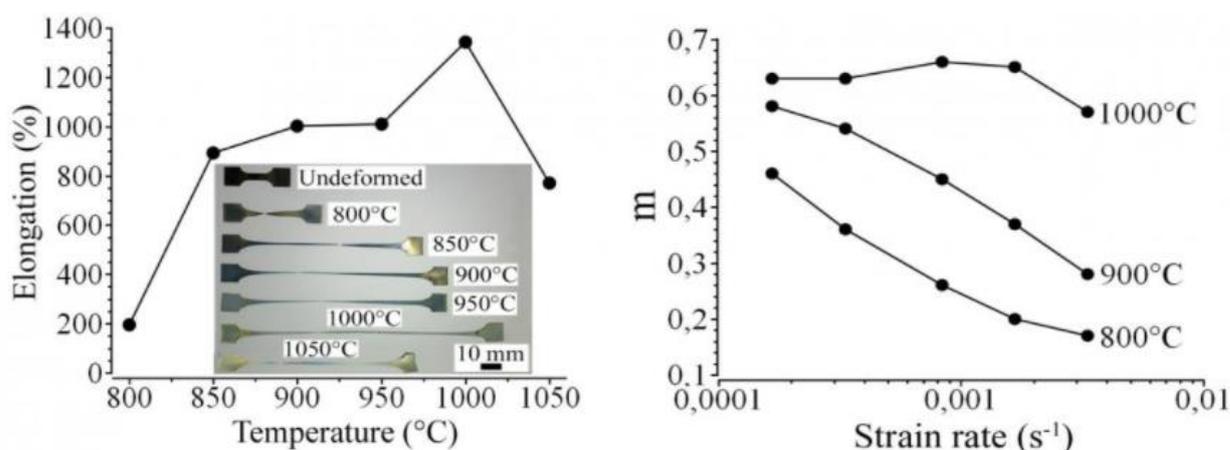


Важнейшие результаты научных исследований, полученные в ИПСМ РАН в 2015 г.

1. Продемонстрирована возможность достижения экстраординарных сверхпластических свойств ($d=770-1340\%$) при относительно низких температурах ($T=850-1050^\circ\text{C}$) в одном из самых жаропрочных интерметаллидных γ -TiAl сплавов - Ti-45Al-8Nb-0.2C (ат. %). Показано, что основным механизмом деформации является зернограничное проскальзывание, контролируемое объемной диффузией в равной степени алюминия и титана в γ -TiAl фазе. Сверхпластическая обработка может быть использована при изготовлении сложнопрофильных деталей (лопаток, дисков газотурбинных двигателей) из γ -TiAl сплавов, что обеспечит высокий выход годного материала и возможность получения однородной и регламентированной структуры.



Зависимости относительного удлинения и коэффициента скоростной чувствительности сплава Ti-45Al-8Nb-0.2C в ультрамелкозернистом состоянии от температуры и скорости деформации

Опубликован в статье:

Imayev V., Gaisin R., Rudskoi A., Nazarova T., Shaimardanov R., and Imayev R. Extraordinary superplastic properties of hot worked Ti-45Al-8Nb-0.2C alloy // Journal of Alloys & Compounds. 2016. V. 663. P. 217-224.

2. Методом молекулярной динамики проведена оценка механических свойств смятого графена, подвергнутого гидростатическому или одноосному сжатию. Показано, что смятый графен является негуковской средой, демонстрирующей нелинейную зависимость напряжений от плотности. Это связано со структурными изменениями, протекающими в материале даже при небольших напряжениях. Из анализа кривых разгрузки следует, что при всестороннем сжатии предел упругости достигается при меньшей плотности, чем при одноосном сжатии. Это объясняется образованием на листах графена изломов складок при всестороннем сжатии, в то время как при одноосном сжатии, в основном, формируются складки без изломов, с меньшим повреждением решетки графена. Полученные результаты важны для разработки наноустройств, использующих смятый графен, таких как суперконденсаторы, накопители водорода и др.

Опубликован в статье:

Baimova J.A., Liu B., Dmitriev S.V. Zhou K. Mechanical properties of crumpled graphene under hydrostatic and uniaxial compression // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. Art.095302.

3. Исследовано поведение ударной вязкости низкоуглеродистой трубной стали 05Г2МФБ с волокнистой ультрамелкозернистой структурой (поперечный размер зерен около 0,5 мкм) и равноосной мелкозернистой структурой (размер зерен около 5 мкм) при понижении температуры от +20°C до -196°C. Показано, что при переходе от равноосной структуры к волокнистой порог хладноломкости материала смещается от -110°C до температуры ниже -196°C. Это объясняется сохранением высокого значения работы распространения трещин в волокнистой структуре и его уменьшением в равноосной структуре. Полученный результат может быть полезен для применения в конструкциях из низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ, эксплуатируемых при низких температурах.

Опубликован в статье:

Сергеев С.Н., Сафаров И.М., Корзников А.В., Галеев Р.М., Гладковский С.В., Двойников Д.А. Влияние теплой прокатки на структуру и механические свойства низкоуглеродистой трубной стали // Письма о материалах. 2015. Т. 5. № 1. С. 48-51.

4. С помощью впервые созданной в России лабораторной установки для линейной сварки трением получено твердофазное соединение образцов магнитотвердого сплава 25ХК15 с электротехнической сталью 10880. В испытаниях на трехточечный изгиб сварное соединение демонстрирует предел прочности 1200 МПа и пластичность 3%, сопоставимые с прочностью и пластичностью сплава 25ХК15. Полученный результат может быть использован при разработке крупногабаритных роторов электродвигателей большой мощности.

Опубликован в статье:

Абрамова Е.А., Корзникова Г.Ф., Корзников А.В., Хуснуллин А.М., Николаев В.В., Кашаев Р.М. Микроструктура и механические свойства сварного соединения магнитотвердого сплава 25Х15К со сталью 10880 полученного линейной сваркой трением//Письма о материалах. 2015. Т.5. № 1. С. 90-93.

5. Исследовано влияние деформационной и термической обработки на структуру и механические свойства коротковолокнистых композиционных материалов на основе Ti-TiB, полученных *in situ* процессе обычного литья с использованием различных матричных сплавов (ВТ8, ВТ18У) и разной объемной доли упрочнителя. Установлено, что присутствие около 10 об. % преимущественно ориентированных коротких волокон TiBобеспечивает существенное повышение прочности и жаропрочности по сравнению с матричным материалом. Полученный эффект упрочнения был объяснен на основе модели сдвигового запаздывания для коротковолокнистых композиционных материалов. Разработанные

подходы могут стать основой для создания жаропрочных *in situ* композитов на основе Ti-TiB с рабочей температурой 650°C и выше с использованием жаропрочных титановых сплавов в качестве матрицы, повышенной объемной доли TiB-упрочнителя и дополнительных упрочняющих составляющих.

Опубликован в статье:

Imayev V.M., Gaisin R.A., Imayev R.M., Effect of boron additions and processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy Ti-6.5Al-3.3Mo-0.3Si // Materials Science & Engineering A. 2015. V. 641. P. 71-83.

Сведения о результатах по направлениям исследований в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, полученных в 2015 году

Номер и наименование направления фундаментальных исследований	Полученные результаты
II. ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ	
<p>8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости</p>	<p>Показано, что в ВТСП керамике $\text{Bi}(\text{Pb})_2\text{2223}$ высокую плотность частиц вторичных фаз - центров пиннинга магнитного потока можно создать путем кратковременного отжига под квазигидростатическим давлением в температурной области существования метастабильной матричной фазы $\text{Bi}(\text{Pb})_2\text{2223}$. Обнаружено, что исходная острая текстура при таком отжиге не размывается. В образце, отожженном при температуре 925°C под давлением 10 МПа, обнаружен кольцевой участок материала с высоким содержанием частиц $(\text{Sr},\text{Ca})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ и $(\text{Sr},\text{Ca})_2\text{CuO}_3$. Данный кольцевой участок может иметь высокую токнесущую способность.</p> <p>Методом кручения под квазигидростатическим давлением в 6 ГПа стопки из трех дисков чистых металлов Al/Mg/Al при комнатной температуре осуществлен быстрый синтез интерметаллидов системы Mg-Al. Образование интерметаллидных фаз происходит в течение времени около 10 минут, тогда как без механического воздействия для этого требуется нагрев до высоких температур и длительная выдержка. Полученные образцы имеют твердость, сравнимую с твердостью стали. Детальные исследования микроструктуры показали, что интерметаллиды в таком композитном материале образуются за счет деформационно-индуцированной диффузии магния в алюминий с формированием</p>

	<p>интерметаллидных слоев β-фазы (Al_2Mg_3) толщиной около 20 нм между зёрнами размером порядка 100 нм.</p> <p>Методом молекулярной динамики проведена оценка механических свойств смятого графена, подвергнутого гидростатическому или одноосному сжатию. Показано, что смятый графен является негуковской средой, демонстрирующей нелинейную зависимость напряжений от плотности. Это происходит вследствие структурных изменений, протекающих в материале даже при небольших напряжениях. Из анализа кривых разгрузки следует, что при всестороннем сжатии предел упругости достигается при меньшей плотности, чем при одноосном сжатии. Это объясняется образованием на листах графена изломов складок при всестороннем сжатии, в то время как при одноосном сжатии, в основном, формируются складки без изломов, с меньшим повреждением решетки графена. Полученные результаты важны для разработки наноразмерных устройств, использующих смятый графен, таких как суперконденсаторы, накопители водорода и др.</p> <p>Выполнен расчет величины удельной энергии межфазной границы в $\alpha+\beta$ титановом сплаве ВТ6 в широком интервале температур с использованием модели ступенчатого строения полукогерентной α/β границы. Впервые установлено, что даже при снижении температуры в $\alpha+\beta$ области до $600^\circ C$ величина энергии межфазной границы в двухфазном титановом сплаве не достигает уровня энергии, характерной для некогерентной границы. Это означает отсутствие движущей силы для сфероидизации пластинчатых частиц и, тем самым, определяет стабильность пластинчатой структуры титанового сплава ВТ6 при отжиге и подтверждает необходимость деформационного воздействия для её преобразования в глобулярную структуру.</p>
<h3>III. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ</h3>	
<p>23. Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред</p>	<p>Продемонстрирована возможность достижения экстраординарных сверхпластических свойств (относительное удлинение до разрушения $d=770-1343\%$) при относительно низких температурах ($T=850-1050^\circ C$) в одном из самых жаропрочных интерметаллидных γ-TiAl сплавов - Ti-45Al-8Nb-0,2C (ат. %). Показано, что основным механизмом деформации является зернограницное проскальзывание, контролируемое объемной</p>

диффузией в равной степени алюминия и титана в γ -TiAl фазе. Сверхпластическая обработка может быть использована при изготовлении сложнопрофильных деталей (лопаток, дисков газотурбинных двигателей) из γ -TiAl сплавов, что обеспечит высокий выход годного материала и возможность получения однородной и регламентированной структуры.

Исследовано поведение ударной вязкости низкоуглеродистой трубной стали 05Г2МФБ с волокнистой ультрамелкозернистой структурой (поперечный размер зерен около 0,5 мкм) и равноосной мелкозернистой структурой (размер зерен около 5 мкм) при понижении температуры от +20°C до -196°C. Показано, что при переходе от равноосной структуры к волокнистой порог хладноломкости материала смещается от -110°C до температуры ниже -196°C. Это объясняется сохранением высокого значения работы распространения трещин в волокнистой структуре и его уменьшением в равноосной структуре. Полученный результат может быть полезен для применения в конструкциях из низкоуглеродистой стали 05Г2МФБ, эксплуатируемых при низких температурах.

Алюминиевый сплав 1570С с частично рекристаллизованной структурой, содержащей всего около 30% зерен размером 1-2 мкм, демонстрирует в широком температурном интервале эффект высокоскоростной сверхпластичности с удлинениями до 2500% при скоростях деформации около 10-2 с-1. Характеристики сверхпластичности повышаются, если частично рекристаллизованную структуру подвергнуть последующей нагартовке. Обнаруженный эффект обусловлен протеканием в ходе сверхпластического течения рекристаллизации в исходно нерекристаллизованных объемах. Полученный результат представляет интерес для изготовления изделий аэрокосмического назначения методом сверхпластической листовой формовки.

Исследованы особенности разрушения твердофазного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через наноструктурированную никелевую фольгу. Обнаружено, что наиболее вероятной причиной разрушения является образование микротрещин в слоях Ti₂Ni и TiNi₃ из-за аномально высокого изменения

	<p>коэффициента линейного расширения, которое возникает в промежуточном слое TiNi при аустенитно-мартенситном превращении, происходящем при охлаждении после сварки. Полученный результат показывает, что одним из путей повышения прочности соединения является легирование никелевой прослойки элементами, уменьшающими температуру аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi.</p> <p>Для определения режимов деформационной обработки, обеспечивающих максимальную технологическую пластичность при комнатной температуре сплава Fe-30%Cr8%Co в предварительно состаренном состоянии, которая лимитирует возможность холодной деформации волочением, проводились эксперименты по осадке в интервале температур 650-850°C. Эксперименты позволили определить условия и степень деформации, необходимые для формирования мелкозернистой структуры. Результаты механических испытаний на растяжение в предварительно состаренном состоянии показали, что сплав обладает повышенным ресурсом пластичности только в мелкозернистом состоянии с максимальной долей высокоугловых границ, полученном осадкой при 750°C. Полученный результат представляет интерес для получения цилиндрических постоянных магнитов с высокими эксплуатационными характеристиками.</p>
<p>24. Механика технологий, обеспечивающих устойчивое инновационное развитие инфраструктур и пониженной уязвимости по отношению к возможным внешним и внутренним дестабилизирующим факторам природного и техногенного характера</p>	<p>Разработана компьютерная модель для определения режимов деформационно-термической обработки, обеспечивающей формирование однородной ультрамелкозернистой структуры в жаропрочных никелевых сплавах. Модель основана на базе данных, связывающей требуемые условия деформирования сплавов с их химическим составом (объемной долей и размерами частиц упрочняющей фазы) и учитывает зависимость деформационного разогрева заготовок от их размеров. Впервые с ее помощью изготовлены качественные дисковые образцы с ультрамелкозернистой структурой из высоколегированного гранульного сплава ЭП 741 НП.</p> <p>С помощью впервые созданной в России лабораторной установки для линейной сварки трением получено твердофазное соединение образцов магнитотвердого сплава 25ХК15 с электротехнической сталью 10880. В испытаниях на трехточечный изгиб соединение демонстрирует</p>

	<p>предел прочности 1200 МПа и пластичность 3%, сопоставимые с прочностью и пластичностью сплава 25ХК15. Полученный результат может быть использован при разработке крупногабаритных роторов электродвигателей большой мощности.</p>
<p>29. Триботехника и износостойкость высоконагруженных элементов машин</p>	<p>Установлено, что деформирование баббита Б83 радиально-сдвиговой прокаткой, сопровождающееся разогревом, приводит к динамической рекристаллизации и возникновению собственной мелкозернистой структуры в кристаллах β- фазы. Это приводит к увеличению энергии распространения трещин при изнашивании и, соответственно, к снижению износа материала. Полученный результат полезен для повышения износостойкости широко используемого антифрикционного материала - баббита Б83.</p>
<p>V. ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ И НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ</p>	
<p>45. Научные основы создания новых материалов с заданными свойствами и функциями, в том числе высокочистых и наноматериалов</p>	<p>Предложен сплав на основе системы Ti-Al-Fe состава Ti-45Al-5Fe (ат. %), обладающий более высокими технологическими свойствами, чем традиционные γ-TiAl сплавы. Установлено, что новый сплав в литом состоянии демонстрирует хрупко-вязкий переход при температурах 800-850°C, при котором происходит резкий рост пластичности при удлинении, не характерный для традиционных γ-TiAl сплавов. Улучшенные технологические свойства сплава обусловлены относительно мелкой глобулярно-пластинчатой структурой, полученной уже в литом состоянии, а также, по-видимому, изменением фазового состава сплава от γ-TiAl+a2-Ti3Al к γ-TiAl+t2-Al2FeTi с почти полным исключением хрупкой a2-Ti3Al фазы. Новый сплав может быть использован как деформируемый γ-TiAl сплав, пригодный для работы до температур 700°C.</p> <p>Исследовано влияние различных режимов термической и деформационной обработки γ-TiAl сплава последнего поколения состава Ti-45Al-5Nb-1Mo-0,2V(ат. %). В результате оптимизации режимов обработки получены различные микроструктурные состояния, продемонстрировавшие высокий уровень механических свойств. Показано, что улучшенные механические свойства достигаются за счет однородной и относительно мелкой структуры с пластинчатой или пластинчато-глобулярной морфологией. Полученные результаты создают предпосылки для разработки литейных и деформационных технологий изготовления</p>

деталей газотурбинных двигателей из указанного интерметаллидного сплава.

Исследовано влияние деформационной и термической обработки на структуру и механические свойства коротковолокнистых композиционных материалов на основе Ti-TiB, полученных *in situ* в процессе обычного литья с использованием различных матричных сплавов (BT8, BT18У) и разной объемной доли упрочнителя. Установлено, что присутствие около 10 об. % преимущественно ориентированных коротких волокон TiB обеспечивает существенное повышение прочности и жаропрочности по сравнению с матричным материалом. Полученный эффект упрочнения был объяснен на основе модели сдвигового запаздывания для коротковолокнистых композиционных материалов. Разработанные подходы могут стать основой для создания жаропрочных *in situ* композитов на основе Ti-TiB с рабочей температурой 650°C и выше с использованием жаропрочных титановых сплавов в качестве матрицы, повышенной объемной доли TiB-упрочнителя и дополнительных упрочняющих составляющих.