

Сведения о выполненных работах
в период с 15.07.2020 г. по 30.06.2021 г.

по проекту **«Исследование влияния тугоплавких металлических и неметаллических наночастиц на структуру, деформацию и разрушение сплавов Al-Mg»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 20-79-00060

Руководитель: Хрусталёв Антон Павлович, канд. физ.-мат. наук

Исследована структура кристаллической структуры, морфология и фазового состав исходных порошков вольфрама, наноалмаза и лигатуры Al-Al₃Er. Частицы в порошке вольфрама имеют правильную сферическую форму, а их средний размер составляет 200 нм. В порошке наблюдаются микрочастицы вольфрама, размер которых достигает 10 мкм, а общее объёмное содержание не превышает 10 %. Поверхность лигатуры Al-Al₃Er является однородной с равномерным распределением частиц по поверхности. Алюминий равномерно распределен в образце. Эрбий в основном распределяется на границах фаз с преимущественно бимодальным распределением частиц по размеру, средний размер крупных частиц составил 39.3 мкм, средний размер мелких частиц 1.4 мкм. Матрица лигатуры по химическому составу является алюминий содержащей, по границам зерен которой распределены частицы, содержащие эрбий.

С использованием различных методов проведён синтез лигатур, содержащих наночастицы алюминия, вольфрама и Al₃Er. Лигатура Al₃Er синтезирована методом гидрирования-дегидрирования с использованием в качестве исходных материалов микропорошка алюминия и металлического эрбия. Лигатуры, содержащие наночастицы алмаза и вольфрама синтезированы методом порошковой металлургии. Для синтеза лигатур были получены порошковые смеси Al-5 масс.% C и Al-5 масс.% W для равномерного распределения наночастиц в алюминиевой матрице. Деагломерация наночастиц осуществлялась с использованием механического смесителя, а процесс состоял из двух этапов: смешивание наночастиц в петролейном эфире и стеариновой кислоте и добавление микропорошка алюминия с последующим смешиванием в течении 15 минут с последующей сушкой в вакуумной печи и просеиванием. Методом рентгенофлуоресцентного анализа исследован фазовый состав порошка алмаза, который показал содержание углерода 93 %, кислорода – 5.93 %. Структура нанопорошка алмаза представляет собой равноосные частицы сферической формы средний размер которых составляет 7 нм. Параметр кристаллической решетки наноразмерного алмаза составил $a = 3.6248 \text{ \AA}$.

Исследовано влияние механического перемешивания, ультразвуковой и вибрационной обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава AMg5. Ультразвуковая обработка способствовала рафинированию расплава и снижению среднего размера зерна сплава AMg5 с 490 до 246 мкм. Кроме этого ультразвуковая обработка позволила снизить пористость сплава AMg5 с 9 до 4 %.

За счёт эффектов дегазации и модифицирования структуры сплава, использование ультразвуковой обработки является наиболее перспективным методом обработки для получения дисперсно-упрочнённых наночастицами сплавов алюминий-магний. Механическая обработка расплава АМг5 привела к увеличению пористости до 29 %. Вибрационная обработка позволяет снизить средний размер зерна сплава АМг5 с 490 до 310 мкм, однако при этом увеличивается пористость сплава с 9 до 15 %. В структуре сплава наблюдаются отдельные крупные поры размером до 50 мкм.

Определено оптимальное содержание наночастиц в сплаве алюминия-магний. Введение небольшого (до 0.2 масс.%) наночастиц не приводит к значительному изменению среднего размера зерна сплава АМг5 и снижению плотности. Дальнейшее увеличение, вплоть до 1 масс.% наночастиц не оказывает модифицирующего воздействия на структуру сплава АМг5, средний размер которого составляет около 250 мкм. Увеличение содержания наночастиц приводит к интенсивному снижению плотности с 2.68 до 2.34 г/см³. Исследования микроструктуры, полученных в результате экспериментов по определению оптимального содержания наночастиц в сплаве алюминия-магний, показали, что введение наночастиц более 0.8 масс. % приводит к увеличению порового пространства в алюминиевой матрице, а также агломерации наночастиц, из-за чего происходит снижение плотности сплава. Наиболее оптимальным является использование количества наночастиц не превышающем 0.8 масс.%.

Исследовано влияние механического перемешивания, ультразвуковой и вибрационной обработки на структуру, фазовый состав и распределение наночастиц в объёме сплава алюминий-магний. Наночастицы вольфрама не оказывают модифицирующего воздействия на структуру сплава АМг5. Структура сплавов АМг5 достаточно однородная с равноосными зёрнами. В структуре сплавов присутствуют поры, однако пористость сплавов не превысила 5 %. В сплаве, содержащем наночастицы вольфрама наблюдались тёмные включения, которые состоят из вольфрама, агломерированного из-за выдавливания наночастиц фронтом кристаллизации при охлаждении и затвердевании расплава. Общее объёмное количество таких включений не в сплаве АМг5-W не превышает 1 %. По результатам исследования структуры сплавов АМг5-W установлено, что в структуре сплава присутствуют включения пор, размером не более 1 мкм в которых возможно присутствие отдельных частиц вольфрама, которые появляются в них из-за влияния фронта кристаллизации, который вытесняет их в газовые полости сплава. Картирование по элементам на растровом электронном микроскопе показало, что вольфрам распределён равномерно в сплаве АМг5-W. Проведены исследования Введение 0.2 масс.% наночастиц Al₃Er не оказывает модифицирующего воздействия на структуру алюминиевого сплава АМг5. Зерна представляют собой относительно равноосные структурные элементы без видимой направленности к зоне, перпендикулярной стенке кокиля. Исследованный с использованием рентгенофлуоресцентного анализа элементный состав, показал наличие эрбия в сплаве АМг5- Al₃Er в количестве 0,1477 мас.%. Введение наночастиц алмаза не оказывает модифицирующего воздействия на микроструктуру сплава АМг5, средний

размер зерна которого увеличивается с 153 до 162 мкм. Ультразвуковая и вибрационная обработка расплава позволяют получить однородную структуру слитка. При этом выявить нанодиамаз в структуре не удается из-за малого размера частиц и содержания (0.2 масс. %).

Исследовано влияние наночастиц вольфрама, алмаза и Al₃Er на механические свойства дисперсно-упрочнённых сплавов АМг5. Введение 0.5 масс. % наночастиц вольфрама в алюминиевый сплав АМг5 привело к увеличению предела текучести с 52 до 79 МПа и пластичности с 1.9 до 5.5 %. Также наблюдалось увеличение предела прочности алюминиевой матрицы с 140 до 155 МПа. Введение наночастиц вольфрама также привело к увеличению твёрдости и микротвёрдости сплава АМг5 с 58 до 63 НВ и с 67 до 85 НВ соответственно. Выявлено, что доминирующим механизмом увеличения механических свойств сплава АМг5 при введении наночастиц вольфрама, является механизм Орована. Разрушение сплава АМг5-W имеет явно выраженное разрушение по вязкому транскристаллитному механизму. На поверхности дендритов отсутствуют частицы вольфрама и их агломераты, что свидетельствует о малом количестве упрочнителей, находящихся в микропорах сплава.

Введение 0.2 масс. % частиц Al₃Er в алюминиевый сплав АМг5 незначительно увеличивает микротвёрдость и твёрдость. Растяжение полученных сплавов показало, что введение частиц Al₃Er не приводит к увеличению предела текучести сплава АМг5, который составил 57 МПа по сравнению с исходным сплавом, предел текучести которого составил 52 МПа. Введение 0,2 мас. % частиц Al₃Er привело к увеличению предела прочности сплава с 140 до 156 МПа. Также выявлено значительное повышение пластичности сплава АМг5 после введения частиц Al₃Er с 1,9 до 12,2 %. Сплав АМг5-Al₃Er имеет равномерную поверхность разрушения, полученную согласно вязкому механизму, исключая зоны, перенасыщенные эрбием, которые не позволяют эффективно использовать металлическую матрицу в процессе деформации сплава. Введение наночастиц алмаза позволило увеличить микротвёрдость сплава АМг5 с 75 до 88 НВ, но не привело к увеличению твёрдости, которая составила 71 НВ. Сплав АМг5 без добавления наночастиц алмаза имеет больший предел текучести при меньшем значении предела прочности и относительном удлинении. У сплава с частицами значение предела прочности выше в 1.5 раза при больших в 2 раза показателях относительного удлинения (пластичности). Кривые имеют одинаковую тенденцию к протеканию процесса деформирования. Стадия равномерного удлинения заметно преобладает над стадией неравномерного удлинения.