

### **Важнейшие результаты, полученные в 2012 г.**

Разработана композиция перспективного интерметаллидного сплава на основе орторомбической  $Ti_2AlNb$ -фазы с пониженным удельным весом ( $\rho \approx 5,0 \text{ г/см}^3$ ), который может представлять интерес в качестве конструкционного материала для авиационной техники, и режимы всесторонней изотермическойковки, обеспечивающие формирование в материале однородной ультрамелкозернистой структуры. Установлено, что ультрамелкозернистый интерметаллид обладает высокой прочностью ( $\sigma_b=1400 \text{ МПа}$ ) и удовлетворительной пластичностью ( $\delta=5,5\%$ ) при комнатной температуре, а также хорошей технологической пластичностью при температурах  $750-900^\circ\text{C}$  ( $\delta=660-1100 \%$ ).

Показано, что формирование в прутках низкоуглеродистой стали 12ГБА ультрамелкозернистой волокнистой структуры приводит к повышению их прочности почти в 2 раза (примерно до  $800 \text{ МПа}$ ) относительно исходного крупнозернистого состояния при сохранении удовлетворительной пластичности ( $\delta=18 \%$ ). При этом порог хладноломкости смещается с  $-30^\circ\text{C}$  до  $-80^\circ\text{C}$ , что делает этот материал перспективным для использования в условиях Севера.

Развит многополевой подход к анализу свойств хиральных структур микрополярного типа. Для материалов на основе решеток Коссера с частицами конечного размера и сложными связями балочного типа построены многополевые континуальные аппроксимации. Показано, что вращательные степени свободы частиц конечных размеров могут приводить к появлению ауксетических свойств (отрицательному коэффициенту Пуассона) таких материалов. Разработанная теория расширяет возможности континуального подхода к описанию свойств дискретных систем со сложной микроструктурой за счет учета не только поступательных, но и вращательных степеней свободы частиц.

Получены электрохимические покрытия, близкие по составу к баббиту Б83, с улучшенными антифрикционными свойствами для использования в подшипниках скольжения. Нанесенные на подложку из бронзы, эти покрытия позволяют снизить интенсивность изнашивания и значения износа в 8-10 раз по сравнению с баббитом Б83, имеющим литую структуру. Повышение свойств объясняется формированием более мелкозернистой структуры в электроосажденном покрытии. Существенно меньшая толщина электрохимических покрытий делает их экономически более выгодными антифрикционными покрытиями по сравнению с литыми.

### **Сведения о других результатах, достигнутых в 2012 г.**

При испытаниях в условиях динамического сжатия со скоростями порядка  $10^3-10^4 \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре образцов алюминиевого сплава 1570 с бимодальной структурой, состоящей из зерен с размерами около 1 и 20 мкм в объемном соотношении 70:30, обнаружена сигмоидальная зависимость напряжения течения от скорости деформации с коэффициентом скоростной чувствительности, близким к 0,4. Такое поведение, типичное только для структурной сверхпластичности материалов, обычно проявляющейся при высоких температурах и низких скоростях деформации, может представить практический интерес для реализации в процессах высокоскоростной штамповки деталей из алюминиевых сплавов.

Для кристаллов со структурой NaCl с равной и сильно различающейся массой анионов и катионов рассчитана плотность фононных состояний для различных температур. При значительной разнице масс компонент в спектре фононных состояний имеется широкая запрещенная зона, что при достаточно высоких температурах приводит к спонтанному возбуждению нелинейных локализованных

колебательных мод - щелевых дискретных бризеров, имеющих частоты внутри запрещенной зоны. При повышенных температурах появляется пик плотности фононных состояний, лежащий выше спектра линейных колебаний, что может свидетельствовать о существовании дискретных бризеров с соответствующими частотами. Представленные результаты ставят вопрос теоретического обоснования и экспериментального обнаружения бризеров с частотами выше фононного спектра.

Методом молекулярной динамики показана возможность возбуждения щелевого дискретного бризера поляризации [111] в кристалле со структурой NaCl со значительной разницей масс анионов и катионов. Бризер существует как в недеформированном кристалле, так и в кристалле, подверженном значительной одноосной или двухосной упругой деформации. Получена зависимость частоты бризера от амплитуды при заданной деформации.

При исследовании релаксации малоугловой границы наклона в тонкой пленке путем переползания дислокаций обнаружено, что, вопреки предсказываемому анализом сил изображения полному выходу дислокаций из пленки и исчезновению границы, в пленке всегда остается метастабильная стенка, состоящая из 18 дислокаций. Этот кажущийся парадоксальным результат вытекает из решения краевой задачи для упругого поля дислокации в тонкой пленке, в корне отличающегося от решения в полубесконечной среде, и важен для анализа стабильности границ зерен и субзерен в тонких пленках и вращения наночастиц металлов на подложке.

Проанализировано механическое поведение при ударном нагружении образцов из титанового сплава ВТ6 с различным типом структуры. Наиболее высокую ударную вязкость демонстрируют образцы сплава в крупнопластинчатом состоянии. При переходе от крупнопластинчатого состояния к ультрамелкозернистому равноосному работа зарождения трещины повышается примерно на 55%, а работа ее распространения снижается на 70%.

На основе теоретического анализа и результатов конечно-элементного моделирования сверхпластической формовки трехслойной полый конструкции с гофрированным заполнителем типа полый лопатки установлен вид зависимости давления газа от времени, обеспечивающий формирование ребер жесткости и наименьшее общее время процесса формовки.

Установлено, что снижение порогового давления фазового превращения  $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \beta$  при кручении под высоким давлением циркония объясняется образованием в  $\alpha$ -фазе деформационных двойников, границы которых являются зародышами новой  $\omega$ -фазы, далее превращающейся в  $\beta$ -фазу.

Ионно-лучевым травлением на поверхности нанокристаллического никеля получен многоострый рельеф с высокой плотностью остриев. При полевого эмиссионного катода из такого материала получен ток 100-150 мкА при приложенном потенциале от 800 В до 1,5 кВ. Дальнейшее повышение эмиссионного тока может открыть новые перспективы в изготовлении недорогих полевых катодов на основе нанокристаллических металлов.

Отжиг закаленного магнитотвердого сплава Fe-22%Cr-15%Co при температурах в интервале 800-1200°C, предваряющий ступенчатую термообработку на высококоэрцитивное состояние по ГОСТ 24897-81, позволяет получить образцы со стандартной величиной коэрцитивной силы и повышенными характеристиками прочности. Это объясняется выделением при отжиге пластинчатой  $\gamma$ -фазы в матричных зернах  $\alpha$ -фазы.

Методом молекулярной динамики показана возможность возбуждения дискретных бризеров на краю растянутой наноленты графена ориентации «кресло». Время жизни дискретных бризеров может достигать тысяч периодов колебаний. Локализованные нелинейные колебания в форме дискретных бризеров могут играть важную роль при зарождении дефектов или трещин в растянутых графеновых нанолентах.

Исследованы морщины на графеновых нанолентах с закрепленными краями. Показано, что в достаточно широких нанолентах понижение потенциальной энергии может быть достигнуто за счет образования ринклонов, то есть областей, где две или большее число морщин сливаются в одну.

При ультразвуковой обработке ультрамелкозернистого технически чистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием (РКУП), обнаружено одновременное повышение предела прочности и пластичности. Микроструктурные исследования показывают, что это связано с возвратом структуры границ зерен и субзерен.

Методом всесторонней изотермическойковки с поэтапным снижением температуры до 300 С в сплаве Э 125 (Zr-2,5%Nb) получено однородное структурное состояние со средним размером зерен 200 нм, характеризующееся повышенным пределом прочности, равным 600 МПа и, как предполагается, повышенной радиационной стойкостью.

Методом молекулярной динамики рассчитана теоретическая прочность на сдвиг чистых ОЦК металлов (W,  $\alpha$ -Fe и Mo) и упорядоченного сплава NiAl. Теоретическая прочность убывает линейно с ростом температуры, а соответствующая ей критическая степень сдвиговой деформации снижается нелинейно с температурой в случае ОЦК металлов и остается практически неизменной для сплава NiAl. Последнее связано с нарушением ближнего порядка в результате сдвига кристалла NiAl.

Для литейных  $\gamma$ -TiAl сплавов показаны возможности улучшения их механических свойств с помощью термической обработки. Полученные механические свойства близки к требованиям, предъявляемым к материалу лопатки турбины низкого давления или компрессорной лопатки ГТД.

Для деформируемого сплава состава Ti-43Al-4Nb-1Mo-0,05B (ат. %) показано, что он может успешно деформироваться в изотермических условиях при относительно низких температурах - существенно ниже температуры разупорядочения  $\alpha_2$ -фазы, что достигается благодаря относительно мелкозернистой исходной структуре слитка и предварительной термической обработке, обеспечившей присутствие пластичной  $\beta$ (B2)-фазы и увеличенное по сравнению с литым состоянием межпластинчатое расстояние.

Установлена возможность осуществления качественной сварки давлением крупнозернистых образцов никелевого сплава ХН58МБЮД-ИД с использованием ультрамелкозернистых прокладок того же материала при относительно низких температурах, что позволяет осуществлять процесс соединения без вакуума.

Путем горячей деформации кручением с очень низкой скоростью получена рекордная для объемной сверхпроводящей керамики Bi(Pb)2223 текстура с фактором ориентации базисных плоскостей, равным  $F=0,993$ , что позволяет достичь наиболее высокой плотности критического тока.