Сведения о выполненных работах в 2018 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

Проведен ряд теоретических и и экспериментальных работ в области дисперсного упрочнения и модификации алюминиевых, магниевых и алюминиево-магниевых сплавов тугоплавкими частицами наноразмерного и субмикроразмерного диапазона. Модифицирована математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочненных сплавов с алюминиевой матрицей и некогерентными частицами второй фазы. Уточнены основные процессы и механизмы пластической деформации линейных и точечных дефектов различного типа. С использованием математического моделирования исследовано влияние размеров некогерентных частиц на прочностные свойства гетерофазного сплава на основе алюминия в материалах с одинаковой объёмной долей упрочняющей фазы. Показано, что размер упрочняющих частиц является определяющим параметром для величины напряжения течения дисперсно-упрочнённых сплавов при разных температурах и объёмных долях упрочняющей фазы. Обнаружен диапазон температур для материалов с разной объёмной долей упрочняющей фазы и разным сочетанием масштабных характеристик упрочняющей фазы, в котором наблюдается термическая стабильность напряжения течения. Выявлено влияние скорости деформации на состав дефектной структуры и напряжение течения. Показано, что уменьшение скорости деформации приводит к снижению прочностных свойств дисперсно-упрочнённых материалов.

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. Механическое измельчение структуры сопровождается большим увеличением значений прочностных свойств и изменению свойств пластичности при одноосном растяжении по сравнению со сплавом без частиц.

Проведены теоретические исследования, позволяющие полагать, что изменение агрегатного состояния вещества (кристаллизация) на поверхности вводимых малых (нано- или субмикронных) частиц оказывает существенное влияние на размеры зерен в конечном состоянии сплавов и композитов.

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, зависищий от природы сплава алюминия, для выражения описывающего связь расстояния между осями дендритов от скорости охлаждения сплава в интервале кристаллизации. Обнаружено, что частицы оксида алюминия при больших скоростях охлаждения распределены преимущественно в теле зерен/дендритной ячейки сплава.

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.

По результатам выполнения работ в 2018 году опубликовано 9 работ в журналах, цитируемых базами Scopus, Web of Science и РИНЦ. В частности: 1 статья в журнале «JOM» (квартиль Q1), 2 статьи в журнале «Metals» (квартиль Q2), 1 статья в журнале «International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion» (квартиль Q4), 4 статьи в журнале «Известия высших учебных заведений. Физика» (база РИНЦ, переводная версия журнала "Russian Physics Journal" индексируются в базе Web of Science - Q3), 1 статья в журнале «Вестник Томского государственного университета.

Математика и механика» (база РИНЦ, переводная версия индексируются в базе Scopus). Научные результаты работ представлены на четырех Международных конференциях: 147-ом Ежегодном симпозиуме-выставке TMS 2018 (г. Феникс, США), 49-й Международной ежегодной конференции Фраунгоферского института химической технологии (г. Карлсруэ, Германия), Десятом Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, Россия) и 14-й Международной конференции “HEMs-2018” (г. Томск, Россия). Также прошла рабочая встреча по проекту в Миланском политехническом университете (Италия) с привлечением заведующего лабораторией Л. Галфетти (Luciano Galfetti), К. Параван (Christian Paravan), С. Досси (Stefano Dossi), Ф. Маджи (Filippo Maggi). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет напряжения течения и плотности дефектов дисперсно-упрочненного материала с алюминиевой матрицей и некогерентными сферическими частицами». Подана заявка на патент на изобретение «Способ упрочнения и заливки в литейные формы алюминиевых и магниевых сплавов». На основе проведенных исследований по проекту исполнителем Хрусталевым А.П. подготовлена диссертационная работа по теме: «Теоретические и экспериментальные исследования структуры и физико-механических свойств дисперсно-упрочненных композитов на основе алюминия и магния», рассмотренная на заседании физико-технического факультета, и принято положительное решение о представлении диссертации в диссертационный совет по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.