Сведения о выполненных работах в 2021 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

В рамках решаемых задач проекта получен комплекс экспериментальных и теоретических данных о влиянии лигатур системы Al-Er, полученных по гидридной технологии, на структуру, химический и фазовый составы, физико-механические свойства алюминиево-магниевых сплавов до и после деформационной обработки. Для этого методом гидрированием эрбия в химическом реакторе с последующим смешением с микропорошком сплава алюминия, прессованием и дегидрированием в вакуумной печи получены лигатуры содержанием эрбия системы Al-Al3Er. После чего получены лабораторные отливки исходного и модифицированного алюминиево-магниевого сплава АМг5 (химический состав 91,9-94,68 % Al, 4,8-5,8 % Mg, 0,3-0,8 % Mn, 0,5 % Fe, 0,5 % Si) методом литья с использованием ультразвукового воздействия на расплав и последующей термообработкой по режиму Т6. Модификацию сплава проводили при ультразвуковом воздействии введением приготовленных лигатур при температуре расплава 730 °С, содержащих эрбий. Модификация алюминиево-магниевого сплава добавками эрбия с ультразвуковым воздействием при литье позволила улучшить его механические свойства. Показатели твердости по Бринеллю HB и микротвердости по Виккерсу HV у модифицированного сплава увеличились и стали 64 HB и 86 HV, чем у исходного литого сплава АМг5, имеющего показатели 59 HB и 67 HV соответственно. Условный предел текучести, временное сопротивление и относительное удлинение после модифицирования литого сплава повысились с 63 МПа, 170 МПа и 14,75 % до 64 МПа, 204 МПа и 21,37 % соответственно.

С использованием теоретических оценок разработан режим деформационной обработки прокаткой исследуемых сплавов, в соответствии с которым получены образцы листового проката исходного и модифицированного эрбием сплавов АМг5. Слябы из исследуемых сплавов были прокатаны до пластин по одинаковому режиму при температуре 300 °С с максимальной усадкой до 80 %. После прокатки структура сплавов приобретает полосчатый характер, где зерна после больших деформаций вытянуты вдоль направления проката. Методами электронной микроскопии установлено, что в межзеренных пространствах встречаются участки с выделениями Fe-Mn и Al-Mg, Al-Mn фазы в виде микронных и субмикронных частиц. Введение эрбия уменьшает количество Fe-Mn фазы и увеличивает дисперсность, которая выделяется так же преимущественно по границам зерен. Частицы, содержащие Er, распределены в материале проката равномерно. Обнаружено его присутствие в матрице в виде отдельных микронных частиц, равномерно распределенных по всему объему, в виде субмикронных частиц в зернах и преимущественно на границах зерен.

Прокатка привела к увеличению значений твердости по Бринеллю до 78 и 83 HB по сравнению с показателями 59 и 64 HB литых сплавов – исходного и модифицированного соответственно. Показатели условного предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения после прокатки для сплава без частиц в среднем повысились с 63 до 115 МПа, с 170 до 295 МПа и с 14,75 до 41 %, а для модифицированного частицами Er сплава с 64 до 117 МПа, с 204 до 305 МПа и с 21,37 до 45 % соответственно.

Получены экспериментальные данные о влиянии микрофибр базальтового волокна на процессы литья и кристаллизации, структуру и свойства литейных сплавов. В качестве исходных материалов были использованы литейный алюминиевый сплав системы Al-Si АК9 и базальтовые волокна со средней длиной 60 мкм и диаметром 7 мкм в массовом количестве 1 масс. % и 2 масс. %. Структура исходного сплава АК9 представлена дендритами и кремниевой эвтектики. Средний размер дендритной ячейки составил около 19 мкм. Введение 1 масс. % базальта привело к увеличению среднего размера дендритных ячейки сплава до 26 мкм и снизило ширину области эвтектики. Введение 2 масс. % базальтовых волокон в расплав приводит к изменению типа микроструктуры после кристаллизации: происходит переход структуры от дендритной к зернистой, при этом средний размер зерна составил 32 мкм.

Эксперименты по растяжению образцов из исследуемых сплавов показали, что при введении волокон базальта предел текучести составляет порядка 60 МПа для 1 масс. % и 2 масс. % волокон, что выше предела текучести исходного сплава АК9, который составляет порядка 42 МПа. Предел прочности с введением волокон базальта также возрастает до 134 МПа и 156 МПа для сплава АК9 с содержанием 1 масс. % и 2 масс. % базальтовых волокон соответственно, при прочности исходного АК9 равной 108 МПа. Относительная деформация при введении 1 масс. % базальтовых волокон изменяется несущественно: с 1,77 % для исходного АК9 до 1,86 %; при введении 2 масс. % базальтовых волокон предельная относительная деформация сплава АК9 возрастает до 2,41 %. Увеличение предела прочности обусловлено вкладом базальтовых волокон в сопротивление разрыву. По результатам исследования микротвёрдости полученных образцов методом Виккерса выявлено, что при введении 1 масс. % базальтовых волокон, значение микротвёрдости возрастает на 21 % до 82 HV относительно исходного сплава АК9 со значениями 68 HV. Введение 2 масс. % волокон привело к увеличению микротвёрдости на 35 % до 92 HV относительно исходного сплава. Результаты измерения твёрдости методом Бринелля показали, что введение 1 масс. % и 2 масс. % базальта приводит к повышению твёрдости с 71 до 95-98 HB. Теоретические исследования эффекта упрочнения показывают, что упрочнение достигается за счёт нескольких одновременно реализующихся механизмов: предел текучести увеличивается благодаря различию коэффициентов термического расширения алюминиевой матрицы и базальта; показатели пластического течения за счет возникших препятствий для движения дислокаций в объеме зерна.

Определены зависимости состав-структура-свойства алюминиевых сплавов, модифицированных наночастицами тугоплавких металлов. Для этого получены образцы модифицированных алюминиевых сплавов наноразмерными частицами вольфрама. В качестве исходного сплава использован алюминиевый сплав АМг5. В качестве наноразмерных частиц тугоплавких металлов использовали нанопорошок вольфрама. Образцы исходного и модифицированного сплавов получены литьем в кокиль. Кристаллизация сплавов в кокиле проходила под действием вибрации с частотой 60 Гц и амплитудой 0,5 мм на вибрационном столе.

Установлено, что введение наночастиц вольфрама способствует снижению среднего размера зерна сплава АМг5 с 410 до 180 мкм. При этом определено, что структура сплавов достаточно однородная с равноосными зёрнами. В структуре сплавов присутствует пористость до 5 %. Установлено, что в сплаве, содержащем наночастицы вольфрама, присутствуют тёмные включения, которые могут состоять из вольфрама, агломерированного из-за выдавливания наночастиц фронтом кристаллизации при охлаждении и затвердевании расплава. По статистическим расчётам на основе изображений микроструктуры и данных по плотности полученных материалов, общее объёмное количество таких включений не превышает 1 %. При этом известно, что вольфрам реагирует с алюминием и возможно образование интерметаллидных соединений Al-W. Исследования механических свойств сплава АМг5/W, показали, что введение в сплав наночастиц вольфрама приводит к увеличению предела текучести, предела прочности и пластичности сплава АМг5. Введение 0,3 масс. % наночастиц вольфрама приводит к увеличению предела текучести с 53 до 78 МПа, предела прочности с 140 до 166 МПа и пластичности с 1,9 до 7,7 %. Кроме этого, введение наночастиц вольфрама приводит к увеличению твёрдости и микротвёрдости с 59 до 63 HB и с 67 до 86 HV соответственно. Теоретические оценки показали, что упрочнение сплава АМг5/W происходит за счёт механизмов, описанных Холла-Петчем, Орованом и разности коэффициентов теплового расширения (КТР) матрицы и частиц.

Получены данные о влиянии на структуру, деформационное поведение и эксплуатационные свойства медицинских магниевых сплавов. Методом литья в защитной атмосфере аргона получены модифицированные наноразмерными частицами алмаза медицинские магниевые сплавы системы Mg-Ca-Zn. В качестве исходных материалов в работе использованы чистый магний (99,5 %), металлический цинк и кальций, а также нанопорошок алмаза (НД), полученный методом детонационного синтеза. Лигатуры с содержанием НД получены методом ударно-волнового компактирования. Процессы литья и кристаллизации расплава сопровождалась одновременной вибрационной обработкой с применением вибростенда. В результате литья удалось добиться в отливках содержания магния около 94 масс. % во всех сплавах. При этом содержание цинка и кальция варьируется в зависимости от сплава. В исходном сплаве Mg-Ca-Zn удалось добиться 4 и 1 масс. % цинка и кальция соответственно. Литьё сплава с НД привело к увеличению содержания цинка и кальция до 4,7 и 1,3 масс. %. Ультразвуковая обработка расплава

привела к угару большего количества кальция, содержание которого в сплаве снизилось до 0,46 масс. %.

Зеренная структура сплава Mg-Ca-Zn без частиц состоит из равноосных зёрен с размерами изменяющимся от 50 до 300 мкм и средним значением 180 мкм. Введение НД привело к снижению среднего размера зерна до 90 мкм и более однородно НД в магниевый сплав, которые в процессе литья создают множество центров кристаллизации за счёт переохлаждения в области частиц НД. Ультразвуковая обработка расплава привела к снижению среднего размера зерна сплава Mg-Ca-Zn с 180 до 110 мкм, но их размер варьируется в широком диапазоне от 3 до 200 мкм. Исходный сплав Mg-Ca-Zn состоит из матрицы и второй фазы распределённой в межзёренных границах в виде каркаса. Введение НД позволило снизить толщину второй фазы за счёт снижения среднего размера зерна сплава в два раза, что привело к увеличению протяженности зернограничной области. В сплаве Mg-Ca-Zn без частиц после ультразвуковой обработки количество второй фазы заметно снижается, которая представляет собой отдельные включения вытянутой и глобулярной формы. В сплаве, содержащем НД, были обнаружены области, содержащие углерод, размер которых менее 1 мкм, что может свидетельствовать о наличии агломератов и отдельных частиц наноалмаза в структуре сплава. Сплав Mg-Ca-Zn с ультразвуковой обработкой состоит из магниевой матрицы и включений перенасыщенных кальцием. После испытаний на сжатие, определено, что введение НД приводит к увеличению предела текучести сплава с 66 до 75 МПа, предела прочности с 294 до 332 МПа и пластичности с 22 до 27 %. Показатели твёрдости исследуемых магниевых сплавов одинаковы и равны 54 и превышают показатели чистого магния практически в два раза.

Получены результаты теоретических исследований формирования дислокационной структуры (распределение плотностей дислокаций и концентраций точечных дефектов) в элементах конструкций и механизмов (цилиндрических трубах и вращающихся дисках). 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. 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. Вместе с генерацией сдвигообразующих дислокаций развиваются элементарные процессы, обусловленные взаимодействием дислокаций с частицами и порождающие кольца Орована, призматические петли, дипольные конфигурации. Между структурными элементами в ходе деформации и последующих релаксационных процессов возможны взаимные превращения.

Определено влияние тепловых напряжений и неоднородности распределения упрочняющей фазы на пластическую деформацию и напряженно-деформируемого

состояния стенок трубы из дисперсно-упрочнённого сплава на основе алюминия. Разработанные методики решения задач ползучести, реализованные в виде программного обеспечения, позволяют оценить остаточный ресурс цилиндрических труб и провести параметрический анализ влияния различных факторов на их напряженно-деформированное состояние.

Получено распределение напряжений, деформаций и перемещений для вращающегося упругопластического сплошного и кольцевого диска для трех моделей материала: без упрочнения, линейно изотропно упрочняющегося материала и материала, учитывающего истинную диаграмму растяжения. 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. Получены данные о распределении напряжений, деформаций и перемещений для вращающегося упругопластического диска для трех моделей материала: без упрочнения, линейно изотропно упрочняющегося материала и материала, учитывающего истинную диаграмму растяжения. Установлено, что модели сред без упрочнения и линейно упрочняющихся сред дают заниженную оценку по сравнению с моделью нелинейно упрочняющейся среды.

По результатам выполнения работ в 2021 году опубликовано 5 работ в журналах, цитируемых базами Scopus, Web of Science, из них: 2 статьи в журнале «Metals» (квартиль Q1 по Scopus), 1 статья в журнале «Russian Physics Journal» (квартиль Q3 Scopus), 1 статья в журнале «Вестник Томского государственного университета. Математика и механика», индексируемого базой Web of Science (Q4), 1 статья в сборнике «Minerals, Metals and Materials Series: Light Metals» (Scopus). Научные результаты работ представлены на пяти конференциях различного уровня: TMS Annual Meeting 2021, 15-18 марта 2021 г. (онлайн); 59-ой Международной научной студенческой конференции, 12-23 апреля 2021 г., Новосибирск; VIII Международной молодежной научной конференции, Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021, 17-21 мая 2021 г., Екатеринбург; XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», 27-30 апреля 2021 г., Томск; XVI Международной конференции «HEMs-2021» «Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение», 16-18 ноября 2021 г. в рамках 7-го Международного симпозиума по энергетическим материалам и их применению ISEM–2021 совместно с Японским обществом взрывчатых веществ (Токио, Япония).

Ссылка на информационные ресурсы в сети Интернет, посвященные проекту: «ТГУ презентовал новые сплавы и наноматериалы на конференции HEMs-2021», https://www.tsu.ru/short_news/tgu-prezentoval-novye-splavy-i-nanomaterialy-na-konferentsii-hems-2021/?sphrase_id=363917