделяются тем, что **выпускаются в «промышленных объемах»** – т.е. порядка десятков тысяч тонн и более в год.

Развитие техники требует создания новых технологий упрочнения железоуглеродистых сплавов, с целью обеспечения комплекса высоких физико-механических свойств [9, 10].

Прирост прочностных свойств конструкционных материалов за последние десятилетия был обеспечен разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом. В последние годы в мировой науке были разработаны новые направления повышения свойств объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов за счет формирования ультрамелкозернистой и нанокристаллических структур. Значительный интерес обусловлен тем, что их **конструкционные и эксплуатационные свойства значительно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов**.

**В наноструктурированных материалах часто изменяются фундаментальные, обычно структурно-нечувствительные характеристики**, такие как упругие модули, температуры Кюри и Дебая, намагниченность насыщения и др. **Это открывает перспективы улучшения существующих и создания**

**принципиально новых конструкционных и функциональных материалов.**

К настоящему времени в мировой технологической науке **разработан ряд способов наноструктурирования на основе металлов:**

- компактирование нанопорошков;
- кристаллизация аморфных сплавов;
- пластическая деформация;
- осаждение на подложку (в т.ч. на поверхность детали) [8].

## **2.1 Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов**

Наиболее **динамично развивающимися и перспективными** для промышленного применения технологическими методами наноструктурирования конструкционных материалов на основе металлов и сплавов **в мировой науке признаются методы интенсивной пластической деформации**, т.е. процессы деформирования при температурах ниже порога рекристаллизации с высоким уровнем накопленной деформации [9, 10, 11, 12]. Данный подход наиболее универсален и применяется практически ко всем металлам и сплавам на их основе (вкл. труднодеформируемые, например, вольфрам), а также к керамическим материалам.

В зарубежной литературе в последнее время встречается наименование методов интенсивной пластической деформации как «Русских методов наноструктурирования», благодаря чрезвычайно весомому научному вкладу российских учёных, особенно научной школы Уфимского государственного авиационно-технологического университета (*НИИ ФПМ УГАТУ*).

Убедительно доказано, что технологии на основе методов интенсивной пластической деформации являются перспективными для производства объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов, в частности, сплавов на основе *Al*, *Ti*, *Cu*, а также малоуглеродистых и нержавеющих сталей. Данные технологии уже сегодня позволяют получать заготовки, листы, прутки, проволоки, обладающие рекордно высокими значениями конструкционной

прочности при сохранении технологической пластичности, повышенным пределом выносливости, высокой электропроводностью, коррозионной стойкостью и другими привлекательными свойствами. Разрабатываемые методами интенсивной пластической деформации материалы предназначены для использования в качестве конструкционных и функциональных в таких отраслях промышленности, как энергетическая, машиностроительная, автомобильная, медицинская.

Метод интенсивной пластической деформации, заключающийся в обжатии с большими степенями деформации при относительно низких температурах в условиях высоких приложенных давлений, **позволяет получать объёмные беспористые нанокристаллические металлы и сплавы**, чего не удается достичь компактированием нанопорошков [12, 13].

**К настоящему времени нано- и субмикрокристаллическая структура после применения интенсивной пластической деформации получена в алюминии, железе, магнии, вольфраме, никеле, титане и их сплавах.**

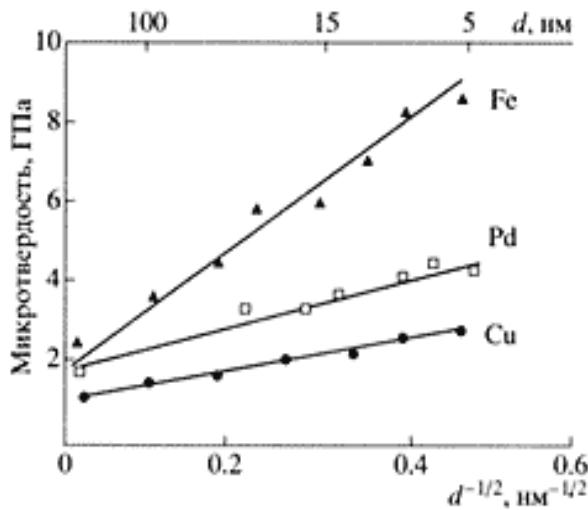


Рисунок 3 – Влияние размера зерна на микротвёрдость металлов

Формирование нанокристаллических структур позволяет в экспериментах получать конструкционные материалы с уникально высокими свойствами. Так, в наноструктурированных сталях существенно **повышается твердость до 9 ГПа, а в поверхностных слоях до 12 – 14 ГПа, что в 2 – 7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов** (рисунок 3).

**Прочность нанокристаллических конструкционных материалов при растяжении в 1,5 – 2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов.**

Применение методов интенсивной пластической деформации приводит к формированию ультрамелкозернистой структуры субмикрометрического диапазона со средним размером зерен 200 – 500 нм и развитой внутризеренной

субструктурой с размерами элементов менее 100 нм (рисунок 4), что позволяет отнести эти материалы к классу объёмно-nanostructuredированных конструкционных материалов [12,13].

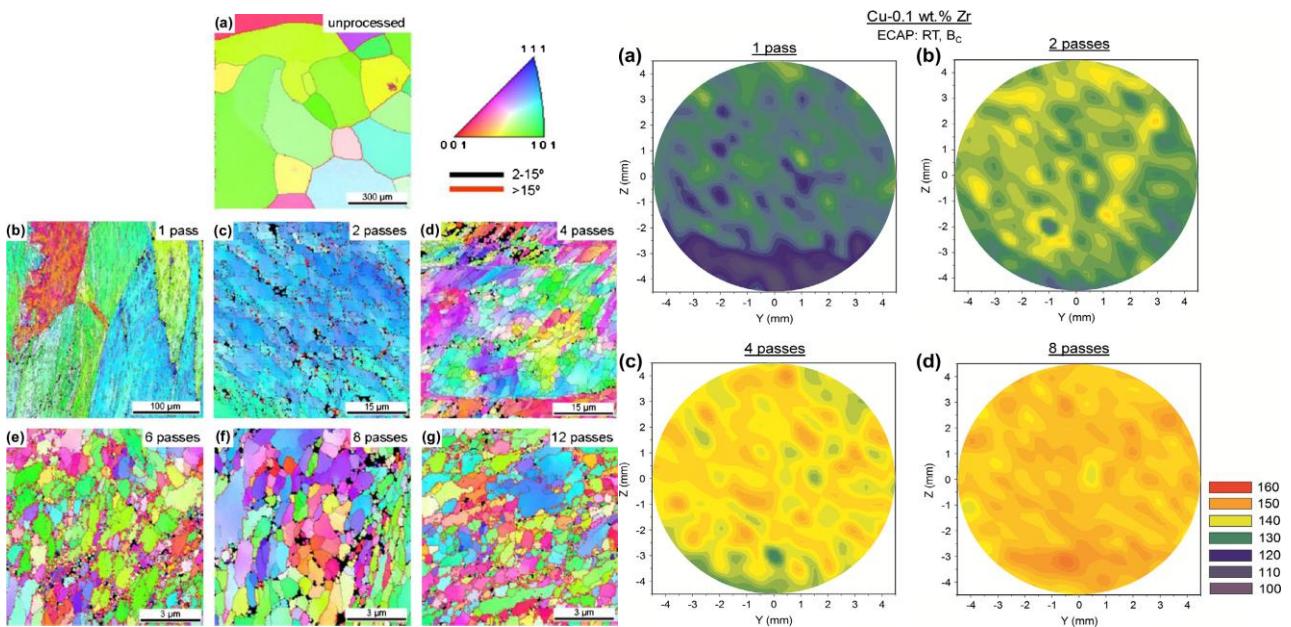


Рисунок 4 – Микроструктурные изменения алюминиевого сплава с 1% Mg (слева) и медного сплава с 0,1% Zr методом равноканального углового прессования

Оценивая важные преимущества методов интенсивной пластической деформации, следует отметить, что при формировании ультрамелкозернистых структур в металлах и сплавах *не изменяется их исходный химический состав*. Методы интенсивной пластической деформации, по сути, являясь новыми применениями методов обработки металлов давлением, имеют возможность встраиваться в существующие технологические цепочки на стадиях металлургического передела «слиток – полуфабрикат» или «полуфабрикат – изделие» [14, 15].

### **В мировой технологической науке интенсивно ведутся исследования новых металлургических методов объемного nanostructурирования металлов и сплавов:**

- недендритной или направленной кристаллизации;
- легирования малыми добавками редкоземельных и/или переходных металлов;
- создания в материале аморфных и смешанных аморфно-кристаллических структур;
- консолидацией интенсивной пластической деформацией микронных и

*нанопорошков металлов, сплавов и керамических материалов.*

**Создание промышленных технологических процессов на основе методов ИПД** является сложной научно-технической задачей. Необходимыми условиями для её реализации являются исследования напряженно-деформированного состояния и кинетики силовых параметров процессов, изучение факторов, влияющих на однородность течения и структурного состояния [14].

## **2.2 Перспективные исследования и разработки объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов**

Применение методов недендритной кристаллизации является одним из новых направлений в металлургии, особенно *Al* и *Mg* сплавов. В наибольшей степени методы недендритной кристаллизации освоены при непрерывном литье слитков малых, средних и больших сечений с кавитационной обработкой расплава в жидкой ванне слитка. Достаточно универсальным методом активации зародышевого образования в режиме развитой кавитации оказалась *ультразвуковая обработка потока расплава с одновременным введением лигатурного прутка* с модификаторами зародышевого действия, обеспечивающих в расплаве избыточное число центров недендритной кристаллизации. Такая технология может оказаться востребованной для самой широкой номенклатуры *Al*-сплавов.

Недендритная структура слитков и повышенная пластичность позволяют не только облегчить процесс горячей пластической деформации, но и *наследственно сохранить измельченную структуру и повышенную пластичность*.

Зарубежными специалистами из «*The University of Manchester*» (Великобритания), «*Department of Materials Technology*» – *Norwegian University of Science and Technology (Trondheim, Norway)* и в России (ОАО «*ВИЛС*», ФГУП «*ВИАМ*») было установлено, что недендритная структура в слитках *Al*-сплавов может быть сформирована и без специальных физических средств воздействия на расплав. К настоящему времени известно несколько случаев, когда условия

недендритной кристаллизации были реализованы на практике при непрерывном литье.

Другим направлением получения регламентированной структуры и повышенных свойств является **легирование малыми добавками редкоземельных и/или переходных металлов** – модифицирование. Метод применяется для различных сплавов, в т.ч. сталей и чугунов. Внесение малых количеств модификаторов в виде нанопорошков, или лигатур с наноструктурированной поверхностью, способно стимулировать недендритную кристаллизацию и образование наноструктуры.

Из-за дороговизны легирующих элементов, *применение* модифицированных *Al*-сплавов, *в настоящее время ограничено на уровне мелкосерийного и/или серийного производства полуфабрикатов и изделий спецназначения*.

Легированные малыми добавками *Al* литейные сплавы серийно выпускаются за рубежом, в основном для применения в авиации и автомобилестроении. *В России производства аналогичных промышленных Al-сплавов в настоящее время нет, но есть существенная потребность в них.* Остро стоит задача адаптации опытных технологий получения из *Al*-сплавов катанки и проволоки с использованием серийного промышленного оборудования.

**Исследования** с целью промышленного внедрения **новых подходов при проведении термической обработки**, а также разработки **режимов искусственного старения**, позволяющих оптимизировать соотношение между прочностью, пластичностью, и коррозионной стойкостью *Al*-сплавов, проводятся в США. Разработанные методы получили название *RRA (Retrogression and Re-Aging)* – возврат и повторное старение. Данный подход позволил фирме «*Alcoa Inc.*» организовать выпуск плит и профилей из сплавов 7000 серии для авиации– высокопрочных сплавов систем *Al-Zn-Mg* и *Al-Zn-Mg-Cu* [11, 12].

В процессе работ по изучению технологий 7000 серии *Al*-сплавов была открыта сверхпластичность (сплавы 7040, 7050, 7055, 7068), т.е. – большие деформации при малых усилиях. Улучшенные сплавы данной серии применяются в конструкции самолёта *Sukhoi SuperJet 100* (рисунок 5).



fuselage skins – обшивка фюзеляжа; elevator – руль высоты; rudder – руль поворота (направления); center engine support – узел вспомогательного двигателя; longerons – лонжероны (фюзеляжа); vertical stabilizer: skin and stringers – вертикальный стабилизатор: обшивка и стрингеры; wing box – отсек кессона крыла; frames – шпангоуты; main frames – основные (силовые) шпангоуты; stringers – стрингеры (фюзеляжа)

Рисунок 5 - Применение алюминиевых сплавов 2000 и 7000 серий в конструкции самолёта Sukhoi SuperJet 100.

Результатом совместных работ учёных из Уфимского государственного авиационно-технологического университета и из «*Department of Chemical Engineering & Materials Science, University of California, Davis*» (США), стал технологический процесс, включающий методы RRA и ИПД, для наноструктурированного авиационного сплава 7075. Удалось достигнуть прочности 1 ГПа при относительном удлинении 5%, что близко к стали. Подобные сплавы предполагается использовать, в частности, в бронежилетах [15].

В России активно ведутся прикладные исследования подобных сплавов. В ОАО «ВИЛС» разработан новый режим для сплава системы *Al-Zn-Mg-Cu*, который обеспечил такой же уровень прочности, как стандартный упрочняющий режим RRA, но намного более высокую коррозионную стойкость.

**Разработка наноструктурированных термостабильных алюминиевых сплавов с повышенной прочностью и электропроводностью, а также техно-**

логических процессов изготовления проволок электротехнического назначения является актуальной научно-технической задачей мировой практики.

Повышение прочности проводов из *Al*-сплавов с сохранением электропроводности, открывает возможность их применения на современных ЛЭП, на контактных линиях скоростных железных дорог. Это определяет большую перспективу рынка разрабатываемых материалов и значительный эффект их применения.

Полуфабрикатами для производства электротехнической проводниковой продукции на основе *Al*-сплавов являются катанка и проволока. Главными потребителями *Al* катанки являются предприятия следующих отраслей: силовая электроэнергетика; автомобилестроение (в части проводников); авиастроение (в части проводников); альтернативные источники энергии и бытовой сектор.

В России остро стоит задача адаптации опытных технологий получения из *Al*-сплавов катанки и проволоки с использованием серийного промышленного оборудования.

Сегодня рынок *Al* катанки уступает в объёме лишь рынку стальной, и спрос на неё постоянно увеличивается. Мировое производство в 2007 г. составило более 6,41 млн т. (по данным Международного института алюминия – *International Aluminium Institute*). В среднем производство катанки составляет 6% от первичного производства *Al*. *Мировой рынок находится в стадии роста.*

В последние годы применение *Al*-сплавов в электротехнической промышленности заметно растет, что связано, прежде всего, со сравнительно высокими ценами на медь и медную катанку. Алюминий в среднем почти в 4 раза дешевле меди, и при этом алюминиевая катанка более, чем в 3 раза легче. Основным недостатком реализуемой на мировом рынке *Al* катанки технической чистоты (A5E и A7E) является сравнительно низкая прочность (временное сопротивление разрыву составляет 80 – 110 МПа).

Микротвердость наноструктурных *Al*-сплавов изменяется до 750 HV, т.е. в 2 – 7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от метода получения материала. Износстойкость также значительно выше.

Так, при уменьшении размера зерна в *Al* от 10 мкм до 10 нм *скорость износа уменьшается почти в 100 раз.*

Зарубежные фирмы по выпуску проводниковой продукции, такие, как: «*Lamifil nv*» (Бельгия), «*J-Power Systems Corp.*» (Япония), *активно ведут исследования и разработки в области создания термостойких проводов* на основе полуфабрикатов – проволоки и катанки из наноструктурных *Al-Zr*-сплавов. Лидером в данной области является компания «*3M*» (США), создавшая новый нанокомпозитный провод *ACCR* для высоковольтных воздушных ЛЭП, который при одновременном улучшении механических и прочностных характеристик способен передавать в 3 раза большую мощность [[www.3Mcom/accr](http://www.3M.com/accr)].

Ведущими зарубежными фирмами по разработке методов и технологического оборудования для получения наноструктурированных конструкционных материалов на базе *Al*-сплавов, производству нанопорошков и лигатур для их модифицирования являются – «*SCHAFFER Chemische Fabric GmbH*» (Германия), «*Geiger+Co Trennex TM*» (Германия), «*KBM Affilips B.V.*» (Нидерланды). Фирма «*KBM Affilips B.V.*» разработала, внедрила и успешно использует самые современные методы интенсивной пластической деформации (*метод Конформ*) при производстве наноструктурных лигатур в виде прутка для модифицирования *Al*-сплавов.

В России в настоящее время *ОК «РУСАЛ»* начала разработку новой технологии по производству наноструктурированных *Al*-сплавов с повышенной конструкционной прочностью стоимостью более 100 млн рублей на базе завода в Иркутске.

**Значительный инновационный потенциал** в мире и России имеют **наноструктурные медные сплавы** для электротехники.

Магнитогорским государственным техническим университетом разработана и апробирована в промышленных условиях *ООО «ЗМИ-Профит»* (г. Магнитогорск) технологическая схема производства высокопрочной биметаллической сталемедной проволоки ПБ-0.20 с сердечником из ультрамелкозернистой низкоуглеродистой стали. **Впервые в мире на базе технологии**

**твердофазного соединения элементов композиции получена сталемедная проволока, обладающая временным сопротивлением 1370 МПа. Зарубежных аналогов не имеется.** Области применения: в качестве проводниковых и силовых элементов подвески контактной сети электрифицированных дорог, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, выводов радиодеталей и компонентов электронной техники.

**Интенсивно проводятся исследования и разработки технологий наноструктурирования титана и его сплавов:**

- технологии промышленного производства наноструктурированных высокопрочных *Ti*-сплавов для изготовления *компрессорных лопаток газотурбинных двигателей* с высокой долговечностью и повышенным сопротивлением усталости без поверхностного упрочнения;
- технологии промышленного производства наноструктурированного *Ti* для изготовления медицинских имплантатов.

Кроме того, высокопрочный наноструктурированный *Ti* и его сплавы чрезвычайно перспективен для применения в крепёжных изделиях для авиастроения, космической техники и судостроения. В открытых источниках подробных данных нет.

В медицине существует актуальная проблема оснащения ортопедических и травматологических центров и клиник новыми имплантантами, протезами и инструментарием. *Современная хирургия и стоматология нуждаются в металлах и сплавах с высокой химической инертностью и адекватной механической прочностью.* Наноструктурированный *Ti*, обладая высокой прочностью и практически полной биологической совместимостью, в отличие от нержавеющих сталей и кобальтовых сплавов, часто используемых в медицине, не вызывает аллергических реакций (рисунок 6).

**На сегодняшний день единственными производителями и поставщиками наноструктурированного *Ti* материалов для медицины являются российские компании** ООО «НаноМет» (г. Уфа) и ООО «Металл-деформ» (г. Белгород). Суммарная производственная мощность составляет около 2 т. в г.

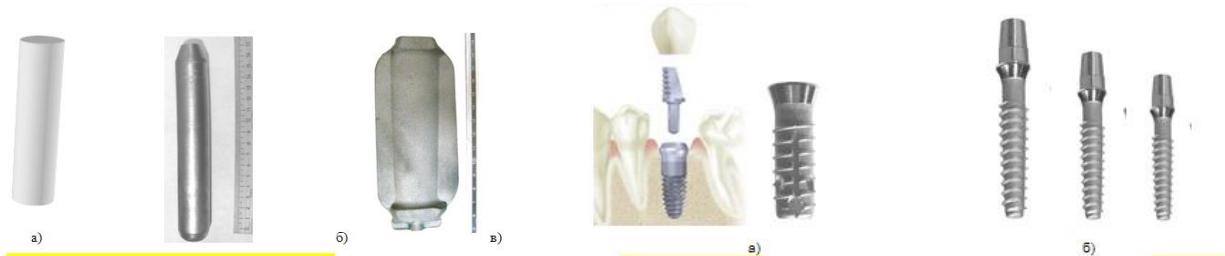


Рисунок 6 – Имплантанты и протезы из наноструктурированного *Ti*

*Большие перспективы применения объёмно-наноструктурированных материалов выявлены для группы металлических сплавов с термоупругими мартенситными превращениями и эффектом памяти формы, среди которых особенно выделяются сплавы никелида титана *TiNi* (устройства для клипирования кровеносных сосудов, трубчатых структур и мягкоэластичных тканей; муфты, предназначенные для обеспечения повышенной герметичности при стыковке трубопроводов и деталей, работающих в условиях высоких давлений).*

**В целом низкотемпературные сверхпластичные свойства наноструктурированных *Al* и *Ti* сплавов открывают широкие перспективы получения легких изделий сложной формы в режиме высокоскоростного сверхпластичного формообразования, что снижает энергозатраты и трудоёмкость.**

**Создание аморфной и аморфно-кристаллической структуры** в металлических сплавах является сравнительно новым направлением современного материаловедения. Сплавы с подобными типами структуры обладают рядом ценных эксплуатационных свойств, например, таких как высокая твердость, прочность, износстойкость и стойкость к коррозии. Аморфные магнитные наноматериалы, помимо высоких прочностных свойств, проявляют свойства возрастания коэрцитивной силы, магнитосопротивления, появления эффектов супермагнетизма.

В исследованиях, проводимых в основном в Японии, было показано, что за счет вариации составов сплавов, скорости их охлаждения при затвердевании и различных режимов термической обработки возможно получать в определенных сплавах смешанные структуры: аморфной и кристаллической, кристалли-

ческой и квазикристаллической (например, методом быстрого затвердевания были получены образцы сплава  $Al_{88}Ni_9Ce_2Fe_1$ )

В мире активно ведутся фундаментальные исследования наноквазикристаллов, которые отнесены к совершенно новому классу материалов, обладающих фантастическими свойствами.

Следует отметить, что высокие значения прочности и твердости в алюминиевых сплавах с аморфной или аморфно-кристаллической структурой были получены лишь в образцах в виде лент или пластинах толщиной от 20 до 900 мкм. Поэтому их **применение, в перспективе, в условиях промышленного производства достаточно ограничено**. В частности, тонкие ленты и пластины, могут быть использованы в качестве плакирующих износостойких и/или коррозионностойких покрытий в изделиях из промышленных алюминиевых сплавов, например, в парах трения.

Центром компетенции за рубежом является «*Tohoku University*» (Япония). В России исследования и разработки ведутся в ОАО «ВИЛС».

**Методы консолидации ИПД микронных и нанопорошков** развиваются как комплекс новых способов получения материалов, которые *трудно или невозможно получать другими путями*. К ним относятся: некоторые тугоплавкие металлы, сплавы и композиции на основе тугоплавких соединений.

Данные технологии могут применяться как эффективный способ повышения твердости в 5 – 7 раз в особо твердых сплавах, повышения прочности в конструкционных сталях в 1,5 – 2 раза, для формирования изделий сложной формы.

Многообразие методов порошковой металлургии обеспечивает широкие возможности для получения наноматериалов. На уплотнение дисперсных порошков значительное влияние оказывают такие параметры, как средний размер частиц, содержание примесей, состояние поверхности, форма частиц и способ прессования. Для прессования дисперсных нанопорошков широко применяют различные виды одноосного и всестороннего прессования. Для получения высокоплотных однородных материалов применяется горячее изостатическое

прессование, гидростатические методы и др. Применяется также метод интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением.

**Особенно большой интерес для рассмотрения возможности организации промышленного производства представляют нанопорошковые сплавы.** Технологии получения нанопорошков имеют хорошие перспективы, связанные с их высокой износостойкостью и хорошими триботехническими свойствами.

За рубежом разработки по получению НС материалов консолидацией ИПД микронных и НС порошков ведутся в системе Калифорнийского университета – «*The University of California*» – «UC», в т.ч. – «*University of California, Davis*» – «UC Davis» (г. Дэвис, США).

Методами порошковой металлургии удаётся получать материалы с уникальными механическими свойствами (ножевая «самурайская» сталь ZDP-189, «*Hitachi Metals, Ltd*», Япония).

В России разработки по данной тематике ведут *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН)*, *НИИ физики перспективных материалов при Уфимском государственном авиационном техническом университете (НИИ ФПМ УГАТУ)*.

*ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»* и *АО ВНИИНМ им. Бочвара* проводят ИР по созданию на основе порошковых методов с применением ИПД и термомеханической обработки наноструктурных радиационностойких, коррозионностойких углеродистых, перлитных и аустениных, легированных мартенситностареющих и дисперсионно-упрочнённых оксидами сталей для ТВЭЛОв и корпусных деталей ядерных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах.

**Мировой рынок нанопорошков развивается опережающими темпами: прирост порядка 15% в г.** и по сравнению с рынками др. наноматериалами наиболее коммерчески развит. **Производство нанопорошков опережает по годовым объёмам выпуск других наноструктурных композиционных материалов.** Номенклатура выпускаемых нанопорошков обширна, но лишь небольшая часть их выпускается в промышленных объёмах.

Основными потребителями мирового рынка нанопорошков являются США, Япония и страны ЕС. Более 2/3 объёма производства приходится на США, где сосредоточена почти половина всех производителей – малые фирмы, Университеты и научные институты, производящие нанопорошки для себя. В Европе основные производители – Германия и Великобритания, однако европейские запасы редкоземельных металлов очень скудны и находятся на грани истощения. Страны БРИКС (кроме Китая), где сконцентрированы основные запасы сырья, производят незначительные объёмы. В Азии – несколько крупных фирм обеспечивают весь объём производства и имеют солидный потенциал ввиду достаточных запасов редкоземельных металлов.

Основа рынка – порошки оксидов металлов.

*Анализ патентов показывает, что основная доля научных исследований относится к использованию порошка алюминия и порошков драгметаллов.*

В Европе производится больше нанопорошков оксидов – 90%, в Азии 25% производства занимают порошки металлов. Крупнейший производитель в США («American Elements») производит более 20 наименований нанопорошков, в Европе и Азии крупнейшие – порядка 10 наименований, а чаще – от 1 до 5. Большинство порошков выпускается малыми объёмами, для исследований. Более половины выпускаемых имеет размер частиц менее 60 нм, а более 40% – менее 30 нм. На отрасли металлургии приходится 3 – 4% мирового объёма нанопорошков, но эта цифра стала несколько расти.

Производство нанопорошков в России освоено примерно на 40 предприятиях. Поставки – в США, страны Европы и Азии. ЗАО НПП «Высокодисперсные металлические порошки» (г. Екатеринбург) обладает мощностями по выпуску нанопорошков цинка, меди и медных сплавов в объёмах до 10 т в г. ООО «Передовые порошковые технологии» (г. Томск) – объёмы выпуска порядка 1 т в г. Потенциальные возможности России в целом – порядка 100 т в г.

Потенциальный рынок нанопорошков в России – практически вся металлургия. Объём рынка НП в России в 2015 г. оценивается в 10 – 30 тыс. тонн в год. При условии замещения традиционного легирования объём рынка может

составить до 50 млн долл. в г. В качестве основных потребителей рассматриваются ОАО «Северсталь» и *OK РУСАЛ*.

Считается, что внешняя торговля нанопорошками в России не развита. Объёмы экспорта оцениваются в 0,5% от общего объёма экспорта порошковых материалов из России.

Магнитогорским государственным техническим университетом разработана и апробирована в промышленных условиях технология серийного выпуска на ОАО «ММЗ-метиз» высокопрочной наноструктурированной арматуры периодического профиля диаметром 9,6 мм для железобетонных шпал нового поколения по заказу ОАО РЖД. Объём серийного выпуска на 2015 год составляет 12000 тонн. Аналогов в мире подобная продукция не имеет. Подобных технологий эффективного объёмного наноструктурирования периодического длинномерного профиля в мировой практике не имеется.

В ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны стали повышенной прочности и эксплуатационной надежности, в сочетании с высокой вязкостью при температурах до -40–60°С и сейсмостойкостью до 8 – 9 баллов. Характеристики обеспечиваются за счет создания элементов наноструктурирования в толстолистовом прокате. Объекты внедрения – морская ледостойкая платформа «Приразломное» и плавучая платформа «Арктическая». Внедрены технология производства штрипса, гибки и сварки труб категории прочности К65 (Х80) для условий Севера – освоено производство штрипса – на ОАО «Северсталь», трубы – на ЗАО «Ижорский трубный завод». Поставлены трубы для системы магистральных газопроводов «Бованенково–Ухта». В перспективных разработках – стали класса Х120.

**В исследованиях и разработках перспективных технологических процессов для серийного производства новой промышленной продукции из объёмно-наноструктурированные КМ с повышенной прочностью существует целый ряд проблем, включающих адресную разработку и адаптацию нанотехнологий к условиям конкретного производителя в соответствии с эксплуатационными требованиями, серийностью производства, составом техноло-**

гического оборудования от различных изготовителей и т. д.

**Существует серьёзная проблема масштабирования НМ.** В настоящее время в мире синтезируются, в основном, наноструктурированные конструкционные материалы с геометрическими размерами, не достаточными для производства конкретных деталей и изделий различных отраслей промышленности и в не промышленных объёмах.

*На сегодняшний день ни в России, ни за рубежом не существует освоенной промышленной технологии получения объёмно-наноструктурированных металлов и сплавов конструкционного назначения.*

**Ведущиеся в мире исследования и разработки**, направленные на получение КМ с повышенной прочностью на основе металлов **ориентированы на создание и развитие следующих технологий, средств и продуктов:**

- metallurgical technologies, including design of products from them for various industries;
- processes of reducing costs of materials, consumption of energy resources, increasing productivity of labor by means of realization of new technological approaches, reduction of product cost and significant extension of their functional possibilities;
- ensuring compliance with international requirements, imposed on products made of new high-strength materials, and their qualification in accordance with international requirements.

Направление исследований и разработок в тематической области «*Новые материалы и нанотехнологии*» входит в Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации в части «*Индустрия наносистем*» и в Перечень критических технологий Российской Федерации в части п. 16. – «*Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов*». В части применяемых материалов, рассматриваемые ИР входят и во все без исключения Приоритетные направления и пункты Перечня критических технологий в редакции Указа Президента РФ № 899 от 07.07.2011.

На основании «Прогноза научно-технологического развития Российской

Федерации до 2030 года» можно сделать вывод, что рассмотренные объёмно-наноструктурированные материалы на основе металлов и сплавов входят в основные группы инновационных продуктов и услуг, обеспеченных платёжеспособным спросом, включающие, в том числе – наноструктурированные биосовместимые материалы; новые типы легких и высокопрочных материалов; термостойкие наноструктурированные, керамические и металлические материалы.

Прогноз определяет **перспективные направления научных исследований**, к которым в части исследований и разработок конструкционных материалов с повышенной прочностью на основе металлов и сплавов относятся, в том числе, направления: высокопрочные материалы, износостойкие материалы, термостойкие материалы, радиационностойкие материалы, которые соответствуют рассмотренным материалам. В перспективных технологических процессах с применением методов ИПД создаются конструкционные материалы нового поколения с новой архитектурой и свойствами, в первую очередь механическими: повышенной прочностью, пластичностью, твердостью, трещиностойкостью, сопротивлением усталости и др. Следует отметить, что ИР в части применения технологических методов ИПД для создания наноструктурных конструкционных материалов для энергетики могут дать чрезвычайно востребованные результаты.

**Совет РАН по нанотехнологиям Решением от 18.11.2014 определил особое значение ИР в области объёмного наноструктурирования металлов методами ИПД и их промышленного внедрения.** Совет решил, учитывая практическую значимость ведущихся ИР, рассматривать их как приоритетные и рекомендовать для включения в Программы РАН (до 2020 г. и дальнейшую перспективу), подготовить и разослать предложения в РЖД, РВК, Внешэкономбанк, министерства и ведомства.

Совет отметил большое практическое значение методов ИПД для обработки промышленных металлов и сплавов с целью создания изделий из наноматериалов для новых конструкционных и функциональных применений. Считаются доказанными возможности значительного повышения прочности с од-

новременным повышением усталостной прочности, хладостойкости, огнестойкости, стойкости к электрохимической коррозии в низкоуглеродистых сталях, усталостной прочности и электропроводности в низколегированных медных сплавах, реактивного напряжения и максимально обратимой деформации в сплавах с памятью формы.

**По данным экспертного сообщества в рамках направления выявлены основные тематики ведущихся и перспективных (до 2020 г.) фундаментально-прикладных ИР:**

- развитие методов ИПД (прессования, непрерывного равноканального углового прессования, всесторонней изотермической ковки, винтовой экструзии, совмещения ИПД с традиционными методами пластического деформирования) для получения объемно-nanoструктурных материалов в промышленных условиях;
- исследования особенностей микроструктуры, физических, механических и эксплуатационных свойств, деформационного поведения объемно-nanoструктурных материалов, полученных методами ИПД. Расширение гаммы металлов и сплавов;
- исследования возможностей достижения повышенных прочностных свойств при сохранении высокого уровня электропроводности в медных и алюминиевых сплавах (для электротранспорта);
- расширение гаммы *Ti*-сплавов, подвергаемых ИПД, для конструкционного и медицинского применений;
- исследования радиационной стойкости объемных nanoструктурных материалов для создания элементов конструкций ядерных реакторов;
- разработка комплексных и совмешённых технологических процессов и модульного/встраиваемого в производственные циклы оборудования, в том числе – для малотоннажных производств, для серийного выпуска длинномерных изделий с повышенной прочностью из объемно-nanostructuredированной низкоуглеродистой стали – арматуры периодического профиля и сталемедной (биметаллической) проволоки, крепежа, другой метизной продукции;

- исследования состояния сверхпрочности в ряде промышленных сплавов *Al* и *Ti*, а также в некоторых УМЗ сталях, полученных методами ИПД;
- исследования магнитных свойств материалов;
- исследования возможностей применения методов ИПД к аморфным сплавам и наноквазикристаллам.

В отраслевом плане, востребованные промышленностью материалы и актуальные для внедрения технологические методы, предлагаемые для перспективных технологических процессов серийного выпуска металлопродукции, определены в «*Стратегии развития черной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года*» и в «*Стратегии развития цветной металлургии России на 2014 – 2020 годы и на перспективу до 2030 года*», разработанные с учетом долгосрочного прогноза. (Утверждены приказом Минпромторга России от 5 мая 2014 г. № 839). Стратегии согласуются с программами машиностроения, в частности, – со «*Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.*» для авиации (ФГУП «ВИАМ», 2012 г.) и «*Программой инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 г.*».

В Стратегиях указано на **потребности металлургии и отраслей машиностроения** в наноструктурированных листовых материалах, автолистовых сталей, прокатных материалов с особыми прочностными и технологическими свойствами, получаемых, в частности, с помощью методов интенсивной пластической деформации для автомобильной и оборонной промышленности, создание технологии производства горячекатаного листа для автомобильной промышленности из высокопрочных *TRIP* и *Dual TRIP* сталей с наноразмерными структурными компонентами, нового поколения наноструктурированных нержавеющих сталей на основе комплексного метода криогенно-деформационной ИПД и термической обработок, развитие производства высокопрочных и наноструктурированных алюминиевых сплавов, в том числе с использованием скандия и редкоземельных металлов, разработка новых нанокристаллических сплавов с уникальными магнитно-мягкими и механическими свойствами путем со-

чтания закалки из расплава, аморфных, в т.ч. безникелевых, сплавов для судостроения.

В ближайшей перспективе актуальна разработка и использование комплексных и совмещенных технологических процессов производства металлопродукции, сокращение технологических операций с целью снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности металлопродукции.

Согласно выводам экспертов, с точки зрения организации производств, в ближне- и среднесрочной перспективах будут наиболее актуальны и конкурентоспособны малотоннажные производства в составе воспроизводственных научно-технологических контуров, например – создающихся научно-производственных кластеров.

### **3 Библиометрический анализ исследований и разработок в области наноструктурированных материалов с повышенной прочностью и методов интенсивной пластической деформации**

Анализ ситуации проводился на основании данных опросов и аналитических документов экспертов Федерального реестра в 2012 – 2015 гг., материалов нормативно-правовых актов органов власти, данных российской и зарубежной периодики и Интернет-ресурсов. При оценке корректности, валидации и верификации использовались отчёты центров прогнозирования и форсайта в России и за рубежом, которые сопоставлялись с данными экспертов.

Как свидетельствуют показатели, **тематика повышения прочности материалов за счет наноструктурирования методами интенсивной пластической деформации** по научно-техническому уровню разработок имеет **наиболее высокую научную репутацию** в мировой нанопроблематике и **лидерующие позиции занимают специалисты Уфимского государственного авиационно-технологического университета (Россия)**.

Статьи по направлению «наноструктурные материалы, полученные ИПД» в основном публикуются в России по тематике «НТ и наноматериалы» [<http://www.elibrary.ru>] в таких рубриках, как «Теоретические модели в сфере НТ», «Объекты и материалы, относящиеся к сфере нанотехнологии, их струк-

тура и свойства», «Кристаллическая структура, свойства наноматериалов и нанообъектов», «Методы получения НМ и нанообъектов», «НТ в различных областях. Продукция НТ», которые охватывают практически все отрасли – физика, металлургия, машиностроение, медицина, механика, энергетика, строительство и архитектура. Рубрики соответствуют фронтам исследований в РФ и за рубежом.

Ведущими международными изданиями, в которых публикуются статьи по тематике «НС материалы, полученные методами ИПД», являются журналы с высоким импакт – фактором (IF), как *Progress in Materials Science*, *Acta Materialia*, *Scripta Materialia*, *Materials Science and Engineering A*, *Nature*, *Nature of materials*, *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, *Journal of Applied Physics* и др.

К настоящему времени научное направление, связанное с наноструктурированием интенсивной пластической деформацией металлов и сплавов, получило широкое международное признание, и данная тематика стала одним из **наиболее динамично развивающихся разделов современной науки о наноматериалах**. Наиболее цитируемыми и общепризнанными работами за рубежом, согласно БД «SCOPUS» [[www.scopus.com](http://www.scopus.com)], являются обзорные работы с участием авторов из Уфимского государственного авиационного технического университета: *Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. / Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science. 2000. - V.45. - p. 103-189 - 3041 цитирование; R.Z. Valiev, T.G. Langdon. / Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Progress in Materials Science. – 2006. – V.51. – p. 881-981 – 1297 цитирований.*

По тематике «НС материалы, полученные ИПД» в настоящее время активно публикуются ученые таких стран как: США, Германия, Великобритания, Франция, Австрия, Япония, Китай, Южная Корея, Австралия, Бразилия и т.д. Наиболее известными авторами являются: Langdon T.G. (США, Великобритания), проф. Horita T (Япония), Wang Y.M., Ma E. (Китай). Данные авторы входят в первую десятку по цитируемости среди материаловедов мира

[<http://www.in-cites.com/top>], что отражает актуальность описываемой тематики. Огромное количество экспериментальных данных и теоретических моделей измельчения микроструктуры в металлах (более 3600 научных публикаций) являются научно-технической основой для перехода от лабораторных разработок к промышленному производству объемных наноматериалов.

**Патентный поиск** за последние 10 лет по тематике «*Bulk nanostructured materials*» показывает, что основная доля патентов опубликована в США, Китае, Японии Южной Корее (рисунок 7).

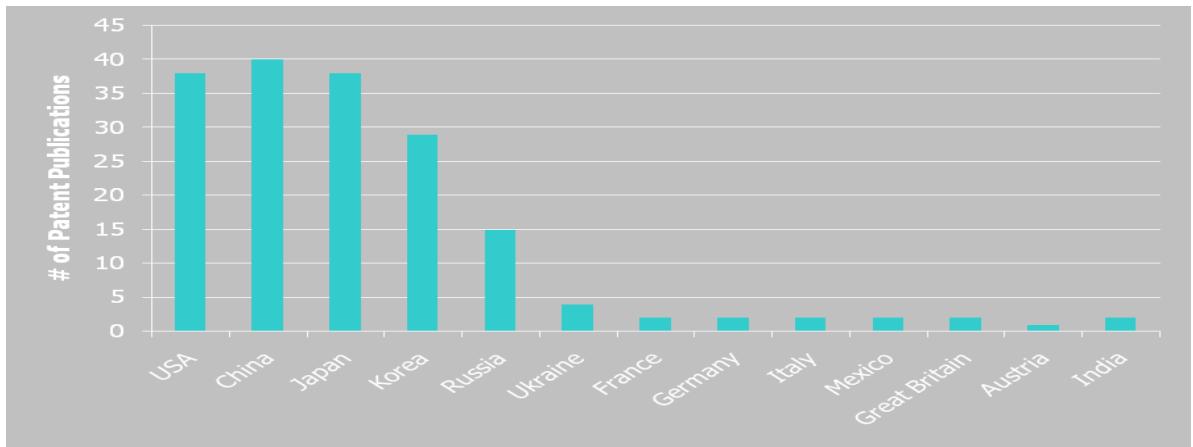


Рисунок 7 – Анализ патентов в различных странах мира по тематике «*Bulk nanostructured materials*» [16]

В России количество патентов по данной тематике выше, чем во Франции, Германии, Англии и т.д. Только сотрудниками НИИ ФПМ УГАТУ за последние 15 лет получено более 40 патентов на изобретение по способам получения ультрамелкозернистых и наноструктурированных материалов.

Факт заметности темы фронта исследований в *Google Trends* (рисунок 8) говорит о приближении стадии коммерциализации.

Патентный поиск показывает, что наибольший интерес представляют технологии, позволяющие получать металлы и сплавы с улучшенными эксплуатационными свойствами. Патентуемые способы обработки сплавов направлены в первую очередь на улучшение механических характеристик с помощью ИПД, а именно – на повышение прочности, пластичности, сверхпластичности, термостабильности, усталостной прочности, сопротивления разрушению, сопротивляемости износу.

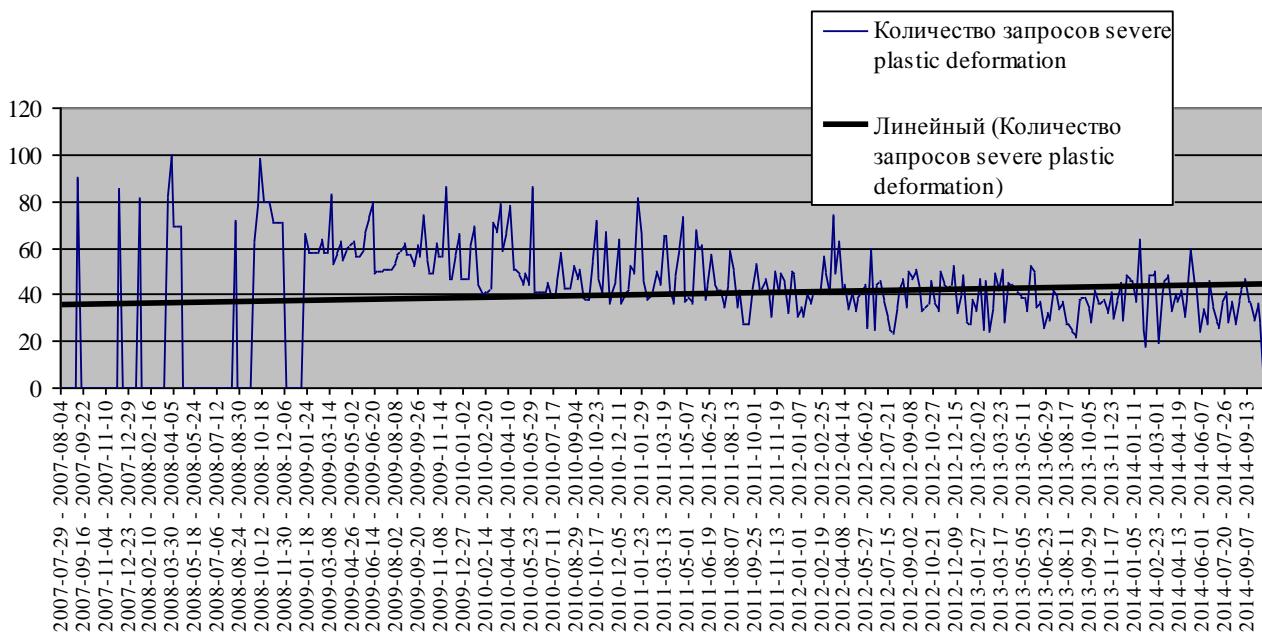


Рисунок 8 – Динамика запросов «*severe plastic deformation*» в мировом Интернете с линией тренда.

## Заключение

**Разработка объёмно-nanostructured materials становится одним из наиболее актуальных направлений современного материаловедения.** Особое внимание в этой теме привлекает использование методов ИПД, поскольку это открывает возможности разработки различных технологий получения объёмных полуфабрикатов в виде листов, прутков, тонких фольг, проволоки для различных конкретных применений. В последние годы было продемонстрировано получение необычных свойств, таких как очень высокая прочность, рекордная усталостная долговечность, сверхпластичность на целом ряде металлов и сплавов. Показана на практике возможность значительного повышения прочности с одновременным повышением усталостной прочности, хладостойкости, огнестойкости, стойкости к электрохимической коррозии в низкоуглеродистых сталях, усталостной прочности и максимально обратимой деформации в сплавах с памятью формы.

Достигнутые результаты позволяют сделать выводы, что в сравнении с традиционными материалами НМ дают, и это по-видимому не предел, **повышение твердости в 2 – 7 раз, предела прочности в 1,5 – 8 раз, предела теку-**

**части в 2 – 3 раза**, проявляют эффект сверхпластичности у металлов и пластиности у керамик и т.д. Предельные свойства НС материалов ещё не определены. Результаты, полученные в основном экспериментально-опытным путем, тем не менее, свидетельствуют, что **работы в этом направлении позволяют добиться в качественном и количественном отношении кардинального улучшения свойств и создания нового класса материалов.**

Реализация представленных в аналитическом обзоре предложений по развитию исследований и разработок по приоритетному направлению «*Новые материалы и нанотехнологии*» обеспечит решение основной стратегической задачи Государственной программы Российской Федерации «*Развитие науки и технологий*» на 2013 – 2020 годы.

## **Список литературы**

1. Гапоненко Н.В. Нанокомпании на российском рынке: тенденции, проблемы, стратегии// Инновации, №6 (164), 2012;
2. А. Хульман Экономическое развитие нанотехнологий. Обзор индикаторов// Инновации и экономика. 2009. Форсайт. №1 (9). с. 30-47;
3. Программа развитияnanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года. 2008. [<http://old.mon.gov.ru/work/nti/dok/str/nano15.doc>];
4. Гапоненко Н.В. Выиграет ли Россия великую наногонку? Экономические стратегии. №5/2012;
5. Гапоненко Н.В. Формирование базы знаний для развития нанотехнологий: тенденции и проблемы Российской нанонауки. Доклад ИП РАН на конференции «Экспертиза научно-технических проектов в области создания новых материалов и нанотехнологий» в рамках 13 Международного форума «Высокие технологии XXI века», 19.04.2013, Экспоцентр на Красной Пресне, г. Москва;
6. Лимарёва Д.А. ЮРИФ РАНХиГС, Анализ состояния национальной инновационной системы России и направления её развития. Эл. журнал «SCI-ARTICLE.RU», раздел «Экономика», №3 (ноябрь), 2013;

7. Лякишев Н.П., Николаев А.В. Некоторые вопросы металлургической технологии будущего// Металлы. 2002;
8. Быков Ю.А. Конструкционные наноматериалы// Металлургия машиностроения, №1 2011, с. 9-19 и №2 2011, с.27-36;
9. Terence G. Langdon. The Current Status of Bulk Nanosrtuctured Materials. Rev.Adv.Mater.Sci. 31(2012) 1-4;
10. R.Z. Valiev, M.J. Zehetbauer, Y. Estrin, H.W. Höppel, Y. Ivanisenko, H. Hahn, G. Wilde, H.J. Roven, X. Sauvage and T.G. Langdon. The Innovation Potential of Bulk Nanostructured Materials//Advanced Engineering Materials. Volume 9, Issue 7, pages 527–533, July, 2007;
11. Terence G. Langdon. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement// 2013 Acta Materialia 61 (2013) 7035–7059;
12. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.;
13. Siegel R.W., Fouger G.E. Mechanical properties of nanophase metals // Nanostr. Mat. 1995. V. 6. № 1-4;
14. Боткин А.В. «Научно-методические основы проектирования процессов углового прессования», Автореферат диссертации на соиск. уч. степени доктора технических наук. Издано ООО «Печатный дом ИП Верко», г. Уфа, 2014 г. Защита 26.11.2914;
15. R.Z. Valiev, A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon, Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, 2014 by John Wiley & Sons, Inc., 456 pages;
16. Terry Lowe «Market of «Bulk nanostructured materials», report BNM 2011 August 22-26, 2011;
17. Княгинин В.Н. Базовая гипотеза промышленного форсайта, 2011. [[http://www.csr-nw.ru/upload/file\\_content\\_343.pdf](http://www.csr-nw.ru/upload/file_content_343.pdf)].