

## **Важнейшие результаты, полученные в 2014 г.**

На основе результатов испытаний разработанного ранее макета создана рабочая модель энергоэффективной катодолюминисцентной лампы с металлическим полевым катодом с нанокристаллической структурой, полученной деформационным методом.

Методом сварки давлением с использованием никелевой прослойки получено твердофазное соединение магнитотвердого сплава 25X15K и Стали 3, обладающее высокой прочностью на отрыв. Полученный результат может быть использован при разработке крупногабаритных композитных магнитных роторов со стальным сердечником, способных работать при высоких скоростях вращения.

Для изготовления приводного диска газовой центрифуги выбран материал - мартенситно-стареющая сталь ЭП-836, обладающая высоким комплексом прочностных и магнитных характеристик. Определен режим деформационно-термического воздействия на микроструктуру этой стали, позволяющий дополнительно повысить ее прочностные свойства на 10%, а магнитные характеристики - на 50-100%.

На примере графана впервые представлено доказательство существования дискретных бризеров в кристаллическом твердом теле, основанное на первопринципных расчетах, использующих функционал электронной плотности. Этот результат имеет принципиальное значение, поскольку все предшествующие численные результаты по дискретным бризерам были получены методом молекулярной динамики, опирающимся на эмпирические межатомные потенциалы.

## **Сведения о других результатах, достигнутых в 2014 г.**

Методом дифракции обратно рассеянных электронов исследована микроструктура и текстура керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $Y123$ ), деформированной горячим кручением под квазигидростатическим давлением. Показано, что локальный средний размер зерна не зависит от расстояния до центра образца. Напротив, текстура вдоль радиуса образцов неоднородна: обнаружено наличие кольцеобразного участка с очень низким уровнем текстуры, как на образцах с острой, так и слабой средней текстурой. Полученный результат может быть использован для получения кольцеобразных изделий из высокотемпературных сверхпроводников, обладающих высокими характеристиками сверхпроводимости.

Методом кручения под высоким давлением получено твердофазное соединение Al и Mg в виде сэндвичей Al-Mg-Al. Проведены экспериментальные исследования градиентной структуры полученных образцов. Показано, что при деформации методом кручения под высоким давлением за ограниченное количество полных оборотов при комнатной температуре образуется интерметаллидное соединение  $Al_3Mg_3$ .

На примере технически чистых никеля, меди, вольфрама и алюминиевого сплава АМг6 показано, что уменьшение размера зерен металлов с 10 мкм до 100 нм приводит к уменьшению работы выхода электрона из них на 0,3-0,8 эВ. Эффект подтверждается измерениями с использованием двух методов - метода контактной разности потенциалов и метода, основанного на исследовании автоэлектронной эмиссии.

Исследования методом молекулярной динамики атомной структуры нанолент графена показали, что существование сложных конфигураций морщин в двумерных материалах обеспечивается наличием их стыков, получивших название ринклонов

(wrinklon). Морфология стационарных конфигураций ринклонов определяется краевыми и начальными условиями и приложенной деформацией. На достаточном удалении от закрепленного края наноленты длинноволновая конфигурация морщин оказывается более выгодной, и наблюдается движение ринклона за счет уменьшения части наноленты с коротковолновыми морщинами.

Установлено, что при комбинированной деформационной обработке высоколегированных псевдо- $\beta$ -сплавов титана, включающей обратимое водородное легирование, введение в сплав водорода позволяет при деформации в однофазной  $\beta$ -области подавить процессы динамического возврата и обеспечить за счет развития динамической рекристаллизации формирование ультрамелкозернистой структуры с размером  $\beta$ -зерен 2 мкм. Ранее столь мелкие  $\beta$ -зерна в сплавах титана наблюдали только после деформации в двухфазной области.

На примере сплава MA14 показано, что всесторонняя изотермическая ковка с поэтапным понижением температуры формирует в массивных заготовках из магниевых сплавов однородную структуру с размером зерен 2-4 мкм, равномерным распределением избыточных фаз, слабой текстурой и изотропными параметрами статической прочности при комнатной температуре. Такая структура возникает благодаря тому, что в процессековки материал переходит в сверхпластическое состояние.

Обнаружено, что протекающие при нагреве ультрамелкозернистого сплава Al-4%Cu-0,5%Zr релаксационные процессы сопровождаются вращением зёрен. Анализ кинетики вращения зерен в рамках дискретно-дислокационного моделирования показал хорошее согласие численных оценок времени поворота с экспериментом.

В результате формирования ультрамелкозернистой структуры при кручении под высоким давлением в сплаве  $Ni_{32}Mn_{24}Ga_{24}$  происходит разрушение ферромагнитного порядка и подавление мартенситного превращения. При отжиге при температурах 400-800°C происходит рекристаллизация, увеличение среднего размера зерен от 0,18 мкм до 37 мкм и постепенное восстановление ферромагнитного порядка. Восстановление мартенситного превращения наблюдается после отжига сплава при 500°C, когда средний размер зерен достигает значения 1 мкм.

Продемонстрировано значительное одновременное увеличение прочности, пластичности и ударной вязкости ультрамелкозернистого никеля при ультразвуковой обработке, что объясняется релаксационным воздействием ультразвука на дефектную структуру материала. Эффект зависит от амплитуды ультразвука: существует оптимальная амплитуда, при которой повышение механических свойств максимально.

Компьютерным моделированием сварки давлением разнородных материалов показано, что модифицирование одной из свариваемых поверхностей периодической системой мелких выступов позволяет существенно улучшить однородность деформации при сварке и избежать образования застойных зон. На примере сварки интерметаллидного сплава ВКНА-4У в монокристаллическом состоянии и сплава ЭК61 в ультрамелкозернистом состоянии показано, что рельеф, наносимый на образец из сплава ВКНА-4У, должен иметь переменную глубину, увеличивающуюся по линейному закону от периферии к центру образца.

Методом диффузионной сварки получен композитный материал на основе молибдена и титанового сплава ВТ6, сочетающий в себе высокую жаропрочность, малый вес и технологичность. Установлены зависимости прочности исследуемого

твердофазного соединения разнородных жаропрочных материалов от температурно-временных режимов диффузионной сварки давлением. Получено соединение с прочностью на отрыв, составляющей 98 % от предела прочности отожженного молибдена.

С использованием трехмерного анализа методом лазерной сканирующей микроскопии исследована морфология поверхности полусфер, полученных сверхпластической формовкой из ультрамелкозернистых листов титанового сплава ВТ6 при температуре 600°C в различных средах – на воздухе и в вакууме. Показано, что морфология рельефа внешней поверхности существенно зависит от условий внешней среды: при формовке на воздухе интегральная асимметрия и эксцесс рельефа существенно выше, чем при формовке в вакууме.

Изучено влияние вакуумного отжига на структуру и микротвердость приповерхностных слоев плоских образцов титанового сплава ВТ6 с антисварочными покрытиями из  $\text{VN}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и без них. Методом акустической эмиссии изучено зарождение трещин при деформации изгибом до начала пластического течения. Установлено, что при холодной деформации из приповерхностного измененного слоя возникают и распространяются вглубь материала трещины. Наименьшая толщина измененного слоя и большая трещиностойкость обеспечиваются покрытием  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

На основе исследования микроструктуры, микротвердости и сравнения кривых изнашивания в процессе испытаний на износ литого баббита Б83, электроосажденного баббита и баббита, полученного жидкой штамповкой с мелкими, диспергированными частицами  $\beta$ -фазы, предложен механизм износа на стадии приработки многофазного антифрикционного материала. Согласно этому механизму приработка при износе сводится к диспергированию крупных интерметаллидных частиц  $\beta$ -фазы путем их скола, впрессовыванию образующихся частиц в мягкую пластичную матрицу и формированию достаточно однородного и равномерно замощенного твердыми мелкими частицами покрытия. Зависимость износа от эффективной твердости покрытия подчиняется соотношению Арчарда.

Установлено, что микроструктура и химический состав электроосажденного сплава  $\text{SnSbCu}$  в значительной степени зависит от концентрации сурьмы и наличия поверхностно-активных веществ в электролите. Введение в электролит поверхностно-активных веществ приводит к образованию более мелкозернистой структуры осаждаемого сплава. Низкая концентрация сурьмы в электролите (0,01 и 0,0125 М) вызывает образование твердого раствора олова, содержащего фазы  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и  $\text{Sn}_3\text{Sb}_2$ . Увеличение концентрации сурьмы до 0,0175 М приводит к образованию смеси интерметаллидов  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ .

Получен сплав  $\text{Ti-45Al-5Fe}$  (ат. %) с примерным соотношением фаз  $\gamma\text{-TiAl}$ ,  $\tau_2\text{-Al}_2\text{TiFe}$  и  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ , равным 75:20:5. Благодаря относительно мелкозернистой структуре и малому содержанию хрупкой  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  фазы, этот сплав в литом состоянии обладает повышенной по сравнению с  $\gamma\text{-TiAl}$  сплавами последнего поколения пластичностью при сохранении схожих значений прочности при комнатной и повышенных температурах.