

Важнейшие научные результаты ИФПМ СО РАН за 2018 год

Проект Ш.23.1.1 Руководитель академик В.Е. Панин

Наномасштабные мезоскопические структурные состояния как основа иерархической пластической деформации и разрушения твердых тел

Создание однородного распределения кривизны кристаллической решетки вызывает возникновение в междоузлиях наномасштабных мезоскопических структурных состояний (НМСС), которые обуславливают резкое возрастание пластичности материала, его ударной вязкости, хладостойкости, усталостной долговечности, а также эффекта обратимого восстановления формы при больших неупругих деформациях. Разработаны способы нанесения покрытий с НМСС на кварцевые иллюминаторы с высоким демпфированием при ударном воздействии твердых микрочастиц со скоростями 3-8 км/сек, рисунок 1. При создании НМСС в аустенитной стали усталостная долговечность возрастает в семь раз. Связанный с НМСС электропластический эффект устраняет хрупкость сварных соединений высоколегированных конструкционных материалов, рисунок 2. Планируется широкое освоение открытого явления в отраслях народного хозяйства.

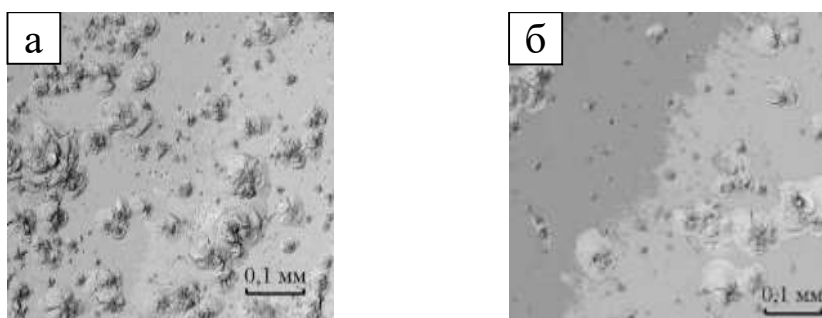


Рисунок 1 – Кратеры на кварцевом иллюминаторе после ударного воздействия микрочастицами Fe с $V=6,5$ км/сек: а–без покрытия; б–наноструктурное прозрачное покрытие. РЭМ

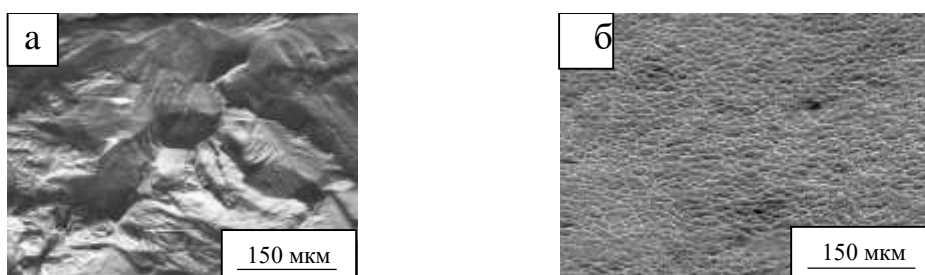


Рисунок 2 – Фрактограмма поверхности усталостного разрушения сварного шва титанового сплава ВТ23 в исходном состоянии (а), и после комбинированной механо-электрофизической обработки (б).

Проект Ш.23.1.2 Руководитель д.ф.-м.н. Л.Б. Зуев

Связь характеристик автоволн локализованной пластичности металлов с решеточными характеристиками

Обнаружено существование экспоненциальной связи между характеристикой пластичности (произведением длины автоволны локализованной пластичности на скорость ее распространения $\lambda \cdot V_{av}$) и безразмерным параметром $\frac{E_b}{RT_D}$, включающим энергию связи (на 1 моль) E_b и температуру Дебая T_D (R – универсальная газовая постоянная) и характеризующим решеточные свойства металлов. Зависимость выполняется для металлов, относящихся к 3-му, 4-му, 5-му и 6-му периодам Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Установленное соотношение указывает на взаимообусловленность пластической деформации и кристаллической решетки вещества.

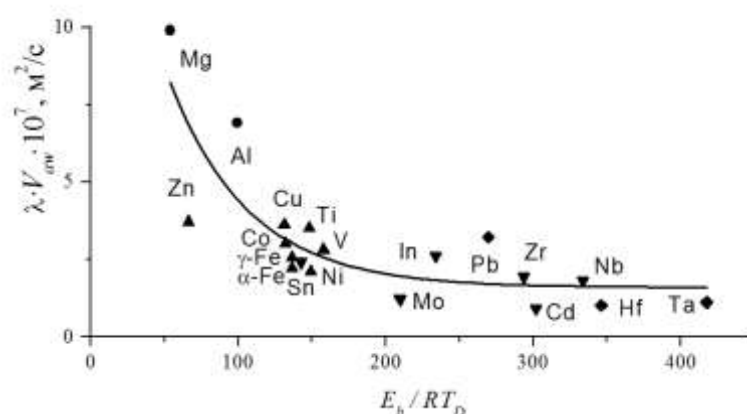


Рисунок 3 – Связь характеристики автоволновой пластичности $\lambda \cdot V_{av}$ с решеточными характеристиками исследованных металлов.

● – 3-й период, ▲ – 4-й период, ▼ – 5-й период ◆ – 6-й период

Проект Ш.23.1.3 Руководитель д.т.н. С.В. Панин

Управление развитием конкурирующих механизмов релаксации напряжений и мониторинг деформационного поведения одно-и многослойных керамических покрытий на основе системы Ti-Al-N

На основе проведенных исследований закономерностей механического поведения однослойных ($\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$) и многослойных ($\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}/\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$) покрытий на упруго-пластической стальной подложке при одноосном растяжении выявлен стадийный характер их разрушения, обусловленный последовательным развитием и конкуренцией между различными механизмами релаксации напряжений. Показано, что процесс разрушения покрытий состоит из четырех стадий, каждая из которых характеризуется различной скоростью роста плотности поперечных трещин. Установлено, что изменение архитектуры покрытий (их общей толщины и соотношения толщин металлических и керамических слоев) позволяет управлять характером развития конкурирующих механизмов их деформации и разрушения, обеспечивая повышение их надежности. Предложена методика количественной аттестации накопления повреждений в покрытиях в процессе растяжения, включающая в себя определение плотности распределения в них поперечных и перекрестных трещин, а также относительной площади скалывания.

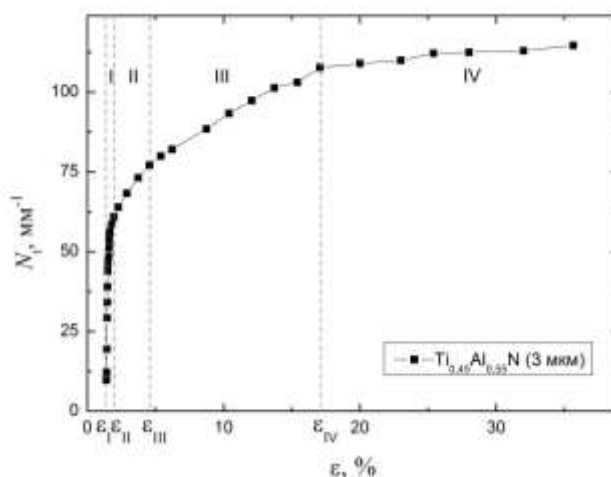


Рисунок 4 – Зависимость плотности распределения поперечных трещин в покрытии $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ толщиной 3 мкм от степени деформации. Римскими цифрами указаны различные стадии разрушения покрытия

Проект Ш.23.1.4 Руководители д.ф.-м.н. П.В. Макаров, д.ф.-м.н. Е.В. Шилько

Кинетический подход к описанию разрушения – ключ к построению динамических масштабно-зависимых моделей хрупких материалов

Разработан новый подход, позволяющий инкорпорировать базовые принципы физической (структурно-кинетической) теории прочности в рамках современных моделей неупругого поведения хрупких материалов с многомасштабной внутренней структурой. В основе данного подхода лежат ключевые представления о конечном времени процессов релаксации напряжений, связанных с ростом и объединением повреждений и формированием трещин, и о связи пространственного и временного масштабов релаксации. Предложен новый способ обобщения современных многопараметрических критериев пластичности и прочности, широко применяемых для компьютерного моделирования и прогнозирования квазистатического поведения хрупких материалов и элементов конструкций в сложных условиях нагружения, на область динамического нагружения вплоть до скоростей деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. Получены соотношения для оценки характерных значений динамических параметров этих критериев с учетом масштабного фактора.

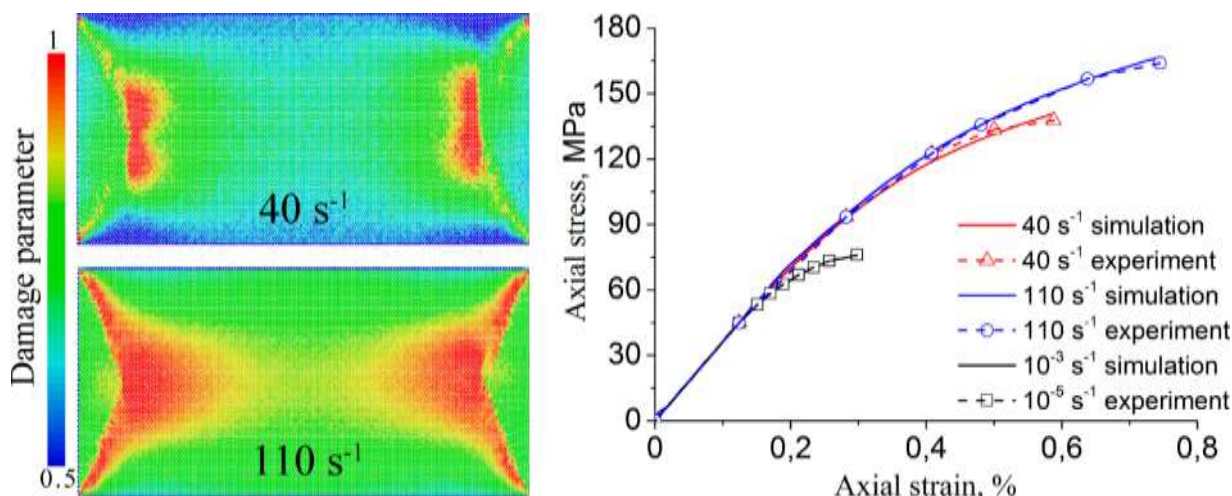


Рисунок 5 – Разрушение моделируемых образцов высокопрочного бетона при сжатии с различными скоростями деформации, а также расчетные и экспериментальные диаграммы нагружения образцов.

Проект Ш.23.2.1 Руководитель д.ф.-м.н. Л.Л. Мейснер

Эффект кривизны поверхности стальной подложки на структуру границы раздела и поверхностного слоя покрытия TiN.

В результате предварительной обработки поверхности конструкционной стали одновременным воздействием ионов металлической (Ti) и газовой (Ar) плазмы наблюдается формирование переходного по элементному составу от покрытия к подложке слоя толщиной до ~ 60 нм, что, ввиду невысокого потенциала смещения (до 1 кВ) на подложке, свидетельствует о развитии термической и индуцированной ионным воздействием диффузии. На рельефных участках подложки, в отличие от плоской поверхности, покрытие имеет модифицированный элементный состав и двухслойную структуру, верхний слой которой является кристаллическим нанофрагментированным, а смежный с подложкой слой - аморфным (рисунок 6 а). Показано, что при изменении энергетических условий активации роста покрытия на участках поверхности подложки различной кривизны изменения его структуры связаны с уменьшением толщины разных по структуре слоёв; формированием выраженной столбчатой структуры кристаллического слоя, уменьшением изгиба-кручения кристаллической решётки, кристаллизацией смежного с подложкой аморфного слоя с выделением наноразмерных частиц нитрида титана и оксида железа (рисунок 6 б). Предложено объяснение указанных результатов на основе неоднородности распределения электрического потенциала смещения на рельефной поверхности, определяющей неоднородность распыления (легирования) элементов и энергетической активации роста покрытия в целом.

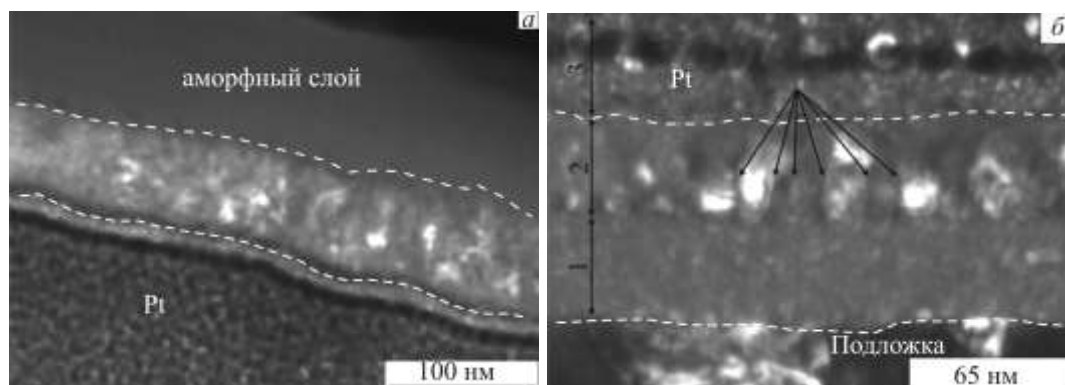


Рисунок 6 – Особенности структуры покрытия нитрида титана на участках поверхности подложки конструкционной стали с различной рельефностью: *a* – темнопольное изображение структуры нанокристаллического слоя покрытия в действующем отражении $g = \langle 220 \rangle$; *б* – темнопольное изображение, стрелками отмечены границы столбчатых зёрен; цифрами указаны: 1 – высокодисперсный нанокристаллический слой, 2 – слой столбчатых зёрен, 3 – слой Pt

Влияние электронно-пучковой модификации поверхностного слоя на деформационное поведение и характер разрушения никелида титана

На основе комплексных исследований структуры и физико-механических характеристик поверхностных слоев никелида титана, модифицированных с использованием импульсного микросекундного низкоэнергетического сильноточного электронного пучка (НСЭП), при механических испытаниях в условиях статического одноосного растяжения показано, что при одинаковых плотности энергии и длительности импульса НСЭП выбор оптимального числа импульсов НСЭП-облучения позволяет сохранить параметры неупругости TiNi сплава и

повысить одновременно его пластичность и прочность до разрушения. В экспериментах *in vitro* показано кратное повышение треморезистентности поверхности TiNi сплава, модифицированной НСЭП, что, в совокупности, определяет перспективность электронно-пучковых обработок в биомедицинских приложениях.

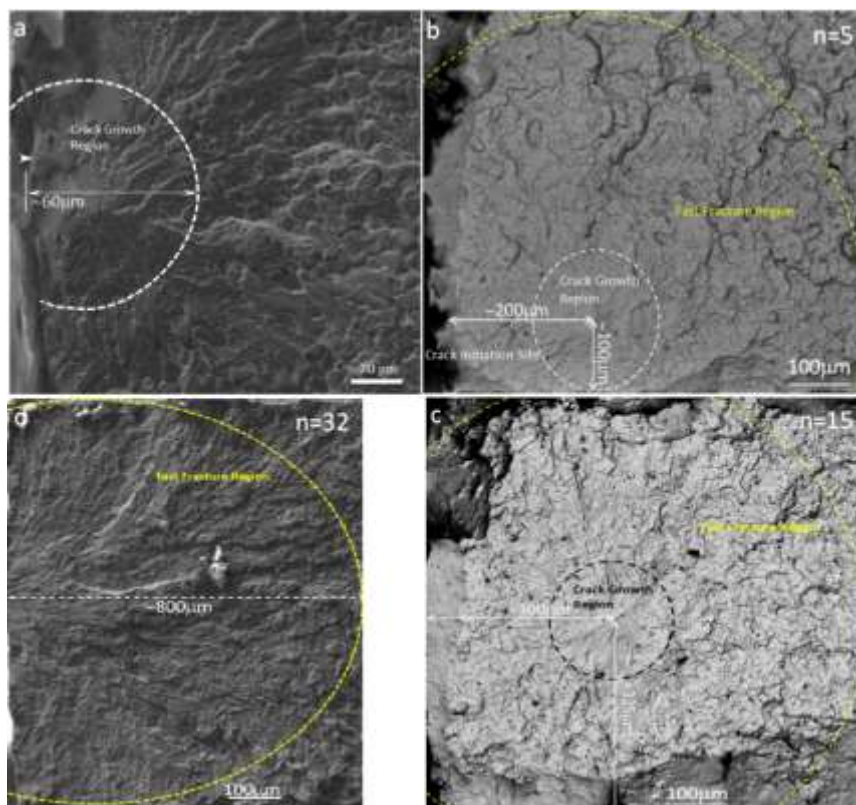


Рисунок 7 – РЭМ-изображения поверхностей изломов TiNi образцов до (а) и после НСЭП-обработок с числом импульсов n=5 (b), 15 (c), 32(d). Области зарождения и роста магистральных трещин, а также быстрого разрушения обведены пунктирами

Проект Ш.23.2.2 Руководители д.ф.-м.н. А.И. Лотков, д.ф.-м.н. Е.В. Найденкин

Влияние стабилизации ультрамелкозернистой структуры титановых сплавов на их сверхпластичные свойства

На примере титановых сплавов псевдо- α (ПТ-3В) и переходного класса (ВТ22) с ультрамелкозернистой структурой ($d \sim 0,2$ мкм) изучена эволюция структурно-фазового состояния при сверхпластической деформации в интервале температур 773-1073К ($0,4-0,55T_{пл}$). Показано, что на начальных этапах деформации (примерно до 50-100%) в исследуемых сплавах формируется равноосная ультрамелкозернистая структура ($d \sim 1$ мкм) с низкой плотностью дислокаций ($\sim 10^{12} \text{ м}^{-2}$). При дальнейшем увеличении степени деформации размер зерен изменяется незначительно. Такая стабилизация структуры обеспечивается выпадением наноразмерных частиц второй фазы в объеме и по границам зерен в случае псевдо- α титанового сплава или формированием микродуплексной α - β структуры в случае сплава переходного класса. При этом рассматриваемые сплавы демонстрируют максимально высокие показатели относительного удлинения до разрушения (напр., для сплава ВТ22 – до 1700%).

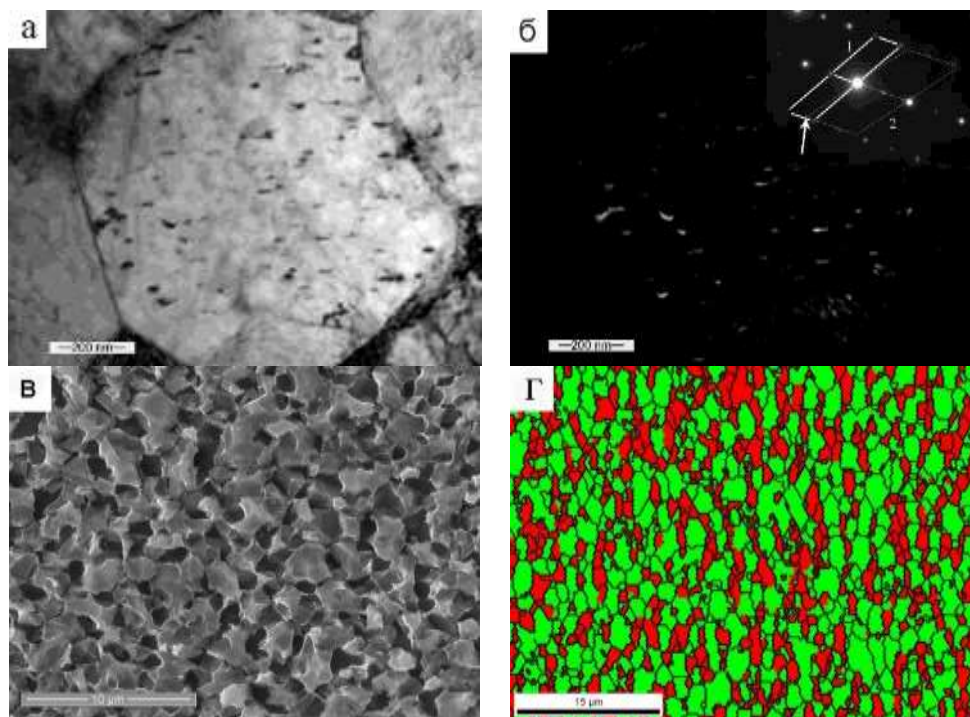


Рисунок 8 – Микроструктура сплава ПТ-3В (а, б) и ВТ22 (в, г) после сверхпластической деформации на 100% при температурах 873К и 1073К, соответственно: а – светлопольное ТЕМ изображение; б – темнопольное изображение частиц и схема микродифракции (плоскость матрицы (1) $(110)_\alpha$ и частиц (2) $(332)_\alpha$), стрелкой показан рефлекс, в котором сняты частицы; в – SEM микроструктура сплава ВТ22; г – EBSD карта распределения фаз в сплаве (красным цветом обозначена α -фаза, зеленым – β -фаза)

Закономерности формирования микроструктуры и механических свойств ультрамелкозернистого сплава Ti-45 мас. %Nb в результате длительного теплового воздействия

Комбинированным методом интенсивной пластической деформации в низко модульном сплаве Ti-45 мас.% Nb сформировано многофазное ультрамелкозернистое состояние со средним размером структурных элементов 0,2 мкм, которое обеспечивает высокий уровень механических свойств (микротвердость – 2800 МПа, предел текучести – 560 МПа, предел прочности – 1020 МПа) при предельной пластичности, равной 5 %. Ультрамелкозернистое состояние сохраняется при длительных тепловых воздействиях (до 360 часов) при температурах до 400°C за счет стабилизации структуры наноразмерными α - и ω -фазой. Разупрочнение сплава при тепловом воздействии (400°C) связано с процессами возврата на границах субзерен и уменьшением остаточных внутренних напряжений.

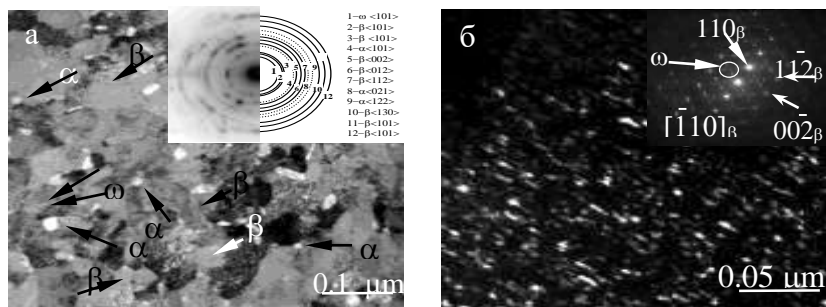


Рисунок 9 – Светлопольное с соответствующей микродифракционной картиной (а) и темнопольное в рефлексах ω -фазы (б) электронно-микроскопические изображения сплава Ti-45 мас.% Nb

Проект Ш.23.2.3 Руководитель д.ф.-м.н. С.Н. Кульков

Неупругое поведение керамики с иерархической поровой структурой

Изучено поведение при нагружении керамики с объёмом порового пространства до 60% с иерархической поровой структурой - “крупной”, “мелкой” и поровыми микроканалами, образованными в результате зонального обособления при спекании, рис.10а.

Полученная иерархическая поровая структура керамики оказывает существенное влияние на характер повреждения материала при нагружении, обуславливая переход от хрупкого разрушения к квазипластичному, вследствие формирования многочисленных очагов разрушения, рис.10б, и появлением иерархической деформационной структуры, что приводит к эффекту понижения масштаба процессов разрушения от макроскопического до мезо- и/или микромасштабного разрушения.

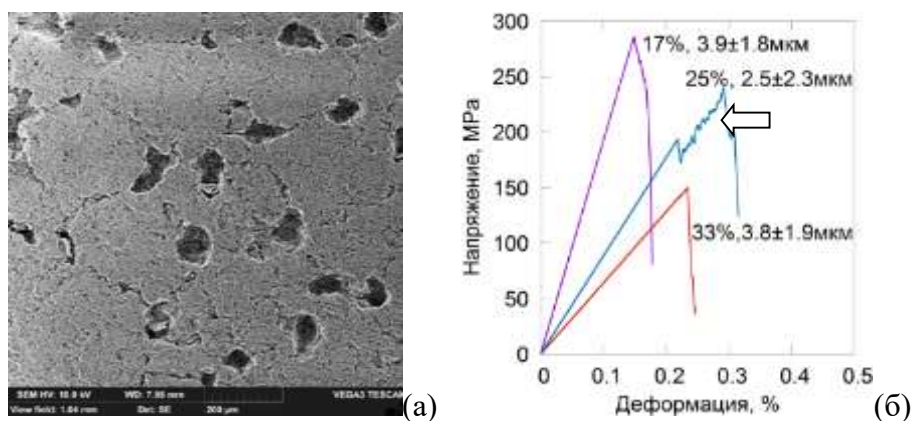


Рисунок 10 – Многоуровневая поровая структура керамики (а) и расчетные кривые «напряжение-деформация» (б). Числами указаны характеристики пористости, стрелкой – участок множественного накопления повреждений

Проект Ш.23.2.4 Руководители д.ф.-м.н. С.Г. Псахье, д.т.н. Е.А. Колубаев

Исследование корреляционных связей между характеристиками акустической эмиссии и строением контактирующих поверхностей в условиях перехода триботехнической системы к вибрационному режиму скольжения

Вибродинамический эффект при эксплуатации машин и механизмов обусловлен структурой и триботехническими свойствами материалов, составляющих пару трения. Для управления вибродинамическими характеристиками трибологической системы при исследовании цветных металлов в процессе трения скольжения использовали образцы крупнокристаллической и ультрамелкозернистой латуни Л63. Образцы с ультрамелкозернистой структурой получали методом равноканального углового прессования (РКУП). Первый проход РКУП приводил к формированию устойчивых двойниковых структур. Последующие проходы РКУП не изменяли морфологию двойникованных объемов, а лишь увеличивали азимутальную разориентацию на уже существующих двойниковых границах. Изнашивание образцов в исходном состоянии и после первого прохода РКУП обусловлено пластическим деформированием поверхностного слоя (рис. 11а), вызванного образованием микродвойников. Это сопровождается высокими значениями медианной частоты акустических колебаний (рис. 12а). При последующих проходах РКУП и более высоких степенях деформации ресурс пластичности исчерпан и в поверхностных слоях образцов происходит образование частиц износа путем подповерхностного разрушения (рис. 11б), что характеризуется резким падением медианной частоты акустических колебаний (рис. 12б).

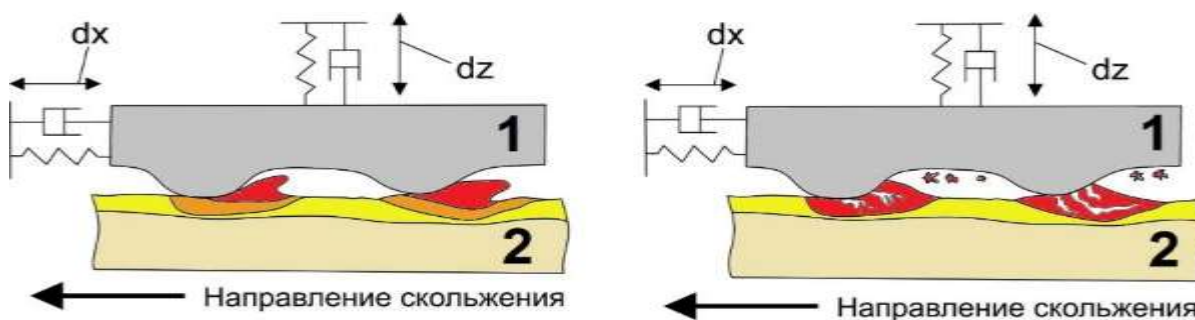


Рисунок 11 – Схематичное представление распространения поля деформации в неупрочненном (а) и деформационно-упрочненном материалах (б):

1 – контртело (шарик), 2 – образец, dx – смещение в горизонтальной плоскости, dz – смещение в вертикальной плоскости

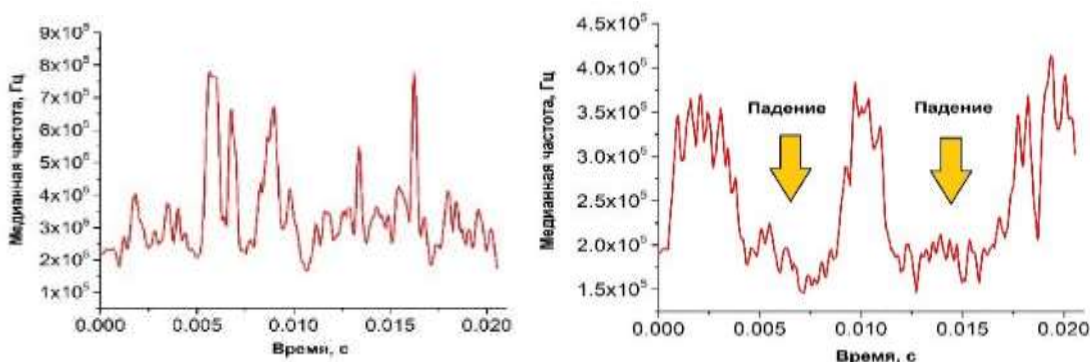


Рисунок 12 – Изменение медианной частоты (б) акустической эмиссии при трении неупрочненного (а) и деформационно-упрочненного (б) материала

Проект Ш.23.2.5 Руководители д.ф.-м.н. Ю.П. Шаркеев, д.т.н. М.И. Лернер

Управление пористой архитектурой, зарядом и биологической активностью кальцийфосфатных биопокровтий при использовании ультразвукового излучения и модификации положительно-заряженными наночастицами $AlO(OH)$

При пропускании ультразвукового излучения через электролит в течение микродугового синтеза созданы кальцийфосфатные биопокровтия с пористой архитектурой, микропорами размером 15-40 мкм и пористостью до 40 %, перспективные в медицинских приложениях, как остеокондуктивные скэффолды для прорастания костной ткани, и как контейнеры для наполнения лекарственными препаратами, и др. Модификация поверхности покрытий и внутреннего порового пространства положительно-заряженными наночастицами $AlO(OH)$ активизирует адгезию клеток к покрытиям и антибактериальные свойства биопокровтий.

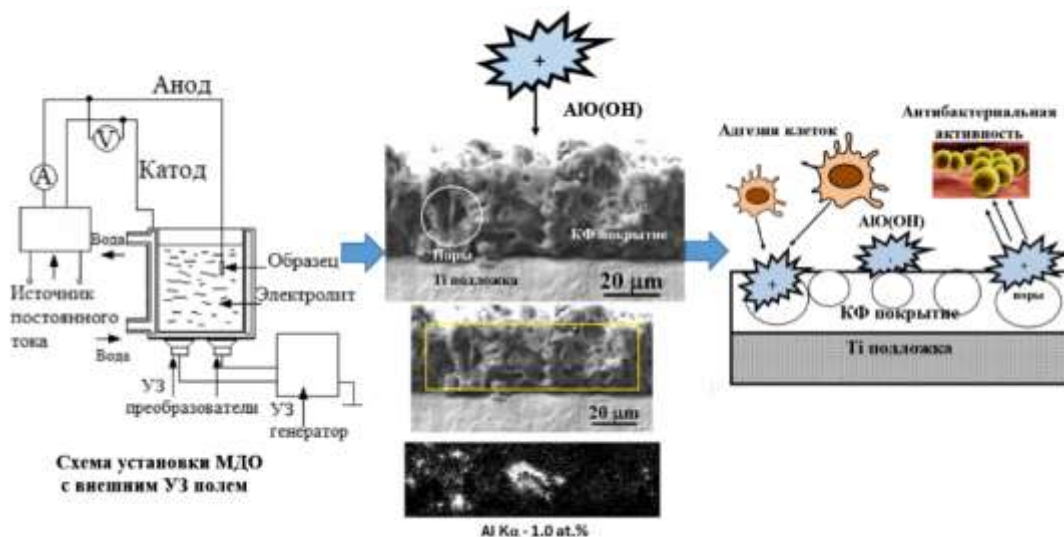


Рисунок 13 – Формирование пористой архитектуры кальцийфосфатных биопокровтий в процессе микродугового синтеза при воздействии ультразвукового излучения, модификация поверхности и внутреннего порового пространства покрытий положительно-заряженными наночастицами АЮ(ОН)

Проект Ш.23.2.6 Руководитель д.ф.-м.н. А.Н. Тюменцев

Новый метод совместного дисперсного плюс субструктурного упрочнения Zr-содержащих ванадиевых сплавов

Разработан новый метод химико-термической плюс термомеханической обработки Zr-содержащих ванадиевых сплавов, обеспечивающий формирование мелкокристаллических структур с наноразмерными частицами ZrO_2 , значительное (на (200-300) °C) повышение температуры рекристаллизации и характеристик высокотемпературной прочности. Показано, что высокая эффективность совместного дисперсного плюс субструктурного упрочнения, наряду с высокими значениями дисперсного упрочнения, определяется повышением величины субструктурного упрочнения вследствие подавления в высокопрочном состоянии деформационной активности границ зерен и более чем 1.5-кратного увеличения напряжения Холла-Петча. Высокая термическая стабильность наночастиц оксида циркония и мелкокристаллической структуры свидетельствует о перспективности разработанного метода для повышения жаропрочности малоактивируемых ванадиевых сплавов для работы в активных зонах ядерных реакторов деления и синтеза.

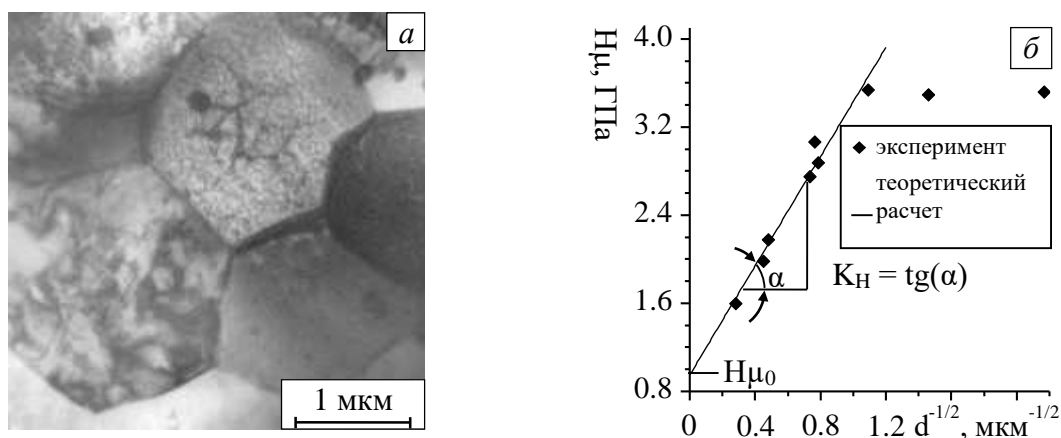


Рисунок 14 – Мелкокристаллическая структура (а) и величина микротвердости в зависимости от размеров зерен (б) после химико-термической плюс термомеханической обработки внутреннеокисленных образцов сплава V-Cr-Zr.