

УДК 66-669.1

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-4-76-84

Наноструктурированные деформационно-упрочняемые алюминий-магниевые сплавы, модифицированные фуллереном C_{60} , полученные методом порошковой металлургии

Часть 2. Влияние концентрации магния на физико-механические свойства

© 2020 г. **И.А. Евдокимов, Р.Р. Хайруллин, Р.Х. Баграмов, С.А. Перфилов, А.А. Поздняков, В.В. Аксененков, Б.А. Кульницкий**

Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ), г. Москва, г. Троицк, Россия

Статья поступила в редакцию 20.11.19 г., доработана 26.12.19 г., подписана в печать 27.12.19 г.

Аннотация: Настоящая работа является продолжением исследований влияния магния на структурно-фазовый состав и физико-механические свойства наноструктурированных деформационно-упрочняемых алюминий-магниевых сплавов, модифицированных фуллереном C_{60} [1]. Полученные ранее механолегированные порошки композитов [1] были консолидированы методом прямой горячей экструзии. Режим консолидации был подобран на основании результатов изучения особенностей формирования структуры и фазового состава при механолегировании и термической обработке. Установлено, что с увеличением концентрации магния наблюдается повышение механических свойств экструдированных наноструктурных композиционных материалов, при этом модифицирование фуллереном C_{60} позволяет стабилизировать полученную при механолегировании зеренную структуру и замедлить распад α -твёрдого раствора магния в алюминии вплоть до 300 °С. При аналогичной термобарической обработке сплава $Al_{82}Mg_{18}$ (АМг18), не модифицированного фуллереном C_{60} , отмечаются уменьшение параметра решетки α -твёрдого раствора и увеличение среднего размера кристаллитов, сопровождающиеся последовательным образованием γ -, β' - и β -фаз, при этом γ - и β' -фазы являются промежуточными. Зеренная структура экструдированных образцов типична для материалов, полученных таким способом, – зерна плотно упакованы, вытянуты и ориентированы вдоль оси экструзии, при этом прослеживается наследование морфологии механолегированных порошков. Использование методов механолегирования и интенсивной пластической деформации (экструзии) позволило достичь значительного улучшения ряда механических свойств. Получены материалы с пределом прочности при растяжении 880 МПа, пределом прочности при изгибе 1100 МПа, микротвёрдостью до 3300 МПа при сохранении плотности на уровне 2,4–2,6 г/см³. Таким образом, показана перспективность применения методов порошковой металлургии для получения новых наноструктурных композиционных материалов, модифицированных фуллереном C_{60} , с повышенным уровнем физико-механических свойств.

Ключевые слова: алюминий, магний, твёрдый раствор, композит, наноструктура, экструзия, фуллерен, прочность.

Евдокимов И.А. – канд. техн. наук, науч. сотр. отдела конструкционных и функциональных наноматериалов ТИСНУМ (108840, г. Москва, г. Троицк, Центральная ул., 7а). E-mail: ivan_911@mail.ru.

Хайруллин Р.Р. – стажер-исследователь отдела конструкционных и функциональных наноматериалов ТИСНУМ. E-mail: khayrullin@phystech.edu.

Баграмов Р.Х. – канд. техн. наук, науч. сотр. отдела конструкционных и функциональных наноматериалов ТИСНУМ. E-mail: bagramov@tisnum.ru.

Перфилов С.А. – канд. техн. наук, зав. отделом конструкционных и функциональных наноматериалов ТИСНУМ. E-mail: nhoots@mail.ru.

Поздняков А.А. – канд. техн. наук, зав. лабораторией синтеза новых сверхтвёрдых материалов ТИСНУМ. E-mail: pozdnjkov@yandex.ru.

Аксененков В.В. – науч. сотр. отдела структурных исследований ТИСНУМ. E-mail: aksvv@tisnum.ru.

Кульницкий Б.А. – докт. физ.-мат. наук, науч. сотр. отдела структурных исследований ТИСНУМ. E-mail: boris@tisnum.ru.

Для цитирования: Евдокимов И.А., Хайруллин Р.Р., Баграмов Р.Х., Перфилов С.А., Поздняков А.А., Аксененков В.В., Кульницкий Б.А. Наноструктурированные деформационно-упрочняемые алюминий-магниевые сплавы, модифицированные фуллереном C_{60} , полученные методом порошковой металлургии. Часть 2. Влияние концентрации магния на физико-механические свойства. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 4. С. 76–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-4-76-84.

Nanostructured strain-hardened aluminum-magnesium alloys modified by C₆₀ fullerene obtained by powder metallurgy

Part 2. The effect of magnesium concentration on physical and mechanical properties

I.A. Evdokimov, R.R. Khayrullin, R.Kh. Bagramov, S.A. Perfilov, A.A. Pozdnyakov,
V.V. Aksenonkov, B.A. Kulnitskiy

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials (TISNCM), Moscow, Troitsk, Russia

Received 20.11.2019, revised 26.12.2019, accepted for publication 27.12.2019

Abstract: This paper is intended to continue the studies of magnesium effects on the structural phase composition, physical and mechanical properties of the nanostructured strain-hardened aluminum-magnesium alloys modified with C₆₀ fullerene [1]. Previously obtained mechanically alloyed composite powders [1] were consolidated by direct hot extrusion method. Consolidation parameters were chosen based on previous studies of the structure and phase composition formation during mechanical alloying and heat treatment. It was found that an increase in magnesium concentration improves mechanical properties of extruded nanostructured composite materials, and additives modified by C₆₀ fullerene stabilize the grain structure and slow down decomposition of α solid solution of magnesium in aluminum to 300 °C. Under similar thermobaric treatment Al₈₂Mg₁₈ (AMg18) not modified with C₆₀ demonstrates a reduced α solid solution lattice constant and an increased average crystallite size. These processes are accompanied by sequential formation of γ , β' , and β phases, while γ and β' are intermediate phases. The grain structure of extruded samples is typical for materials obtained in this way – grains are closely packed, elongated and oriented along the extrusion axis. The grain structure of extruded samples inherits the morphology of mechanically alloyed powders. Thus, mechanical alloying methods followed by intense plastic deformation (extrusion) improved mechanical properties significantly. Materials with ultimate tensile strength of 880 MPa; ultimate bending strength of 1100 MPa; microhardness up to 3300 MPa; and with the same density of 2.4–2.6 g/cm³ were obtained. This result demonstrates the prospects for using powder metallurgy techniques in the production of new nanostructured composite materials modified by C₆₀ fullerene with improved physical and mechanical properties.

Keywords: aluminum, magnesium, solid solution, composite, nanostructure, extrusion, fullerene, strength.

Evdokimov I.A. – Cand. Sci. (Eng.), research scientist, Department of constructional and functional nanomaterials, Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials (TISNCM) (108840, Russia, Moscow, Troitsk, Tsentral'naya str., 7a). E-mail: ivan_911@mail.ru.

Khayrullin R.R. – research engineer, Department of constructional and functional nanomaterials, TISNCM. E-mail: khayrullin@phystech.edu.

Bagramov R.Kh. – Cand. Sci. (Eng.), research scientist, Department of constructional and functional nanomaterials, TISNCM. E-mail: bagramov@tisnum.ru.

Perfilov S.A. – Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of constructional and functional nanomaterials, TISNCM. E-mail: nhoots@mail.ru.

Pozdnyakov A.A. – Cand. Sci. (Eng.), head of the Laboratory for the synthesis of new superhard materials, TISNCM. E-mail: pozdnjkov@yandex.ru.

Aksenonkov V.V. – research scientist, Department of structural research, TISNCM. E-mail: aksvv@tisnum.ru.

Kulnitskiy B.A. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), research scientist, Department of structural research, TISNCM. E-mail: boris@tisnum.ru.

For citation: Evdokimov I.A., Khayrullin R.R., Bagramov R.Kh., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Aksenonkov V.V., Kulnitskiy B.A. Nanostructured strain-hardened aluminum-magnesium alloys modified by C₆₀ fullerene obtained by powder metallurgy. Part 2. The effect of magnesium concentration on physical and mechanical properties. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 4. P. 76–84 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-4-76-84.

Введение

Металломатричные наноструктурные композиционные материалы (НKM) представляют значительный интерес с точки зрения как материаловедения, так и их прикладного использования в современной науке и технике.

В большинстве случаев [2–5] при исследовании металломатричных НKM, модифицированных

ных ультрадисперсными высокомолекулярными или иными частицами, речь идет об образцах малого размера — тонких фольгах, покрытиях, порошках или спеках размером в несколько миллиметров. Основные трудности при получении объемных НKM связаны с их метастабильностью, повышенной реакционной способностью, плохой обраба-

тываемостью, связанной с высокими прочностными свойствами, и т.д. Тем не менее существует ряд работ, описывающих получение объемных образцов [6–9]. Исходя из анализа имеющихся литературных данных, одним из перспективных путей получения НКМ достаточного размера является применение совокупности методов порошковой металлургии и интенсивной пластической деформации, адаптированных для работы с наноматериалами. Так, например, в работе [10] описано получение методом прокатки протяженных алюмоматричных НКМ, упрочненных графеном. Изготовленные образцы демонстрировали увеличение прочности при растяжении (на 73 %) и твердости (на 27 %) относительно исходного матричного сплава, при этом пластичность снижалась (с 16 до 8 %). В работах [11, 12] в качестве метода синтеза механолегированных порошков алюминия, модифицированных углеродными нанотрубками, использовался метод искроплазменного спекания. Полученные материалы демонстрировали повышение почти в 2 раза прочностных характеристик и снижение пластичности до уровня 2–3 %. В работе [13] приведены результаты работы по созданию крупногабаритных (>100 мм в диаметре и >1,5 м длиной) композитов на основе алюминия, модифицированных углеродными нанотрубками. Отмечен рост основных характеристик полученных материалов на 50 % относительно исходного сплава, при этом их стоимость оценивается в 2 раза выше стоимости матрицы.

Результаты [2–13] свидетельствуют о перспективности применения НКМ в различных областях науки и техники, особенно там, где соотношение прочности изделия и его массы имеет ключевое значение. Использование НКМ в конструкциях машин, механизмов и прочих изделий позволит не только повысить их ключевые характеристики, но и добиться дополнительной экономической выгоды за счет снижения массы конструкции в целом.

Настоящая работа направлена на исследование совместного влияния концентрации магния и фуллерена C_{60} на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства объемных алюминий-магние-вых композиционных материалов.

Методика исследований

В качестве исходных материалов для получения объемных НКМ применяли порошковые композиции состава $Al_xMg_y + 0,3 \text{ мас.}\% \text{ фуллерена } C_{60}$

(где $y = 0, 3, 6, 9, 12, 15$ и $18 \text{ мас.}\%$; x — баланс), полученные согласно методике [1]. Далее эти материалы обозначены как АМг 3, 6, 9, 12, 15, 18 соответственно.

Порошки НКМ имеют сложную иерархическую структуру, включающую крупные частицы (агрегаты), состоящие из прочных высокоплотных агломератов, которые, в свою очередь, являются совокупностью наноразмерных кристаллитов. В зависимости от концентрации магния размер частиц порошков варьируется от 20 до 100 мкм, средний размер кристаллитов находится в диапазоне 25–80 нм [1].

Для получения объемных образцов механолегированные порошки компактировали в цилиндрические брикеты под давлением 0,5–0,6 ГПа и подвергали прямой горячей экструзии при температуре $t = 270 \div 290 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью деформации 6,2 при давлении истечения 1,0–1,5 ГПа. Экструдированные образцы механически обрабатывали для дальнейших исследований и испытаний.

Структурные исследования полученных образцов проведены методами оптической («Olympus BX51», Япония) и просвечивающей (JEM-2010 фирмы «Jeol», Япония) электронной микроскопии. Рентгенофазовый анализ (РФА) порошков выполняли на дифрактометре «Empyrean» («PANalytical B.V.», Нидерланды) в CuK_α -излучении. На основании полученных дифрактограмм с помощью программы MAUD методом функциональных параметров определяли величину ОКР-областей когерентного рассеяния (средний размер кристаллитов).

Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера PMT-3 (АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) при нагрузке 50 г и времени выдержки 18 с. Определение предела прочности при растяжении и изгибе осуществляли с использованием универсальной испытательной машины «Instron 5982» (фирма «Instron», США).

Результаты и их обсуждение

Согласно результатам дифференциальной сканирующей калориметрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света и РФА, подробно рассмотренным в [1], структурно-фазовый состав исходных порошков НКМ представляет собой совокупность зерен исходного матричного сплава АМг и пересыщенного α -твердого раствора магния в алюминии, который стабилен вплоть

до $t = 290 \pm 300$ °С. Ранее было показано [14, 15], что превышение данной температуры ведет к протеканию необратимых структурно-фазовых превращений (распаду α -твердого раствора, образованию β - и γ -фаз и рекристаллизации [16–18]). На основании этих результатов был подобран режим консолидации порошков НКМ, обеспечивающий сохранение наноструктуры и искомого фазового состава.

Для изготовления объемных образцов порошки НКМ подвергали прямой горячей экструзии со степенью деформации 6,2 через фильеру с отверстием круглого сечения. В результате были получены образцы диаметром 4 мм и длиной 150 мм (рис. 1).

Следует отметить, что получение заготовок из НКМ большего размера методом экструзии ограничено лишь параметрами применяемого оборудования. Так, по нашим оценкам, для изготовления изделий с площадью сечения порядка 50 см² необходимо использование прессы усилием около 10 МН.

Методом РФА не выявлено изменений фазового состава НКМ после экструзии. В качестве примера на рис. 2 приведены рентгенограммы для НКМ ($\text{Al}_{94} + \text{Mg}_6 + 0,3$ мас.% фуллерена C_{60}), экструдированных при различных температурах. Как видно из представленных данных, при температу-

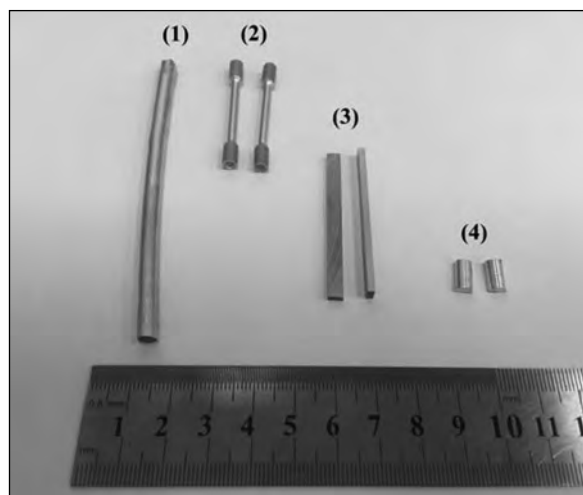


Рис. 1. Общий вид экструдированной заготовки (1) и изготовленных образцов для испытаний на растяжение (2), на изгиб (3), а также для исследования плотности и микротвердости (4)

Fig. 1. General view of extruded blanks (1) and samples prepared for tensile tests (2), bending tests (3), as well as for density and microhardness study (4)

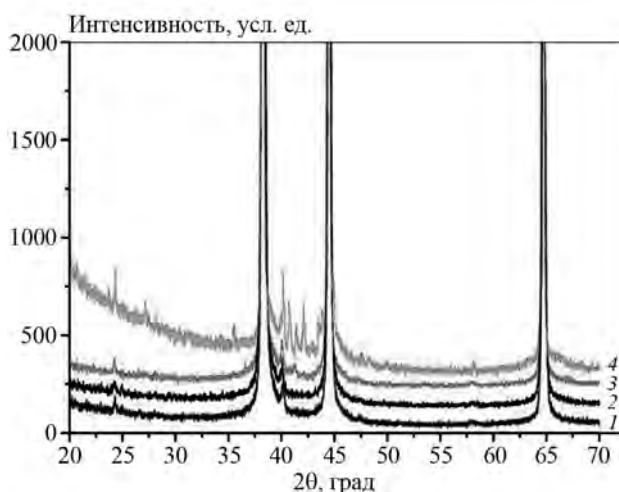


Рис. 2. Исследование структурно-фазового состава нанокompозита $\text{Al}_{94} + \text{Mg}_6 + 0,3$ мас.% фуллерена C_{60} методом РФА в зависимости от температуры экструзии t , °С – 270 (1), 300 (2), 330 (3), 500 (4)

Fig. 2. Structural phase composition study of nanocomposite $\text{Al}_{94} + \text{Mg}_6 + 0.3$ wt.% C_{60} fullerene by X-ray phase analysis depending on extrusion temperature t , °С – 270 (1), 300 (2), 330 (3), 500 (4)

ре экструзии до 300 °С положение и ширина пиков остались прежними, появление новых рефлексов не наблюдается. Судя по соотношению интенсивностей основных пиков алюминия, образования преимущественной ориентации кристаллитов (текстурирования) в процессе экструзии не произошло.

Согласно данным РФА (рис. 2), при повышении температуры экструзии выше 300 °С пики α -твердого раствора магния в алюминии смещаются в область больших углов, их полуширина уменьшается, появляются новые пики. Это свидетельствует о распаде α -твердого раствора, увеличении среднего размера кристаллитов и формировании интерметаллидных фаз.

Из данных [16–18], в диапазоне температур до 300 °С пересыщенный α -твердый раствор магния в алюминии частично распадается с образованием γ - и β' -фаз, что, как правило [19], фиксируется методом РФА. При исследовании НКМ появление пиков, характерных для β (Al_3Mg_2), β' (Al_3Mg) и γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$) фаз, зарегистрировано не было. Возможно, это связано с торможением фазовых превращений устойчивыми в этих условиях углеродными наноструктурами (фуллерен C_{60} и его фрагменты) [20].

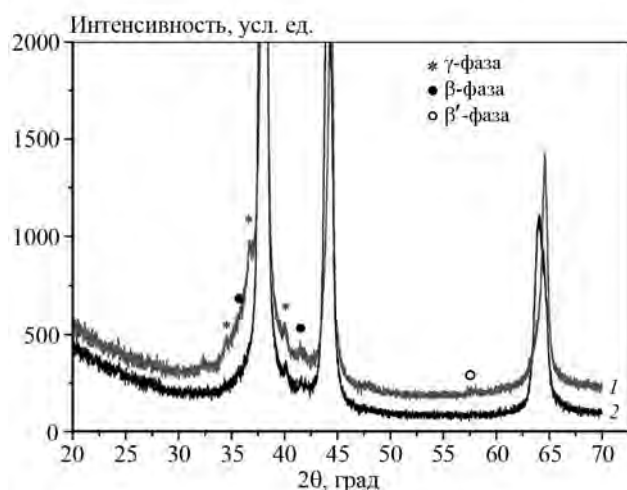


Рис. 3. Исследование фазового состава образцов методом РФА после экструзии (290 °C)

1 – механолегированный сплав АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$)
2 – наноструктурный композиционный материал АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18} + 0,3 \text{ мас.}\% \text{ C}_{60}$)

Fig. 3. Phase composition study of samples by X-ray phase analysis after extrusion (290 °C)

1 – AMg18 mechanically doped alloy ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$)
2 – AMg18 nanostructured composite material ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18} + 0.3 \text{ wt.}\% \text{ C}_{60}$)

Для изучения влияния фуллерена C_{60} на стабильность НКМ при экструзии был исследован модельный материал, соответствующий по составу нанокompозиту АМг18 без добавления фуллера

рена C_{60} . На рис. 3 представлены дифрактограммы НКМ АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18} + 0,3 \text{ мас.}\% \text{ C}_{60}$) и сплава АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$) после аналогичной обработки.

Из данных рис. 3 видно, что в материале без фуллерена C_{60} после экструзии появились пики γ - и β -фаз. При этом параметр решетки твердого раствора уменьшился на $0,023 \text{ \AA}$, что соответствует выделению $\approx 5 \text{ ат.}\%$ магния, а размер ОКР увеличился с 32 до 87 нм.

Пики идентифицированных фаз имеют низкую интенсивность, что обусловлено их малым размером и невысокой концентрацией. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), размеры частиц образующихся фаз составляют 5–15 нм. В работах [16–19] было показано, что формирование β -фазы (Al_2Mg_3) происходит через промежуточную β' -фазу, близкую по своему элементному и структурному составу, а также за счет распада предварительно выделившейся из α -твердого раствора γ -фазы ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$). В полученных образцах были обнаружены участки образования β' -фазы с составом Al_2Mg (рис. 4, а).

Отжиг механолегированного сплава АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$) и НКМ АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18} + 0,3 \text{ мас.}\% \text{ C}_{60}$) при температуре $t = 500 \text{ °C}$ привел к окончательному формированию β -фазы (рис. 4, б). В отожженных образцах следов β' - и γ -фаз обнаружено не было (см. рис. 2).

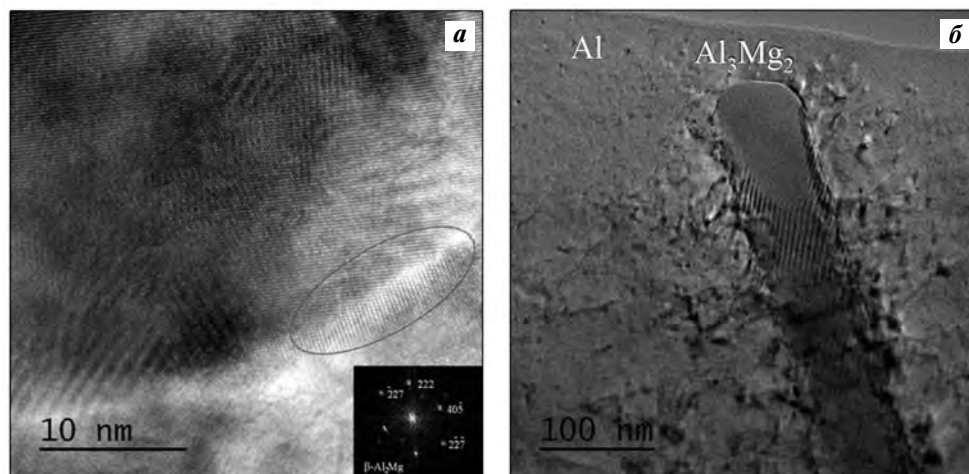


Рис. 4. ПЭМ-изображение структуры механолегированного сплава АМг18 ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$)

а – после размола; б – после отжига при $t = 500 \text{ °C}$

Fig. 4. TEM images of AMg18 mechanically doped alloy structure ($\text{Al}_{82} + \text{Mg}_{18}$)

а – after milling; б – after annealing at $t = 500 \text{ °C}$

Таким образом, установлено, что введение в состав НКМ фуллерена C_{60} способствует стабилизации структурно-фазового состава НКМ при термобарической обработке.

Как отмечалось выше (см. рис. 2), в НКМ после экструзии не обнаружено преимущественной ориентации кристаллитов алюминия. В то же время на оптических снимках шлифов (рис. 5) наблюдается типичная для экструдированных материалов картина.

Представленная на рис. 5 микроструктура типична для всех исследуемых образцов НКМ и состоит из плотно упакованных зерен, вытянутых вдоль оси экструзии, со средним размером 25–200 мкм, что соответствует размерам агрегатов порошков НКМ после размола [1].

Выявленные особенности макро- и микроструктур изученных НКМ могут представлять интерес с точки зрения разработки новых подходов при получении современных конструкционных материалов. Во-первых, прослеживается наследование экструдированными образцами структуры порошков после размола, что позволяет контролировать или определять свойства конечного материала еще на стадии механолегирования. Во-вторых, отсутствие текстурирования после консолидации может быть одним из возможных путей минимизации такого недостатка метода экструзии, как анизотропия свойств материала вдоль и поперек оси экструзии [20], поскольку деформация зерен и образование преимущественной кристаллографической ориентации в ряде случаев ограничивают их применение в качестве конструкционных материалов [21]. Рассматриваемые НКМ после экструзии не

имеют выраженной текстуры на уровне кристаллитов, что потенциально может снизить общую анизотропию объемного материала.

Для комплексного изучения влияния магния на физико-механические свойства НКМ были осуществлены исследования таких ключевых характеристик, как плотность, микротвердость, предел прочности при растяжении и предел прочности при изгибе. Ниже приведены результаты проведенных испытаний (см. таблицу).

При увеличении концентрации магния и, соответственно, уменьшении среднего размера кристаллитов НКМ микротвердость образцов заметно возрастает, что может быть объяснено повышением вклада твердорастворного упрочнения и дисперсного упрочнения из-за формирования ультрадисперсных выделений интерметаллидов β - и γ -фаз.

Кривые деформации при растяжении представлены на рис. 6.

Как видно из вышеприведенных данных, с увеличением концентрации магния предел прочности при растяжении возрастает — до 0,88 ГПа для НКМ, содержащего 9 % магния. Это может быть связано с тем, что, как отмечалось выше, добавки фуллерена препятствуют распаду α -твердого раствора магния в алюминии, что приводит к росту доли твердорастворного упрочнения. В совокупности с твердорастворной составляющей при увеличении концентрации магния повышается вклад поликристаллического механизма упрочнения, связанного с размером кристаллитов, размер которых уменьшается с ростом концентрации магния в НКМ [1]. Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности при переходе к

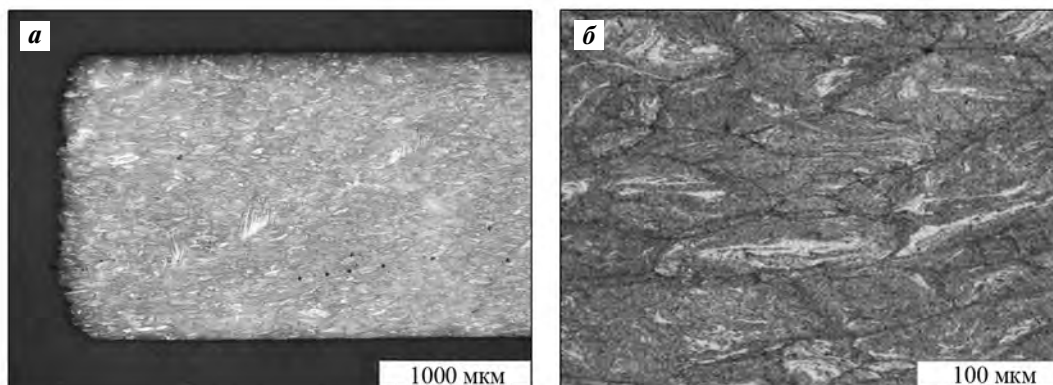


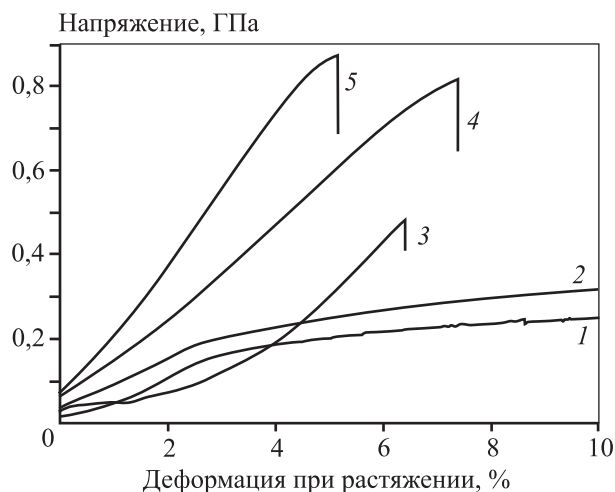
Рис. 5. Оптические фотографии структуры НКМ (АМг 6 + 0,3 мас.% C_{60}) после экструзии

Fig. 5. Optical photographs of NCM structure (AMg 6 + 0.3 wt% C_{60}) after extrusion

Физико-механические свойства полученных образцов НКМ

Physical and mechanical properties of NCM samples obtained

Материал	Средний размер кристаллитов, нм	Плотность, г/см ³	Микротвердость, МПа	Предел прочности, МПа	
				при растяжении	при изгибе
AMr3 исходный	220	2,69	800	290	307
AMr6 исходный	200	2,65	1300	353	413
AMr3 + 0,3%С ₆₀	69	2,65	1580	498	862
AMr6 + 0,3%С ₆₀	48–49	2,63	2500	820	1100
AMr9 + 0,3%С ₆₀	42–43	2,58	2290	880	733
AMr12 + 0,3%С ₆₀	40–41	2,56	2540	—	687
AMr15 + 0,3%С ₆₀	34–35	2,52	3130	—	747
AMr18 + 0,3%С ₆₀	18–25	2,49	3300	—	846

**Рис. 6.** Кривые деформации НКМ при растяжении

- 1 – исходный матричный сплав АМг3
 2 – исходный матричный сплав АМг6
 3 – НКМ АМг3 (сплав АМг3 + 0,3%С₆₀)
 4 – НКМ АМг6 (сплав АМг6 + 0,3%С₆₀)
 5 – НКМ АМг9 (сплав АМг6 + 3%Mg + 0,3%С₆₀)

Fig. 6. NCM tensile strain curves

- 1 – AMg3 initial matrix alloy
 2 – AMg6 initial matrix alloy
 3 – AMg3 NCM (AMg3 alloy + 0.3%С₆₀)
 4 – AMg6 NCM (AMg6 alloy + 0.3%С₆₀)
 5 – AMg9 NCM (AMg6 alloy + 3%Mg + 0.3%С₆₀)

наноструктурному состоянию. Так, в отличие от исходного сплава АМг3, имеющего пластическую деформацию при разрушении более 12 %, НКМ на его основе разрушается хрупко. НКМ, содержащие 6 и 9 % магния, демонстрируют значение пластической деформации не более 0,3 %. Таким об-

разом, снижение пластичности в первую очередь может быть связано с торможением дислокационных механизмов деформирования, возникающим из-за особенностей сформированной в результате механолегирования субструктуры — наноразмерных кристаллитов и высокой дефектности их границ [22].

К сожалению, из-за хрупкости образцов с повышенным содержанием магния (АМг12, АМг15, АМг18) не удалось изготовить подходящие образцы для испытаний на растяжение, однако удалось провести испытания на изгиб (см. таблицу). Установлено, что наноструктурирование, модифицирование НКМ фуллереном С₆₀ и повышение концентрации магния обеспечивают увеличение прочностных характеристик до 3 раз относительно исходного матричного сплава, но при этом наблюдается снижение пластичности.

По удельной прочности (отношению прочности к плотности) полученные НКМ значительно превосходят традиционные алюминиевые сплавы, ряд легированных сталей и титановых сплавов.

Результаты проведенных исследований и выявленные особенности формирования структурно-фазового состава демонстрируют перспективность использования методов порошковой металлургии для получения новых наноструктурных алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных фуллереном С₆₀, с повышенным уровнем физико-механических свойств. Такие материалы могут найти широкое применение в различных областях науки и техники, в частности в машиностроении и авиакосмической отрасли.

Заключение

В работе обобщены результаты исследования влияния концентрации магния и модифицирующего действия фуллерена C_{60} на особенности формирования структуры и фазового состава при экструзии механолегированных порошков состава $Al_xMg_y + 0,3 \text{ мас.}\% C_{60}$.

Установлено, что с повышением концентрации магния наблюдается увеличение прочностных характеристик НКМ, однако при этом происходит снижение пластичности. Максимально достигнутая прочность при растяжении для НКМ $AMg9$ составила 880 МПа. Предел прочности при изгибе имеет максимум 1100 МПа для НКМ $AMg6$. Максимально достигнутой твердостью 3,3 ГПа обладает НКМ $AMg18$. При этом плотность находится в пределах 2,4—2,6 г/см³. Полученные результаты говорят о перспективности практического использования методов механолегирования и интенсивной пластической деформации (экструзии) для получения объемных образцов наноструктурных композиционных материалов на основе алюминий-магниевых сплавов.

После экструзии прослеживается наследование микроструктуры механолегированных порошков, что позволяет контролировать или определять свойства конечного материала еще на стадии получения порошковых композиций. При этом методом РФА показано отсутствие преимущественной ориентации кристаллитов в НКМ после экструзии, что потенциально может быть использовано для снижения анизотропии свойств материалов, полученных таким способом.

Методами РФА и ПЭМ показано, что распад α -твердого раствора и образование β -фазы (Al_2Mg_3) происходят через промежуточную β' -фазу (Al_2Mg), близкую по элементному и структурному составу, а также за счет распада предварительно выделившейся из α -твердого раствора γ -фазы ($Al_{12}Mg_{17}$). При этом модифицирование НКМ фуллереном C_{60} препятствует рекристаллизации и распаду пересыщенного α -твердого раствора магния в алюминии при термобарической обработке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии от 14.06.2019 г. № 075-15-2019-1307 (№ 14.574.21.0162). Идентификатор соглашения: RFMEFI57417X0162.

Funding: The study was carried out under financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Grant Agreement № 075-15-2019-1307 dated 14.06.2019 (№ 14.574.21.0162). Agreement identifier: RFMEFI57417X0162.

Литература/References

1. Евдокимов И.А., Хайруллин Р.Р., Баграмов Р.Х., Аксененков В.В., Перфилов С.А., Поздняков А.А., Кульнички Б.А., Кириченко А.Н. Наноструктурированные деформационно-упрочняемые алюминий-магнелиевые сплавы, модифицированные фуллереном C_{60} , полученные методом порошковой металлургии. Ч. 1. Влияние концентрации магния на структуру и фазовый состав порошков. *Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 3. С. 76—84.
Evdokimov I.A., Khayrullin R.R., Bagramov R.Kh., Ak-senenkov V.V., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Kulnitskiy B.A., Kirichenko A.N. Nanostructured strain hardened aluminum-magnesium alloys modified by C_{60} fullerene obtained by powder metallurgy. Pt. 1. Effect of magnesium concentration on the structure and phase composition of powders. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 3. P. 76—84 (In Russ.).
2. Srinivasa B., Debrupa L., Arvind A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites: A review. *Int. Mater. Rev.* 2013. Vol. 55 (1). P. 41—46.
3. Zeeshan B., Othman M., Mazli M. Recent progress on the dispersion and the strengthening effect of carbon nanotubes and graphene-reinforced metal nanocomposites: A review. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2018. Vol. 43 (1). P. 1—46.
4. Ian K., Jonghwan S., Jun L., Robert Y., Pulickel A. Composites with carbon nanotubes and graphene: An outlook. *Science*. 2018. Vol. 362. P. 547—553.
5. Hyun-Joo C. Mechanical behavior of Al/C_{60} — fullerenes nanocomposites. *Compos. Res.* 2013. Vol. 26. P. 111—115.
6. Abhishek S., Vyas M.S., Jinu P. Fabrication of bulk aluminum-graphene nanocomposite through friction stir alloying. *J. Compos. Mater.* 2019. Vol. 0(0). P. 1—16.
7. Hany A. Mechanical behavior of nanostructured bulk aluminum at various temperatures. *Mater. Res. Express*. 2019. Vol. 6 (11). P. 1165f.
8. Xin Z., Mo Y. Graphene nanocomposites. *Molecules*. 2019. Vol. 24. P. 2440—2441.
9. Leila L. The potential for metal—carbon nanotubes composites as interconnects. *J. Electr. Mater.* 2018. Vol. 48 (1). P. 92—98.

10. Jitendar T., Ajay M., Amitava R., Devesh M., Sathish N. Evaluation of mechanical and thermal properties of bi-layer graphene reinforced aluminum matrix composite produced by hot accumulative roll bonding. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 801. P. 49—59.
11. Wenming T., Song-mei L., Bo W., Xin C., Jian-hua L., Mei Y. Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2016. Vol. 23. P. 723—729.
12. Ehsan G., Parvanh S., Alireza J., Hosein R., Kamyar S., Touradj E. Microwave and spark plasma sintering of carbon nanotube and graphene reinforced aluminum matrix composite. *Arch. Civil Mech. Eng.* 2018. Vol. 18 (4). P. 1042—1054.
13. Kang Pyo S., Xiaohui L., Hideki M., Akihiro K., Jong P., Hyoungh K., Shigenobu O., Young L., Ju L. Ton-scale metal-carbon nanotube composite: The mechanism of strengthening while retaining tensile ductility. *Extr. Mech. Lett.* 2016. Vol. 8. P. 245—250.
14. Al-Aqeeli N., Mendoza-Suarez G., Drew R.A.L. XRD and TEM characterization of Al—Mg-based nanocomposite alloys. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2008. Vol. 18. P. 231—235.
15. Calka A., Kaczmarek W., Williams J.S. Extended solid solubility in ball-milled Al—Mg alloys. *J. Mater. Sci.* 1993. Vol. 28. P. 15—18.
16. Scudino S., Sakaliyska M., Surreddi K.B., Eckert J. Mechanical alloying and milling of Al—Mg alloys. *J. Alloys Compd.* 2009. Vol. 483 (1-2). P. 2—7.
17. Jie J.C., Zou C.M., Wang H.W., Li B., Wei Z.J. Mechanical properties of Al(Mg) solid solution prepared by solidification under high pressures. *J. Alloys Compd.* 2012. Vol. 510 (1). P. 11—14.
18. Schoenitz M., Dreizin E.L. Structure and properties of Al—Mg mechanical alloys. *J. Mater. Res.* 2003. Vol. 18 (08). P. 1827—1836.
19. Wang H.X., Zhou K.K., Wendong L., Gong J.L., Cao X.Q., Zhao X.G. Fragmentation mechanism and dynamic precipitation behavior of β phase in Mg15Al magnesium alloy during ECAP. *Chin. J. Nonferr. Met.* 2011. Vol. 21. P. 1794—1800.
20. Ramesh C., Adarsha H., Naveen N. A review on hot extrusion of Metal Matrix Composites (MMC's). *Int. J. Eng. Sci.* 2014. Vol. 1. P. 2319—6483.
21. Chadwick R. The hot extrusion of non-ferrous metals. *Metall. Rev.* 1959. Vol. 4 (1). P. 189—256.
22. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007.
Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Three-dimensional nanostructural metal materials. Production, structure and properties. Moscow: Akademkniga, 2007 (In Russ.).