Сведения о выполненных работах в 2020 году
по проекту «**Научные основы технологии синтеза новых высокопрочных нанокомпозитов на основе легких сплавов для приложений в транспортных и космических системах**»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 17-13-01252

Руководитель д-р физ.-мат. наук Ворожцов Александр Борисович

Получены алюминиевые сплавы на основе АМг5, упрочненные тугоплавкими частицами TiB2 различной концентрации. При изготовлении лигатур необходимым условием выступало использование порошка с бимодальными структурами, включающими наноразмерный и субмикронный масштаб. Из полученных отливок изготавливали плоские образцы толщиной 2 мм.. Получены результаты исследований структуры и механических свойств и особенностей деформационного поведения всех полученных сплавов на основе АМг5: исходных (без частиц), как в литом состоянии, так и после деформационной обработки; упрочненных частицами, как в литом состоянии, так и после деформационной обработки. Исследования микроструктуры показали, что исходный сплав АМг5 в литом состоянии без частиц имел грубую и неравномерную дендритную структуру со средним размером зерна около 155 мкм. В сплаве преобладали крупные первичные дендриты со сложной формой. Добавление частиц в сплав привело к более равномерному измельчению первичных дендритов и появлению мелких равноосных дендритов в равной степени в зависимости от состава лигатур. Установлено, что частицы TiB2 подготовленной лигатуры при введении в расплав являются эффективным модификаторами литой структуры, позволяющий получать отливки с равноосной структурой. Такая структура должна значительно повысить технологическую пластичность материалов при дальнейшей обработке, уменьшить склонность к трещинообразованию при литье, увеличить коррозионную стойкость. Распределение введенных частиц по всему объему сплава свидетельствует о эффективном использовании режимов ультразвуковой обработки расплава перед его кристаллизацией. Получены экспериментальные данные о влиянии наночастиц диборида титана на коррозионную стойкость и свариваемость сплавов АМг5, упрочненных частицами TiB2 до и после деформационной обработки. Обнаружено, что дендритная структура исходных литых сплавов на основе АМг5 хуже сопротивляется коррозионному воздействию, чем прокатанная. Наибольшее коррозионное поражение наблюдалось на образцах исходного литого сплава. Основной причиной коррозии является - сплошная, избирательная (межкристаллитная) и местная (питтинг) коррозия, зарождающаяся на микропорах, на границах зерен и впоследствии вызывающая образование внушительных полостей на исследуемой поверхности. Повреждение идет по границам зерен и по фазам образующихся на них в случае межкристаллитной коррозии. Исследования коррозионной стойкости исследуемых сплавов на основе АМг5 показали удовлетворительные результаты для прокатанных образцов за счет измельченной структуры и малых размеров межзеренных областей. Оценены возможности неразъемного соединения листов из полученных сплавов современными методами

электронно-лучевой сварки. Для проведения был подобран режим сварки и изготовлены односторонние сварные соединения с различной глубиной провара для исходных и упрочненных сплавов частицами диборида титана. Показана линейная зависимость прочности сварного соединения от его глубины. Установлено, что показатель прочности сварного соединения при его миниатюрных размерах превышает свойства свариваемых сплавов. Сварные соединения всех образов обладают достаточной прочностью. Относительные прочностные показатели соединений удовлетворяют отраслевым требованиям прочности сварного соединения, которая не должна быть менее 0.9 от прочности основного металла. Эти требования достигаются уже при относительной площади сварного соединения 0.7, 0.88 и 0.83 для исходного сплава без частиц и частицами различной концентрации. Дальнейшее увеличение глубины провара должно привести к достижению номинальной прочности свариваемых материалов.

Получены образцы литейного магниевого сплава МЛ12 с ведением в расплав магниевых лигатур, содержащих неметаллические тугоплавкие наночастицы AlN в концентрации 0,1, 0,3, 0,5, 1 масс. %. Для изготовления магниевых лигатур использовали наночастицы AlN, синтезированные методам электровзрыва проводников. Лигатуры были изготовлены методом ударно-волнового компактирования смесей магниевого микропорошка с нанопорошком AlN в пропорциях 95/5 масс. %. Установлены закономерности влияния концентрации наноразмерных тугоплавких частиц нитрида алюминия на структуру, упругопластические свойства: деформационное поведение, в т.ч. при повышенных температурах, сопротивление циклическому нагружению, трещиностойкость. Показано, что в исходном состоянии магниевый сплав МЛ12 имеет значения ударной вязкости (KCU) 38 Дж/м2. Добавление частиц AlN увеличивает этот показатель до 41, 44, 51 и 44 Дж/м2 для сплавов с концентрацией частиц 0,1, 0,3, 0,5, и 1 AlN масс. %. Эффект увеличения ударной вязкости связан с уменьшением среднего размера зерна исследуемых сплавов, увеличенной пластичности, что показали испытания на растяжение и наличием крупных частиц во фронте роста трещины, препятствующих ее распространению. Проведены исследования влияния частиц AlN на малоцикловую усталость плоских образцов из магниевого сплава МЛ12 при знакопеременном циклическом нагружении в режиме растяжение-сжатие до 100-1000 тыс. циклов. Для сравнения были выбраны результаты, полученные на образцах из исходного сплава МЛ12 и сплава с частицами в концентрации 1,0 AlN масс. %. Аппроксимация экспериментальных данных уравнением Коффина-Мэнсона для сплава с частицами показывает меньшую способность к сопротивлению динамическим знакопеременным нагрузкам в области малоцикловой усталости, чем исходный сплав. Вероятно, подобное поведение связано с меньшими значениями предела текучести сплава с частицами.

Также в отчетный период с использованием гидридной технологии получен легирующий сплав Al3Er. Полученный сплав Al3Er является по составу двухфазным (Al3Er, AlEr), с преобладанием фазы Al3Er. Эрбий равномерно распределяется в объеме образца по границам сформировавшихся зерен.

Разработана физическая модель, описывающая ползучесть под воздействием постоянного механического напряжения дисперсно-упрочнённого материала с ГЦК-матрицей и некогерентными недеформируемыми упрочняющими частицами. В основе модели лежит концепция упрочнения и отдыха. Ползучесть обусловлена элементарными процессами пластической деформации, осуществляемыми движением сдвигообразующих дислокаций и точечных дефектов.

Создана программа для расчёта изменения параметров дефектной структуры, деформации, скорости деформации с течением времени, которая позволяет исследовать явление ползучести при разных температурах и механических напряжениях. Разработан метод решения задачи ползучести и определения характеристик напряженно-деформированного состояния стенок толстостенной трубы из дисперсно-упрочненного алюминиевого сплава при различных видах квазистатического нагружения. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния стенок трубы при неоднородном распределении упрочняющей фазы. Для повышения эффективности использования материала наружных слоев предложен метод составных труб, изготовленных из дисперсно-упрочненного алюминиевого сплава с различным содержанием частиц. В результате проведенных исследований определена величина контактного давления, а также величина натяга, позволяющая повысить предел упругого сопротивления составной трубы по сравнению со сплошной. Показано, что с увеличением температуры и расстояния между упрочняющими частицами при одной и той же их объемной доле величина предельного натяга уменьшается. Предел упругого сопротивления внутренней трубы в случае ее малой толщины линейно возрастает с ростом натяга. Увеличение контактного давления при соизмеримых толщинах внешней и внутренней трубы приводит к росту напряжений в стенке внешней трубы и способствует ее пластической деформации. Результаты проведенных исследований показали, что при изготовлении внешней части составной трубы можно использовать материал с меньшей объемной долей упрочняющих частиц, чем при изготовлении внутренней, без существенного ухудшения прочностных характеристик.

Разработаны теоретические основы создания дисперсно-упрочненных материалов и проведено исследование их поведения в неоднородном поле массовых сил. Рассмотрена пластическая деформация кольцевого диска в поле центробежной силы. Исследована зависимость напряженно-деформированного состояния диска от свойств материала. Результаты моделирования показывают, что упрочнение материала наночастицами существенно изменяет прочностные характеристики материала. В сплавах с меньшими расстояниями между упрочняющими частицами при одной и той же объемной доле частиц требуется существенно большая частота вращения диска для достижения пластической деформации. Таким образом, установлено, что уменьшение расстояния между частицами вызывает упрочнение материала, приводящее к росту предела пластического сопротивления.

По результатам выполнения работ в 2020 году опубликовано 4 работы в журналах, цитируемых базами Scopus, Web of Science, из них: 1 статья в журнале «JOM» (квартиль Q1 по Web of Science, Scopus), 3 статьи в журнале «Russian Physics

Journal» (квартиль Q3 Scopus), приняты к публикации: 1 статья в журнале «Chinese Journal of Physics» (квартиль Q2 Scopus); 1 статья в журнале «Вестник Томского государственного университета. Математика и механика», индексируемого базой Web of Science (Q3). Научные результаты работ представлены на двух конференциях различного уровня: (РИНЦ) XIV Всероссийская школа-конференция для молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (ПМ: 2020). 28 февраля (Новосибирск) по 6 марта 2020 г. (Шерегеш); Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», 23-26 ноября 2020 г., Москва. Получен патент на изобретение 2708724 «Способ электронно-лучевой сварки кольцевого соединения тонкостенной обечайки с цилиндрической крышкой, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов» (авторы из состава исполнителей проекта: Ворожцов А.Б., Хмелева М.Г.). Ссылка на информационные ресурсы в сети Интернет, посвященные проекту: название "От кости до космоса: физики ТГУ улучшают сплавы с помощью наноалмазов ", https://www.riatomsk.ru/article/20201103/tgu-splavi-slajder/