

Важнейшие научные достижения ИФПМ СО РАН за 2014 год

Теоретически и экспериментально обосновано возникновение в деформируемом твердом теле принципиально нового типа деформационных дефектов – межузельных бифуркационных вакансий (МБВ) в зонах локальной кривизны кристаллической структуры. Они лежат в основе механизмов генерации всех известных деформационных дефектов: дислокаций, дисклинаций, полос сдвига и трещин. Межузельные бифуркационные вакансии вызывают аномальные кинетические процессы в зонах кривизны кристаллической структуры: холодное растворение металлов или их холодное сплавообразование, вязкое бездислокационное пластическое течение в экстремальных условиях нагружения, развитие структурной турбулентности, эффект хладноломкости ОЦК конструкционных материалов при отрицательных температурах. МБВ являются основой для построения нелинейной механики пластической деформации и разрушения.

Показано, что введенный ранее на основе экспериментальных измерений характеристик локализованной автоволновой пластической деформации упругопластический инвариант

$$\frac{\lambda \cdot V_{aw}}{\chi \cdot V_i} \equiv \frac{\lambda}{\chi} \cdot \frac{V_{aw}}{V_i} = const = Z, \text{ где } Z = 2/3 \pm 1/4,$$

выполняется для различных мод деформации, являясь основным уравнением автоволновой модели пластичности. Характеризующие процесс пластического течения произведения скоростей на соответствующие длины не меняются для следующих мод деформации: движение очагов локализованной пластичности на стадии легкого скольжения; распространение фазовых автоволн локализованной пластичности на стадии линейного деформационного упрочнения; движение индивидуальных дислокаций; распространение упругих волн.

Предложен и обоснован многоуровневый механизм формирования рельефа на поверхности тонких пленок Ti на подложке Cu, подобный упругой неустойчивости тонкой пластины при сжатии. Изначально в подложке происходит интенсивная генерация дефектов кристаллической решетки. Пленка препятствует стоку и аннигиляции вакансий, что повышает диффузионную подвижность атомов. Сжимающие напряжения приводят к постепенному изгибу пленки, что сопровождается перераспределением материала в поверхностном слое. Далее релаксация напряжений происходит за счет увеличения поперечного размера складок, их объединения в более крупные структуры, имеющие больший радиус кривизны.

Разработана модель описания волн разрушения в ударно сжатом хрупком материале. Модель основана на идее формирования очагов разрушения на интерфейсах в ударно сжатом материале, имеющих исходные повреждения. Показано, что скорость волны разрушения может изменяться в широких пределах и определяется скоростью накопления в среде повреждений. Установлено, что механические свойства проницаемых

флюидонасыщенных хрупких материалов (включая прочность и величину дилатансии) определяются соотношением скорости деформирования и скорости перераспределения флюида в трещинно-поровом пространстве. Построена обобщающая зависимость прочности на сжатие образцов флюидонасыщенных хрупких материалов от приведенного параметра проницаемости. Полученные результаты являются значимыми для понимания закономерностей неупругого деформирования фрагментов геосреды вблизи критического состояния.

Установлено, что переход от электронного к электронно-ионно-плазменному способу обработки поверхности определяет смену одного механизма модификации структурно-фазового состояния поверхностного слоя металлокерамических сплавов за счет межфазного взаимодействия их компонентов в неравновесных условиях сверхвысокоскоростного нагрева и охлаждения на другой механизм модификации, включающий дополнительно к описанному механическое наномасштабное диспергирование частиц керамической компоненты тяжелыми ионами. Электронно-ионно-плазменная обработка, основанная на использовании плазмообразующих газов с низкой энергией ионизации и большей атомной массой, является новым высокоэффективным методом повышения стойкости промышленных изделий – металлорежущих пластин из твердых сплавов с высоким содержанием керамической компоненты.

Установлено, что в процессе многочасовых дорекристаллизационных отжигов при температуре 673 К ($\sim 0,3 T_{пл}$) ультрамелкозернистых ($\alpha+\beta$) титановых сплавов (размер зерен $\sim 0,2$ мкм), полученных методами интенсивной пластической деформации, наблюдается высокая термическая стабильность структуры и механических свойств (предел прочности ~ 1500 МПа, предел текучести ~ 1410 МПа), обусловленная конкурирующим развитием наряду с отпускком, вызывающим снижение прочностных характеристик, $\beta \rightarrow \alpha$ фазового превращения, сопровождающегося выделением наноразмерных (20-30 нм) частиц и формированием термостабильной высокопрочной ультрамелкозернистой композиционной структуры.

Синтез и детальное исследование комплекса физико-химических свойств 3D-наноструктур псевдобемита, полученных реакцией с водой электровзрывных нанопорошков Al и AlN/Al, позволили разработать феноменологическую модель процесса формирования пространственных наноструктур. При помещении нанопорошков в воду происходит гидратация и растворение поверхностной оксидной пленки с последующим гидролизом слоя нитрида алюминия и окисления Al. При этом на поверхности частиц образуются зародыши фазы бемита, анизотропный рост которых приводит к образованию нанолитов и формированию пористой 3D-наноструктуры псевдобемита размером 500-600 нм с удельной поверхностью 250-350 м²/г и объемом мезопор 0.363-0.439 см³/г.

Решена фундаментальная научная задача о физической природе локальных структурных перестроек – предшественников структурных

дефектов в кристаллических материалах при механическом нагружении. Молекулярно-динамическое моделирование показало, что генерация дефектов структуры всегда ассистируется локальным увеличением объема в области их зарождения. Величина скачкообразного увеличения объема при прямых и обратных структурных перестройках сравнима со скачком объема при плавлении и лежит в интервале 5-7 %. При этом, локальные структурные трансформации и соответствующее увеличение объема определяются тепловыми флуктуациями атомной решетки.

Установлено, что при окислении многокомпонентных наночастиц Al-AlN-Fe и Al-AlN-Cu, полученных электрическим взрывом проводников, формируются иерархически организованные многоуровневые композитные структуры. Структуры из наночастиц Al-AlN-Fe представляют собой нанопластинки бемита, обогащенного оксидами железа, а из наночастиц Al-AlN-Cu - нанопластинки бемита, расположенные вокруг ядра, обогащенного медью. Синтезированные композитные частицы обладают развитой удельной поверхностью, электроположительным зарядом, антимикробной активностью и могут использоваться для разработки изделий медицинского назначения. Применение синтезированных материалов имеет низкий уровень потенциального риска.