

Важнейшие результаты, полученные в 2011 г.

При исследовании воздействия ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства никеля, подвергнутого равноканальному угловому прессованию, обнаружено, что при определенной амплитуде знакопеременных напряжений можно достичь заметного повышения пластичности ультрамелкозернистого материала при сохранении его прочностных характеристик. Результат демонстрирует принципиальную возможность использования ультразвука для повышения комплекса свойств ультрамелкозернистых металлов.

Установлено, что дополнительный эффект упрочнения термоупрочняемого алюминиевого сплава 1965 (Al-8Zn-2,5Mg-2Cu-0,1Zr-0,27Sc) за счет формирования наноразмерной сетки границ зерен путем интенсивной деформации кручением под высоким давлением при комнатной температуре составляет примерно 200 МПа. Это обеспечивает уникальный уровень статической прочности сплава при растяжении при комнатной температуре, которая достигает 1000 МПа.

Разработана технология изготовления ключевого элемента перспективного гражданского авиационного двигателя ПД14 - полый широкохордной лопатки вентилятора. В технологии использован развиваемый в институте метод совмещенной сверхпластической формовки и сварки давлением. Впервые в России изготовлена партия полноразмерных лопаток для стендовых испытаний.

Сведения о других результатах, достигнутых в 2011 г.

Комбинацией равноканального углового прессования и прокатки получены тонкие ультрамелкозернистые листовые заготовки из алюминиевого сплава 1570С с уникальным сочетанием параметров статической прочности при комнатной температуре и характеристик сверхпластичности. Сплав демонстрирует высокоскоростную сверхпластичность в широком температурном интервале с максимальными удлинениями до $\delta \approx 2800\%$.

Интенсивное разупрочнение предварительно закаленного и криопрокатанного сплава Д16 при пост-деформационном старении при температурах выше 150°C обусловлено изменением стадийности распада алюминиевого твердого раствора и природы его продуктов, образующихся в процессе рекристаллизации, а именно выделением модификаций не только обычно упрочняющей сплав S-фазы (Al₂CuMg), но и θ -фазы (Al₂Cu).

Расширен состав литейных γ -TiAl сплавов, позволяющий после соответствующей термической обработки получить механические свойства, близкие к требованиям, предъявляемым к материалу лопатки турбины низкого давления газотурбинного двигателя (ГТД). Это Ti-(43-45)Al-(2,5-5)Nb-(0-1)Cr-0,2-1Mo-0,2B (ат. %). Показаны возможности улучшения механических свойств литейных γ -TiAl сплавов через уточнение режимов его термической обработки. Для деформируемых сплавов состава Ti-43Al-5Nb-(1-2)Mo-0.2B (ат. %) показано, что они могут успешно деформироваться в изотермических условиях при температурах существенно ниже температуры разупорядочения α_2 -фазы. Это достигается благодаря относительно мелкозернистой структуре слитка и присутствию β (B2)-фазы.

Для ряда промышленных жаропрочных сплавов никеля с различным фазовым составом методами компьютерного моделирования процесса осадки полуфабрикатов и экспериментального исследования модельных образцов определено соответствие между степенью деформации и размером зерен в полученных образцах.

Испытания на усталость при комнатной температуре образцов сплава Inconel 718 после изотермическойковки и термической обработки показали, что усталостные свойства ультрамелкозернистого сплава на базе 10^5 и 10^6 циклов более чем в 1,5 раза превышают усталостные свойства крупнозернистого сплава.

Метод кручения под давлением позволяет получить более острую базисную текстуру в высокотемпературных сверхпроводящих керамиках, чем метод сжатия. Однако применительно к керамике Y123 этот метод не дает возможности получить базисную текстуру с $F > 0,97$. Текстура размывается из-за роста аномально крупных зерен с паразитной текстурной компонентой.

Поведение слоистого материала, полученного сваркой давлением ультрамелкозернистых листов титанового сплава BT6, при ударном разрушении существенно зависит от расположения поверхностей твердофазного соединения по отношению к распространяющейся магистральной трещине, а также от пористости соединения. При отсутствии пористости наиболее высокая ударная вязкость наблюдается при распространении трещины по плоскости, нормальной к плоскостям слоев, в направлении, параллельном слоям. Пористость в зоне твердофазного соединения снижает ударную вязкость образцов с таким расположением поверхностей соединения и значительно повышает ее для образцов с «тормозящей» ориентацией поверхностей соединения, когда трещина распространяется нормально к слоям.

На основании результатов механических испытаний, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований получены экспериментальные доказательства наличия эффекта естественного старения в титановом сплаве BT22, приводящего к значительному снижению его пластичности.

С помощью электронно-микроскопических исследований зоны твердофазного соединения титанового сплава BT6 с нержавеющей сталью через никелевую прослойку установлено, что при температуре сварки выше 750°C формируются и растрескиваются интерметаллидные слои $\text{TiNi}_3(\text{Ti}_2\text{Ni})$, что вызывает снижение прочности соединения. Поэтому сварку необходимо проводить при более низкой температуре. Результат важен для разработки научно-обоснованных режимов твердофазной сварки, обеспечивающих достижение качественного неразъемного соединения.

Разработан метод получения магний-углеродного композита, основанный на пропитке волокон расплавом магниевого сплава под давлением в пресс-форме. Метод позволяет получать композит с удельной прочностью, в 2,5 раза превышающей удельную прочность титанового сплава BT6. Изготовлен макет лопатки газотурбинного двигателя из указанного композита с защитной титановой накладкой.

Исследовано изменение работы выхода электрона в никеле в зависимости от размера зерен. С уменьшением последнего в интервале 100 нм – 10 мкм работа выхода нелинейно уменьшается, при этом наиболее быстрое уменьшение наблюдается в интервале 150-100 нм. Это обусловлено увеличением роли границ при малых размерах зерен.

Работа выхода электрона нанокристаллического Ni, полученного методом интенсивной пластической деформации кручением, повышается на 0,15 эВ в результате последующего ультразвукового воздействия, что объясняется развитием релаксационных процессов в границах зерен.

Формирование нанокристаллической структуры со средним размером зерен около 100 нм приводит к существенному, на 0,26 эВ, снижению потенциального барьера в металле по сравнению с крупнозернистыми металлами, что связано со снижением уровня Ферми. Возврат структуры при отжиге нанокристаллического металла сопровождается смещением уровня Ферми к равновесному положению и возврату значения потенциального барьера.

Установлено, что коэффициент ионно-электронной эмиссии в нанокристаллическом сплаве AMg6 примерно на 40% выше, чем в крупнокристаллическом сплаве, что является следствием пониженной работы выхода электрона в нанокристаллах.

Методом ионно-лучевого распыления на поверхности нанокристаллического никеля получена острая структура с существенно более высокой плотностью острий, чем при использовании крупнокристаллического никеля. Результат может стать основой для изготовления многоострийных холодных катодов с улучшенными эмиссионными характеристиками.

Деформация цилиндрических образцов сплавов системы Fe-22%Cr-15%Co методом комбинированного нагружения, имеющего компоненты растяжения и кручения, в условиях сверхпластичности приводит к формированию градиентной микроструктуры с мелкими зернами в периферии и крупными в центре, что обеспечивает повышение прочностных характеристик при сохранении магнитных свойств.

Стабильность температурного интервала прямого и обратного мартенситного переходов при термоциклировании сплава Ti-49,8%Ni определяется совместным действием двух противоположных процессов - упрочнения материала при мартенситных переходах и возврата, интенсивность которых определяется структурой, полученной непосредственно после деформации, и температурно-скоростным режимом последующего циклирования.

При термоциклировании сплава Ti-49,8%Ni через интервалы мартенситных превращений после прокатки при температурах 400, 500 и 600°C скачок дилатации в процессе фазовых переходов не остается постоянным, что обусловлено развитием текстуры ($\langle 010 \rangle_{B19'}$ //RD) в материале.

При отжиге сплавов с эффектом памяти формы $Ni_{43,4}Mn_{45,3}In_{11,3}$ и $Ni_{45,7}Mn_{40,7}In_{13,6}$ происходит улучшение их функциональных свойств, но при этом происходит рост температуры фазового перехода в них. Наибольшая температура фазового перехода и наиболее широкий температурный гистерезис при нагревании и охлаждении образца соответствуют состоянию, полученному после отжига при 843 К.

Формирование ультрамелкозернистой структуры с размером зерен 0,4 мкм в низкоуглеродистой малолегированной стали 12ГБА методом всесторонней изотермическойковки понижает температуру вязко-хрупкого перехода до -70°C, что на 40°C ниже по сравнению с крупнозернистым состоянием. При этом величина ударной вязкости (KCV) увеличивается на 30%.

Применение электрохимически нанесенных антифрикционных покрытий на основе меди и олова на бронзу позволяет снизить значения ее износа в 1,6-14 раз, при нанесении на медь – в 5-49 раз. При этом существенно снижается также интенсивность изнашивания на установившейся стадии. По сравнению с существующими покрытиями и способами их нанесения, разработанные покрытия позволяют не менее чем в 1,5 раза увеличить ресурс подшипников скольжения.

По результатам экспериментальных исследований выбраны рациональные режимы деформационно-термической обработки прутков меди с использованием процесса радиально-сдвиговой прокатки, обеспечивающие формирование поверхностного слоя с мелкозернистой структурой.

Показано, что, если в чистом цирконии комбинация давления со сдвигом снижает значение порогового давления для начала фазового превращения альфа-омега в несколько раз, то в сплаве Zr-Nb это снижение составляет порядок величины. При наличии текстуры, когда базисная плоскость ориентирована параллельно направлению сжатия при КГД, также происходит более значительное снижение порогового напряжения, чем в бестекстурном состоянии.

Путем математического моделирования установлено, что для получения информации о наличии дефектов в элементах полых трехслойных конструкций методом цифровой голографической интерферометрии целесообразно использовать нагружение внутренним давлением, поскольку при нагружении изгибом и кручением рассматриваемые дефекты заметно себя не проявляют. При нагружении внутренним давлением, закрепление следует производить по всему контуру конструкции.

Методами атомистического моделирования рассчитана область устойчивости листа графена в пространстве трех компонент тензора плоской деформации. Исследована зависимость скоростей звука в графене от приложенной деформации и показано, что обращение любой из скоростей звука в ноль может служить критерием устойчивости плоского листа графена. Показано, что при одноосном растяжении графена в направлении зигзаг, в его фононном спектре образуется щель, и при этом оказывается возможным возбуждение пространственно локализованных колебательных мод большой амплитуды - дискретных бризеров.

Методом молекулярной динамики исследовано влияние температуры на теоретическую прочность алюминия и меди. Показано, что при комнатной температуре прочность бездефектных кристаллов под действием сдвиговых напряжений на 20-25% ниже по сравнению с теоретической прочностью при нулевой температуре.