Сведения о выполненных работах в 2019 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

За период выполнения проекта все поставленные цели и задачи достигнуты и решены. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных работ, направленных на разработку и исследование металломатричных композиционных материалов на основе алюминия и магния. Разработаны научно-технологические подходы для введения и распределения наночастиц тугоплавких соединений в расплаве алюминия и магния. Получен комплекс данных, показывающих что добавка тугоплавких части до 1 масс. % в сплавы алюминия и магния позволяет получать новые сплавы с повышенными физико-механическими свойствами. Изучены процессы затвердевания расплавов при введении наночастиц. Изучено деформационное поведение в широком диапазоне скоростей нагружения получаемых композиционных сплавов как на основе алюминия так и на основе магния. Определены технологические режимы деформационной обработки алюминиевых сплавов, упрочненных наночастицами. Установлены наиболее перспективные для модификации и упрочнения алюминия и магния наночастиы и способы их введения. Проведены теоретические и экспериментальные исследования в области ударно-волнового компактирования нано- и микропорошков алюминия и смесей порошка алюминия с тугоплавкими с порошками оксида алюминия, детонационного наноалмаза. Для получения ударно-волновых и литых композиционных материалов методами электрического взрыва проводника, плазмохимического синтеза, детонационного синтеза и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с последующей механохимической обработкой синтезированы наночастицы Al, наноалмаза, оксида алюминия, субмикрочастицы боридов алюминия и титана. Проведено исследование и характеризация свойств синтезированных порошков-морфологии, дисперсного и фазового состава, кинетических свойств, в т.ч. при повышенных температурах. Получены модели, позволяющие рассчитать пороговые значения давлений ударной-волны для порошковых смесей алюминий – 10 масс. % оксида алюминия, алюминий – 10 масс. % наноалмаза. Установлено, что добавка в порошок алюминия более твердых и тугоплавких компонентов (оксида алюминия и наноалмаз) повышает пределы давления для получения максимально плотного и однородного компакта методом взрывного компактирования. Методом ударно-волнового компактирования порошков проведен синтез композиционных материалов на основе алюминия. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что в ударно-волновых композитах, содержащих керамические и алмазные наночастицы, сформирована вторая – метастабильная фаза алюминия со значительно отличающимися структурными параметрами. Показано, что механические свойства

(предел прочности, твердость) «ударно-волнового алюминия» в 2,5 раза выше по сравнению с технически чистым алюминием. При этом введение наноалмазов и частиц оксида алюминия в смеси с порошком алюминия приводит к дальнейшему улучшению механических свойств.

С использованием различных методов внешнего воздействия (электростатическое поле, ультразвуковая обработка, вибрационная обработка) получены лёгкие сплавы на основе алюминиевого сплава АК7, упрочнённого наночастицами оксида алюминия. Установлено, что введение 0,2 вес. % наночастиц оксида алюминия способствует уменьшению пористости и среднего размера зерна (с 1000 до 300 мкм) сплава АК7) и увеличению механических свойств: предел текучести с 45 до 60 МПа, предел прочности с 175 до 210 МПа, пластичность с 3,5 до 4,5 %. Получены зависимости, связывающие время воздействия с физико-химическими свойствами частиц и расплава и с характеристиками акустического излучения. Установлено, что электростатический заряд поверхности частицы уменьшает краевой угол смачивания, тем сильнее, чем меньше частица. Ультразвуковое воздействие делает возможным пропитку агломератов частиц расплавом металла, и введения в расплав частиц благодаря создаваемому звукокапиллярному эффекту; время пропитки существенно зависит от значения краевого угла смачивания. Чем меньше краевой угол, тем меньше времени требуется для пропитки частицы с помощью ультразвука.

Разработана физическая и математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочненных сплавов с металлической матрицей и частицами второй фазы. Основой элементарных процессов и механизмов пластической деформации скольжения являются возникновение, генерация, движение и аннигиляция дефектов различного типа. Исследована в рамках приближения эффективной однородной деформационной среды релаксация различных элементов дислокационной структуры, включая их аннигиляцию; вычислена интенсивность аннигиляционных процессов. Математическая модель включает уравнения баланса сдвигообразующих дислокаций, призматических дислокационных петель межузельного типа и вакансионного типа, дислокаций в дипольных конфигурациях вакансионного типа и межузельного типа, межузельных атомов, моновакансий и бивакансий, уравнение, определяющее скорость деформации скольжения и уравнение, описывающее внешнее воздействие на деформируемый материал. В расчетах учитывается, что генерация дислокаций в дипольных конфигурациях начинается при достижении критической плотности дислокаций, величина которой определяется масштабными характеристиками упрочняющей фазы.

Выявлено, что доминирующим элементом дислокационной структуры в дисперсно-упрочненных материалах с недеформируемыми частицами при низких температурах и при малых степенях деформации являются призматические петли у частиц упрочняющей фазы или – при больших степенях деформации – дислокации в дипольных конфигурациях, при высоких температурах – сдвигообразующие дислокации.

Экспериментально показано, что наличие наночастиц Al2O3 в сплаве алюминия 6082 в количестве 0,2 масс. % способствует формированию более однородной и мелкозернистой структуры полуфабриката при комбинированной пластической деформации, сочетающей винтовую и ручьевую прокатку. В результате эффективного измельчения структуры по сравнению с не содержащим частицы сплавом, в деформированном сплаве с наночастицами наблюдаются более высокие значения микротвердости.

Установлено, что введение наночастиц Al2O3 в алюминиевый сплав 6082 в сочетании с одновременным ультразвуковым воздействием на расплав и механическим перемешиванием способствует механизму упрочнения за счет образования внутренней структуры с меньшим размером зерна во всем объеме слитка. Уменьшение среднего размера зерна и присутствие упрочняющих частиц в исследуемом сплаве ведут к увеличению его физико-механических свойств Присутствие наночастиц в сплаве способствует формированию однородной мелкозернистой структуры при обработке ИПД по схеме многопроходного РКУП. Механическое измельчение структуры сопровождается большим увеличением значений прочностных свойств и изменению свойств пластичности при одноосном растяжении по сравнению со сплавом без частиц.

Предложена тепловая модель изменения агрегатного состояния вещества (кристаллизации) при внесении в его объем частиц, что позволяет предсказать скорость и степень локального охлаждения расплава, время кристаллизации, а также минимальный размер результирующих кристаллов в зависимости от дисперсности частиц и их массовой концентрации. При натурном эксперименте подтверждены полученные в тепловой модели закономерности: чем меньше размер вводимых частиц, тем меньше должен быть размер зерна конечного сплава.

Экспериментально установлено влияние скорости охлаждения расплава алюминия с наночастицами на структуру получаемых слитков. Выявлено, что с увеличением скорости охлаждения уменьшается средний размер зерна и размер дендритной ячейки получаемых слитков. При этом получен коэффициент, зависящий от природы сплава алюминия, для выражения описывающего связь расстояния между осями дендритов от скорости охлаждения сплава в интервале кристаллизации.

Проведен синтез и исследование металломатричных композитов на основе магния; с использованием ультразвуковой обработки расплава были получены материалы на основе литейного магниевого сплава АМ60, упрочненного наночастицами нитрида алюминия. Введение наночастиц нитрида алюминия в магниевый сплав способствовало получению мелкозернистой структуры получаемых отливок и, как следствие, увеличению механических характеристик сплава. Предел текучести увеличился на 103 %, предел прочности на разрыв на 115 % и пластичность на 140 % по сравнению с исходным (без частиц) сплавом.

Установлено, что при введении частиц TiB2 и C в расплав АМг5 микротвердость полученных слитков увеличивается с 750 до 880 МПа, условный предел текучести с

19 до 21 МПа, предел прочности с 47 до 69 МПа. После деформационной обработки до состояния листового проката (толщина листа 1,2 мм) и отжига при температуре 310-330 °С, увеличиваются значения условного предела текучести с 308 до 343 МПа и предела прочности с 343 до 427 МПа, при пластичности 12 % для листов с частицами и без соответственно.

Получены результаты измерений упруго-пластических и прочностных характеристик литейного магниевого сплава МЛ5, относящегося к системе Mg-Al-Zn-Mn, в различном структурном состоянии и при разных скоростях деформации при растяжении, а также в условиях нагружения испытуемых образцов плоскими ударными волнами субмикросекундной длительности. Испытания проведены с упрочненными сплавами и в исходном состоянии. При этом часть исследуемых сплавов подвергали термообработке с целью гомогенизации структуры. Получены данные о микроструктуре всех типов исследуемых образцов. Установлено, что наибольшими прочностными характеристиками обладает термообработанный металломатричный композит МЛ5/AlN как при квазистатическом, так и при ударно-волновом нагружении. Модификация сплава МЛ5 с помощью наночастиц нитрида алюминия в сочетании с закалкой и старением привело к двухкратному увеличению пластичности.

Проведены исследования влияния наночастиц оксида алюминия на малоцикловую усталость технически чистого алюминия. Изучено влияние различной концентрации наночастиц оксида алюминия на сплавы алюминия. Выявлена тенденция увеличения сопротивляемости усталостному нагружению сплавов, упрочненных наночастицами оксида алюминия, при этом обнаружено, что наибольшую эффективность оказывает добавление наночастиц в количестве до 1 масс. %; сплавы с последующими концентрациями уравниваются в свойствах с исходным (без частиц) сплавами.

Изучено влияние частиц диборида титана на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АК7 до и после термообработки. Показано, что термообработка приводит к увеличению размеров кремниевой эвтектики с формированием дендритной структуры. При термообработке в режиме Т4, размер эвтектики увеличивается до 20 мкм. В режиме Т6 ее размер увеличивается до 40 мкм. Введение частиц в сплав АК7 с последующей термообработкой Т6 позволяет измельчать размер эвтектических включений до 5 мкм. Выявлено снижение среднего размера зерна с 449 мкм (исходный сплав без частиц) до 140 мкм при введении 0,5 масс. % TiB2. Результаты механических испытаний на одноосное растяжение показали, что введение частиц диборида титана в сплав алюминия АК7 приводит к увеличению условного предела текучести с 96 и 141 МПа, предела прочности с 203 до 261 МПа и пластичности с 2.3 до 2.8 %, соответственно.

Проведены исследования алюминиевых сплавов системы Al-Mg с частицами диборида титана различной дисперсности. Введение частиц в сплав проводилось с использованием лигатур, изготовленных методом СВС-синтеза. Полученные лигатуры состояли из интерметаллической матрицы Al-Ti, наполненной

частицами TiB2. Установлено, что использование лигатур с частицами TiB2 различной дисперсности при введении в расплав с одновременным воздействием ультразвуковой обработки позволяет измельчать зерно алюминиевого сплава при последующей кристаллизации. Установлено, что введение микро и наночастиц TiB2 позволяет увеличить предел текучести, предел прочности и пластичность алюминиевых сплавов в литом состоянии.

По результатам выполнения работ по проекту за 2017-2019 гг. опубликовано 27 статей в журналах, цитируемых базами Scopus, Web of Science и РИНЦ. Из них: 3 статьи в журнале JOM (квартиль Q1 по Web of Science), 6 статтq в в журнале «Metals» (квартиль Q1 по Web of Science), 1 статья в журнале «Archives of Acoustic» (квартиль Q2 Scopus), 1 статья в журнале «International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion» (квартиль Q4 по Scopus), 11 статей в журнале «Известия высших учебных заведений. Физика» (база РИНЦ, переводная версия журнала «Russian Physics Journal» индексируются в базах Web of Science, Scopus), 1 статья в журнале «Вестник Томского государственного университета. Математика и механика» (база РИНЦ, переводная версия индексируются в базе Scopus). Научные результаты работ представлены очно на Международных конференциях: ISEM2017 в г. Сендай, (Япония) университет Тохоку, 2017 г.; 147-ом Ежегодном симпозиуме-выставке TMS 2018 (г. Феникс, США); 49-й Международной ежегодной конференции Фраунгоферского института химической технологии (г. Карлсруэ, Германия), 2018; Десятом Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, Россия) и 14-й Международной конференции “HEMs-2018” (г. Томск, Россия), 2018; XVth International Workshop High Energetic Materials (HEMs-2019): Demilitarization, Antiterrorism and Civil Applications. Monaco (Principality of Monaco), 2019; Перспективы развития фундаментальных наук. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Россия, Томск 2019; European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes. Швеция, Стокгольм, 2019; XXV Conference «Aluminium of Siberia. Россия, Красноярск, 2019. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет напряжения течения и плотности дефектов дисперсно-упрочненного материала с алюминиевой матрицей и некогерентными сферическими частицами» (авторы: Данейко О.И., Ковалевская Т.А.); получен патент на изобретение 2691826 «Способ получения отливок из дисперсно-упрочненных сплавов на основе алюминия или магния» (авторы из состава исполнителей проекта: Ворожцов А.Б., Хмелева М.Г.); получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019661897 "Расчет плотности дефектов и напряжения течения гетерофазного материала с ГЦК-матрицей, упрочненной когерентными и некогерентными частицами" (авторы: Данейко О.И., Ковалевская Т.А.). На основе проведенных исследований по проекту исполнителем Хрусталевым А.П. 27.09.2019 г. защищена диссертационная работа по теме: «Исследование физико-механических свойств дисперсно-упрочнённых композитов на основе алюминия и магния» по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.