

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2021 г. по 30.06.2022 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

Получены дисперсно-упрочнённые сплавы на основе АМг5, содержащие от 0 до 0,8 масс. % наночастиц вольфрама и от 0.2 до 0.6 масс. % наночастиц алмаза. В качестве исходного использовали сплав АМг5 (Al-95 мас. %, Mg-5 мас. %). Исходные сплавы АМг5 были получены при аналогичных параметрах литья без введения наночастиц.

Исследована структура сплавов АМг5, с различным содержанием наночастиц вольфрама. Установлено, что структура исходного сплава АМг5 представляет собой равноосные зерна со средним размером 180 мкм. Введение 0,3 и 0,5 мас. % W не приводит к существенному уменьшению среднего размера зерна, который составил 164 и 149 мкм соответственно. Однако увеличение содержания наночастиц W в сплаве АМг5 до 0,8 мас. % приводит к уменьшению среднего размера зерна до 95 мкм. Введение 0,3 мас. % W не привело к существенному изменению структуры по сравнению с исходным сплавом. Увеличение содержания W до 0,5 мас. % приводит к изменению структуры, в частности наблюдаются отдельные частицы W и их агломераты, которые располагаются в объеме зерен и межграницных областях. Увеличение содержания W до 0,8 мас. % привело к значительному увеличению наночастиц и их агломератов в объеме и на границах зерен. В структуре сплава АМг5-0,8W присутствуют частицы неправильной формы размером до 10 мкм, а также включения в виде «иглы» толщиной менее 500 нм и длиной до 10 мкм. Интерметаллические включения игольчатой формы представляют собой Al₅W. Образование фазы Al₁₂W при затвердевании привело к измельчению структуры алюминиевого сплава.

Исследована структура сплавов АМг5, с различным содержанием наночастиц алмаза. Введение 0.2 масс. % наноалмаза с ультразвуковой обработкой позволило существенно снизить средний размер зерна сплава АМг5 с 209±24 до 159±10 мкм. Введение 0.4 масс. % наночастиц алмаза также позволило снизить средний размер зерна сплава АМг5 с 209±24 до 165±18 мкм. Введение в сплав АМг5 0.6 масс. % наночастиц алмаза снизило средний размер зерна с 209±24 до 149±8 мкм. Введение наночастиц алмаза оказывает модифицирующее воздействие на микроструктуру сплава АМг5, однако увеличение его содержание не приводит к существенному изменению размера зерна.

Исследовано влияние механических свойств и определены основные механизмы деформирования и разрушения дисперсно-упрочнённых сплавов АМг5 в зависимости от содержания наночастиц вольфрама. Введение 0,3 мас. % наночастиц W приводит к повышению твердости с 57 до 64 НВ, микротвердости с 68 до 71 НВ, предела текучести с 80 до 85 МПа и пластичности с 5,2 до 6,4 %. Введение 0,5 мас. % наночастиц W привело к повышению твердости с 64 до 69 НВ, предела прочности при растяжении со 164 до 185 МПа и пластичности с 6,4 до 8,5 %. Увеличение содержания наночастиц W до 0,8 мас. % позволило повысить твердость с 69 до 75 НВ, микротвердость с 73 до 81 НВ, предел текучести с 79 до 91 МПа, предел прочности при растяжении с 185 до 194 МПа, пластичность от 8,5 до 10,3 %. Доминирующим механизмом повышения механических свойств является механизм Орована, обусловленный дисперсным упрочнением наночастицами W.

Исследовано влияние механических свойств и определены основные механизмы деформирования и разрушения дисперсно-упрочнённых сплавов АМг5 в зависимости от содержания наночастиц алмаза. Введение 0.2 масс. % наночастиц алмаза позволило увеличить предел текучести с 57 до 69 МПа, предел прочности с 155 до 200 МПа и пластичность 11 до 18 %. Увеличение наночастиц алмаза до 0.4 масс. % привело к незначительному повышению предела текучести с 57 до 71 МПа, и пластичности с 11 до 19 % без изменения предела прочности. Содержание наночастиц алмаза в количестве 0.6 масс. % позволяет увеличить предел текучести до 74 МПа, но при этом происходит снижение предела прочности и пластичности до 192 и 15 % соответственно по сравнению со сплавами с меньшим содержанием упрочняющих частиц. Увеличение механических характеристик сплава АМг5, содержащего наночастицы алмаза обусловлено измельчением зерна за счет модифицирования структуры, который составил 9,63 МПа. Дополнительный вклад в увеличение механических свойств вносит упрочнение металлической матрицы алюминиевого сплава АМг5 наночастицами алмаза по механизму Орована. Одновременное увеличение предела текучести, прочности и пластичности связано с перераспределением нагрузки в матрице, за счёт введения и распределения наночастиц.

Проведена деформационная обработка сплавов АМг5, содержащих наночастицы Al₃Er и алмаз. Проведение экспериментальных работ позволило разработать режим деформационной обработки полученных сплавов в состоянии предварительного нагрева слябов, которые помещались в муфельную печь, разогретую до 300 °С, на 30 минут.

Деформационная обработка сплава АМг5-Al₃Er привела к формированию структуры с бимодальным распределением зёрен по размерам. В отличие от исходного сплава, в зёрнах сплава АМг5-Al₃Er угол разориентации превышает 15°, что свидетельствует о влиянии интерметаллических частиц, которые инициируют возникновение более дефектной структуры. Частицы Al₃Er распределяются по границам зерна и преимущественно скапливаются в зоне интерметаллических включений Al₃Mg. Встречаются и отдельные частицы Al₃Er, размер которых не превышает 1 мкм. Деформационная обработка сплавов АМг5 приводит к

существенному изменению картины деформации алюминиевых сплавов, что приводит к увеличению предела текучести, предела прочности и пластичности сплава АМг5 с 63 до 115 МПа, с 170 до 295 МПа и с 15 до 41 % соответственно. Деформационная обработка сплава АМг5-Аl3Er не позволяет повысить предел текучести по сравнению с исходным сплавом, за счёт малого количества упрочняющих частиц (0.07 об. %) по сравнению со значительным измельчением зерна матрицы и большим количеством внесённых дефектов в кристаллическую структуру. Несмотря на это, частицы Al3Er позволяют повысить пластичность деформированного сплава АМг5 с 41 до 45 %. Деформационная обработка позволила более равномерно распределить частицы Al3Er в алюминиевой матрице по сравнению с литым сплавом, что способствовало увеличению его пластичности.

Деформационная обработка сплава АМг5-0.2 масс.% наночастиц алмаза при 300 °С с суммарной степенью пластической деформации 0,8 привела к формированию новой зеренной структуры – отличной от исходной, с вытягиванием зерен вдоль направления деформации. Размер зерен в продольном и поперечном направлениях составляет 60 и 5 мкм, соответственно. Введение 0.2 масс.% наночастиц алмаза позволило повысить механические свойства сплава АМг5 после деформационной обработки, включая предел текучести с 308 до 343 МПа, предел прочности с 386 до 427 МПа и пластичность с 11 до 12 %.

Полученные результаты представлены на международных конференциях ISEM-2021 (Токио, Япония) с докладом «Investigation of structure and mechanical properties of the AA5056 alloy reinforced with tungsten nanoparticles» [https://www.tsu.ru/short_news/tgu-prezentoval-novye-splavy-i-nanomaterialy-na-konferentsii-hems-2021/]; TMS-2022 (Анахайм, Калифорния, США) с докладом «Influence of tungsten nanoparticles on the structure and mechanical behavior of AA5056 under quasi-static loading»; МНСК-2022 (Новосибирск, Россия) с докладом «Влияние наночастиц вольфрама на механические свойства сплава АМг5», а также XI Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, Россия) с докладом «Структура и механические характеристики сплава АМг5, упрочнённого наночастицами вольфрама».

Опубликована 1 статья в журнале «Light Metals», входящего в международную базу цитирования Scopus. Принята к публикации 1 статья в журнал Metals (MDPI), входящего в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.