

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКООДНОРОДНОЙ СУХОЙ СМЕСИ «АЛЮМИНИЕВЫЙ ПОРОШОК – ОДНОСТЕННЫЕ УНТ» В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2018

Н.И. Веткасов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

А.И. Капустин, заведующий лабораторией

В.В. Сапунов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: композиционный материал; алюминий; углеродные нанотрубки; механическое легирование; композиционные гранулы; нормализация шихты.

Аннотация: Рассмотрена проблема синтеза нанокompозитов на алюминиевых матрицах, армированных углеродными нанотрубками, с высокими физико-механическими характеристиками, в части достижения однородной дисперсии углеродных нанотрубок в алюминиевой матрице композита. Разработаны основы технологии приготовления и определены требования к параметрам так называемой нормализованной шихты (высокооднородной по объему сухой смеси «алюминиевый порошок – одностенные углеродные нанотрубки»), предназначенной для эффективного синтеза композиционных гранул механическим легированием.

В качестве исходных материалов использовали порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1, одностенные углеродные нанотрубки TUBALL и стеариновую кислоту в качестве агента регулирования процесса. Процессы нормализации и механического легирования проводили в механическом реакторе авторской конструкции. Полученные композиционные гранулы подвергали холодному, а затем горячему компактированию. Показана эффективность предложенного авторами нового подхода к осуществлению эффективного армирования алюминиевого матричного порошка нанотрубками. В основу такого подхода положено обеспечение эффективной дисперсии углеродных нанотрубок в легируемый матричный материал за счет введения в технологию синтеза композиционных гранул, представляющих собой полуфабрикат для получения композиционного материала с высокими физико-техническими характеристиками, специальной технологической операции – «нормализации» шихты.

Представлены данные о достигаемых прочностных параметрах полуфабрикатов алюмоматричных композитов, при изготовлении которых использовали нормализованную шихту. Показано, что применение разработанной технологии нормализации шихты обеспечивает повышение прочностных характеристик полуфабрикатов композиционных материалов не менее чем на 25 % по сравнению с технологией без применения нормализации. Полученные в ходе исследований результаты могут быть использованы при совершенствовании технологий получения алюмоматричных композитов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многостенные (МУНТ) и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) находят все большее применение в качестве армирующего материала в металломатричных композиционных материалах. Особый интерес вызывают нанокompозиты на основе алюминиевых матриц, широко востребованные в аэрокосмической и автомобильной промышленности [1–3].

Анализ результатов опубликованных работ [4–5], выполненных в области исследований и создания алюмоматричных композиционных материалов с применением УНТ, показывает, что ключевой проблемой синтеза нанокompозитов на алюминиевых матрицах, армированных УНТ, с высокими физико-механическими характеристиками является достижение однородной дисперсии УНТ в алюминиевой матрице композита.

По мнению ряда исследователей [6–8], эффективная дисперсия УНТ в порошке алюминиевой матрицы при успешной ее реализации в процессе синтеза композиционных гранул из составных порошков, а затем и готовых композитов с применением интенсивной механической деформации, в частности методом механического легирования, является основой достижения высоких физико-механических свойств композитов. Авторы этих работ справедливо утверждают, что кластеризация и агломерация УНТ являются критической технологической проблемой.

При этом как у упомянутых, так и у других исследователей [9–11] весь процесс получения композиционных гранул реализуется в режиме постоянной энергии деформирования (при одинаковом числе оборотов устройств легирования (атриторов, шаровых и планетарных мельниц). Авторы исследований варьировали размерами фракций матричного порошка [12], концентрацией вводимых УНТ [13], продолжительностью обработки [14], средой [15], агентами регулирования процесса, соотношения масс шихты и шаров [16] и пр.

Авторами настоящего исследования предложен иной подход к решению рассматриваемой задачи, заключающийся в том, что для получения однородной дисперсии УНТ в алюминиевой матрице композита предлагается ввести в технологию синтеза композиционных гранул специальную технологическую операцию нормализации шихты (смеси матричного порошка и УНТ) с пониженным уровнем энергетического воздействия по молярным тел на компоненты порошковой смеси, исключая возникновение холодной сварки.

Цель работы – получение эффективной технологии нормализации шихты в процессе синтеза композиционных гранул для алюмоматричных композитов механическим легированием алюминиевого порошка ПАД-1 одностенными углеродными нанотрубками TUBALL (ОУНТ).

МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных материалов использовали:

– порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1 (СТО22436138-006-2006) (таблица 1) с использованием фракции размером до 30 мкм;

– одностенные углеродные нанотрубки TUBALL 01RW01 (ТУ 2166-001-91735575-2014) со средним внешним диаметром не более 3 нм и полной удельной поверхностью не менее 300 м²/г.

Также использовали кислоту стеариновую (ГОСТ 6484-96), способствующую процессу нормализации шихты, в качестве поверхностно-активного реагента, регулирующего процесс.

Внешний вид ОУНТ TUBALL и гранул матричного порошка ПАД-1 в исходном состоянии показан на рис. 1.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения композиционных гранул в качестве базовой использовали шихту следующей рецептуры:

– матричный порошок ПАД-1 – 97,5 % масс.;

– одностенные углеродные нанотрубки TUBALL (ОУНТ) – 2 % масс.;

– стеариновая кислота – 0,5 % масс.

Нормализацию шихты и ее последующее легирование проводили в механическом реакторе оригинальной конструкции, которая включает два внутренних виброэлемента, закрепленных на единой горизонтальной оси, создающих вибросиловые воздействия на шаровые помольные тела в двух взаимно перпендикулярных направлениях с фазовым сдвигом 30° [17; 18].

Морфологию и размер частиц оценивали с помощью цифрового микроскопа Dino-Lite AM4112PT и оптического микроскопа «Альтами МЕТ 6Т». Твердость об-

разцов по Роквеллу (шкала HRB) измеряли на твердомере TP150M. Данный метод контроля выбран из тех соображений, что достоверная оценка твердости материала возможна при воздействии индентора на большой объем материала [19].

Холодное и горячее прессование выполняли на прессе ПБ6324Б с усилием до 1000 Н с применением разработанной и изготовленной авторами специальной оснастки и вспомогательного оборудования.

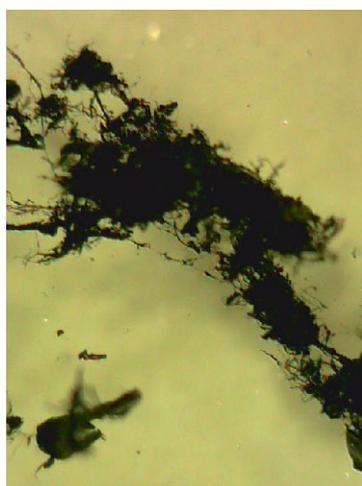
Исследования проводили по предложенному авторами новому подходу к реализации технологии синтеза композиционных гранул, заключающемуся во введении в технологию синтеза композиционных гранул специальной технологической операции предварительной подготовки порошковой смеси к механическому легированию.

На этой операции, названной процессом «нормализации» шихты, обеспечивается обработка исходной смеси матричного алюминиевого порошка и легирующих УНТ при малых уровнях энергии воздействия помольных тел на компоненты смеси в механическом реакторе [17; 18]. Энергия ограничена уровнем, при котором не происходит холодная сварка. Реализуется только процесс равномерного объемного распределения УНТ в матричном порошке с образованием нормализованной шихты с низкой насыпной плотностью. Нормализованная шихта представляет собой уплощенные частицы исходного алюминиевого порошка с развитой, имеющей многочисленные разрывы и складки поверхностью, с «захваченными» ею частицами агломератов УНТ.

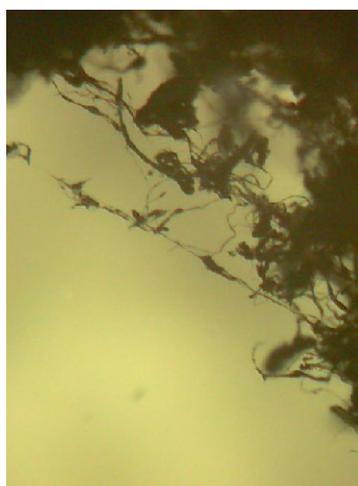
Заметим, что процесс нормализации предполагает уменьшение агломератов ОУНТ до определенных размеров, сопоставимых с размерами гранул исходного

Таблица 1. Физико-химические показатели исходного порошка алюминия ПАД-1 (СТО22436138-006-2006)

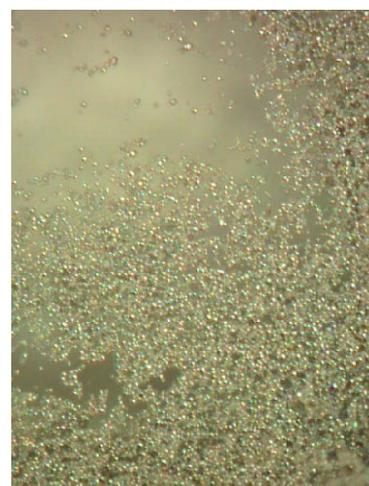
Гранулометрический состав, масс. %				Доля активного алюминия, масс. %	Доля примесей, масс. %	
0–10, мкм	10–20, мкм	20–30, мкм	>30, мкм		Fe	Si
3,96	28,40	29,98	37,66	99,2	0,1	0,1



а



б



в

Рис. 1. Внешний вид ОУНТ и гранул матричного порошка:
а – ОУНТ, увеличение 50X; б – ОУНТ, увеличение 200X; в – ПАД-1, увеличение 200X

порошка ПАД-1. Наличие агломератов является гарантией сохранения УНТ в исходном состоянии (отсутствия критических повреждений УНТ) на стадии нормализации шихты. При этом обязательным условием является достижение их преимущественно связанного состояния с деформированными в процессе нормализации частицами матричного алюминиевого порошка. Основная часть агломератов должна быть «захвачена» развитой поверхностью легируемого порошка алюминия. Достижение такого состояния при равномерном объемном распределении УНТ в алюминиевом порошке является, по мнению авторов, необходимым и достаточным условием равномерного распределения УНТ по объему композиционных гранул.

При правильно заданном уровне энергии нормализации шихты имеет место стабилизация ее насыпной плотности через достаточно короткое время. При этом увеличение продолжительности нормализации не ведет к изменению морфологии и насыпного веса смеси, наступает установившийся режим нормализации, что является признаком ее завершения.

После нормализации шихты синтез композиционных гранул в процессе механического легирования производится при энергетических воздействиях, кратно превышающих энергетические воздействия в процессе нормализации.

Базовую технологию нормализации исходной смеси ПАД-1 и ОУНТ, а затем ее последующее механическое легирование реализовывали с применением двухвibrаторного механического реактора упомянутой выше авторской конструкции при следующих параметрах:

- число оборотов вибратора при нормализации шихты – 200 об/мин (с применением реверса через каждые 10 мин);

- число оборотов вибратора при механическом легировании – 400 об/мин (с применением реверса через каждые 30 мин). При этом в ходе механического легирования выполнялся периодический поворот (по часовой, а затем против часовой стрелки) рабочей камеры вокруг оси через каждые 15 мин на угол 90°;

- мелющие тела – шары из стали ШХ15 диаметром 10 мм;

- массовое соотношение шаров и шихты – 55:1.

Обработку производили в среде аргона марки «Ч».

Варьировали продолжительностью процесса нормализации шихты на четырех уровнях: 40, 80, 120 и 160 мин.

В качестве критериев достаточной длительности процесса нормализации шихты были приняты:

- снижение насыпной плотности шихты до 0,3...0,4 г/см³ при исходной насыпной плотности ПАД-1, равной 1,08...1,1 г/см³;

- ограничение размера агломератов УНТ, который не должен превышать максимального размера исходного легируемого матричного порошка (30 мкм);

- переход процесса нормализации в установившийся режим, характеризуемый отсутствием изменения насыпной плотности шихты в течение не менее чем 20 мин.

Продолжительность процесса механического легирования составляла 180 мин. Критерием завершения процесса синтеза являлось достижение насыпной плотности композиционных гранул не ниже насыпной плотности исходного матричного порошка.

В процессе нормализации и после ее завершения регистрировали морфологию частиц, а также оценивали их состояние в части «захвата» агломератов нанотрубок, а после завершения механического легирования регистрировали морфологию и гранулометрический состав полученных композиционных гранул.

В качестве основного показателя эффективности введения в технологию синтеза композиционных материалов, армированных ОУНТ, процесса нормализации шихты приняли уровень прочностных характеристик материала, оцениваемый по достигаемому значению твердости в единицах HRB.

Образцы для измерения твердости получали компактированием композиционных гранул холодным прессованием при 20...25 °С либо в брикеты диаметром 21 мм и высотой 7 мм, с плотностью 2,45...2,47 г/см³, либо в брикеты диаметром 39,2 мм и высотой 12,5 мм, с плотностью 2,25...2,3 г/см³. Брикеты диаметром 39,2 мм подвергали горячему прессованию (горячей подпрессовке) при 520...560 °С с получением образцов с плотностью 2,60...2,64 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе выполнили серию последовательных самостоятельных процессов нормализации шихты и затем механического легирования полученных партий нормализованной шихты. После проведения процессов нормализации и механического легирования нормализованной шихты анализировали закономерности изменения насыпного веса (рис. 2), гранулометрического состава и морфологии композиционных гранул.

Процесс нормализации сопровождается снижением насыпной плотности шихты до установившегося значения 0,33...0,35 г/см³ (рис. 2 а), что свидетельствует о правильном определении примененного уровня низкоэнергетического воздействия, при котором исключается процесс холодной сварки, характеризующийся формированием композиционных гранул, сопровождающимся ростом их насыпного веса.

Из анализа морфологии частиц нормализованной шихты (рис. 3) следует, что цель операции достигнута: наблюдается захват агломератов ОУНТ расплюснутыми частицами матричного алюминия. Агломераты захватываются как периферией, так и поверхностью деформированных алюминиевых частиц, имеющих многочисленные разрывы и складки. При этом размеры агломератов, с высокой вероятностью состоящих из не подвергшихся разрушению исходных ОУНТ, не превышают исходный размер матричного ПАД-1 (до 30 мкм).

Таким образом, можно предположить, что в процессе нормализации действительно достигается однородное объемное бездефектное распределение ОУНТ в массиве шихты.

В процессе механического легирования нормализованной шихты формируются объемные композиционные гранулы: происходит их увеличение и уплотнение с одновременным увеличением насыпной плотности. Насыпной вес возрастает от установившегося минимального, достигнутого в результате нормализации шихты, до установившегося значения, близкого к насыпному весу исходного матричного порошка ПАД-1 (рис. 2 б). В выполненной серии экспериментов продолжительность механического легирования ограничивалась

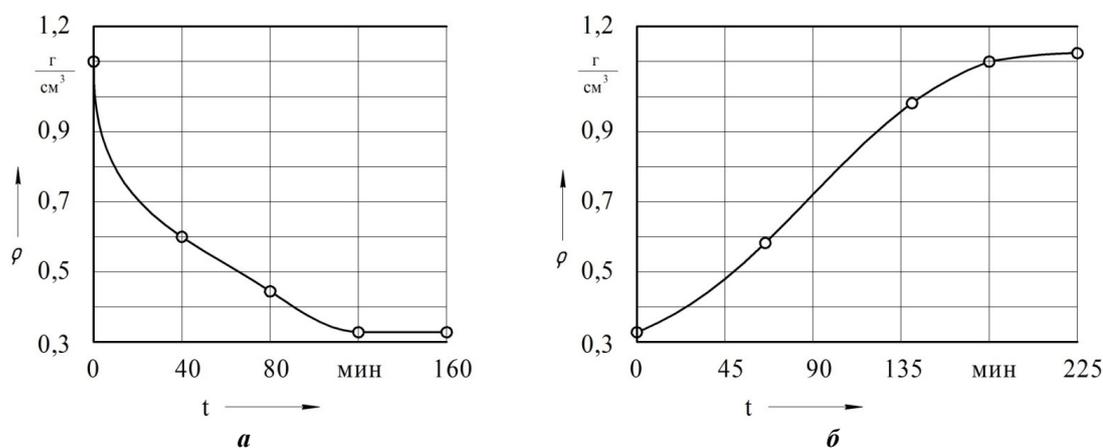


Рис. 2. Зависимость насыпной плотности шихты ρ от продолжительности процесса обработки t в механическом реакторе: а – этап нормализации шихты; б – этап механического легирования

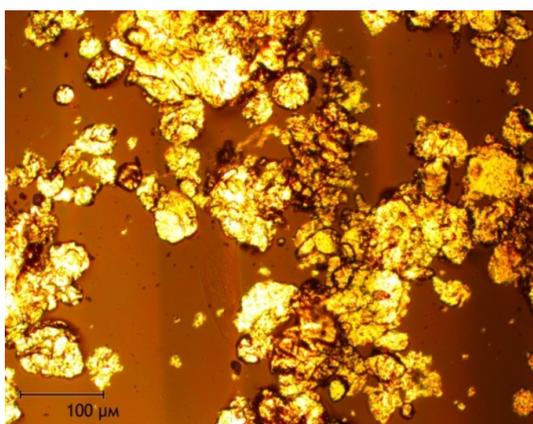


Рис. 3. Частицы шихты после процесса нормализации (разрешение 100 мкм)

временем, в течение которого достигалось увеличение насыпного веса до $1,08...1,12 \text{ г/см}^3$.

При анализе морфологии композиционных гранул, полученных после механического легирования (рис. 4), в части трансформации состояния сформированных в результате нормализации шихты агломератов ОУНТ, выявлено их исчезновение, что наиболее вероятно связано с поглощением их содержимого массивом гранул. Это подтверждается окрашиванием (изменением цвета) поверхности наблюдаемых гранул в выраженный темно-серый цвет (рис. 4 а, 5 а), контрастирующий с серебристым цветом чистого матричного алюминиевого порошка, подвергнутого нормализации шихты и механическому легированию на тех же режимах (рис. 5 б). Окрашивание указывает на присутствие ОУНТ непосредственно в поверхностном слое композиционных гранул, образованном поверхностями входящих в их состав более мелких гранул. Причем следует полагать, что это касается и внутренних поверхностей раздела между мелкими гранулами, из которых в процессе механического легирования в результате холодной сварки формируются наблюдаемые композиционные гранулы, что, в свою очередь, определяет высокую однородность распределения ОУНТ в массивах как композиционных гранул, так и готового композиционного материала.

Возможное окрашивание поверхности композиционных гранул углеродом, который мог образоваться в результате аморфотизации нанотрубок, проверено по методике [20]. Вариант окрашивания в результате образования на поверхности композиционных гранул свободного или слабо связанного с поверхностью матричного материала слоя УНТ оценен путем ультразвуковой обработки композиционных гранул с использованием ультразвукового диспергатора ИЛ 100-6/4 в среде изопропилового спирта, в котором при наличии свободных нанотрубок образуется их стойкая суспензия [21]. Свободных частиц аморфного углерода и УНТ не обнаружено. После упомянутых воздействий также не отмечено изменение интенсивности серого цвета композиционных гранул. Из этого следует, что окрашивание вызвано внедрением ОУНТ в матричный материал композиционных гранул.

Результаты экспериментальных исследований и контроля гранулометрического состава композиционных гранул, твердости компактированных образцов плотностью $2,45 \text{ г/см}^3$, полученных холодным прессованием, твердости компактированных образцов плотностью до $2,64 \text{ г/см}^3$, полученных горячим прессованием, по методу Роквелла по шкале HRV представлены в таблице 2.

На основании данных таблицы 2, принимая за базу для сравнения параметры серий А и Б, представляющих

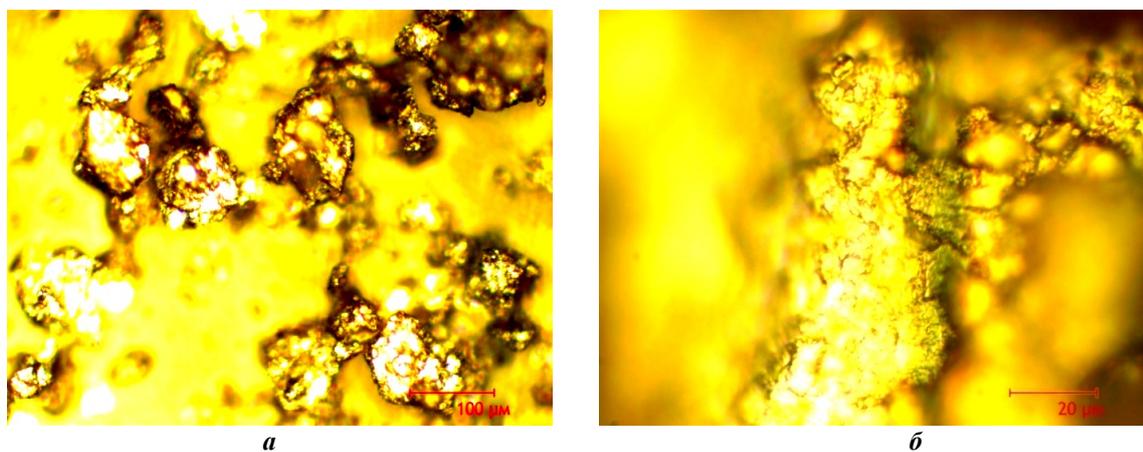


Рис. 4. Внешний вид композиционных гранул из нормализованной шихты после механического легирования: а – разрешение 100 мкм; б – разрешение 20 мкм

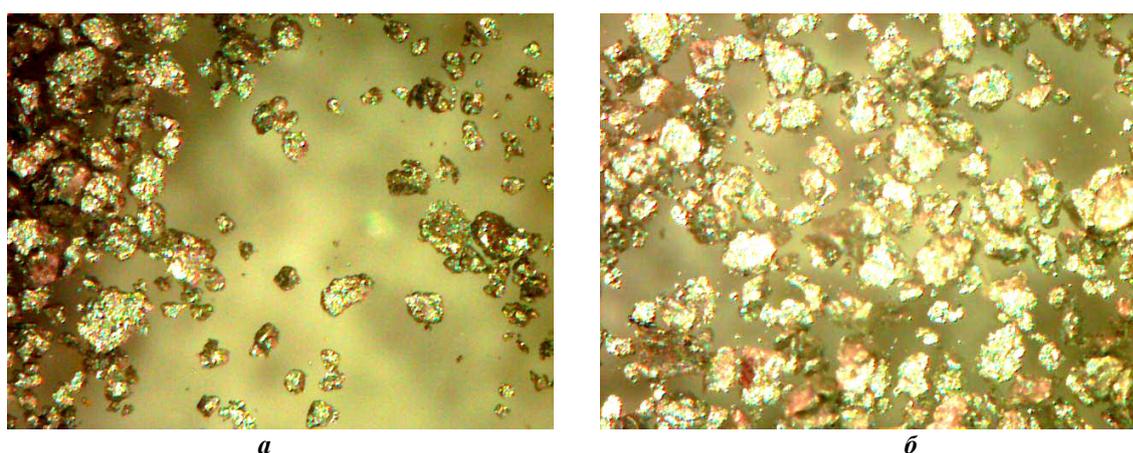


Рис. 5. Внешний вид гранул после механического легирования при увеличении 200X: а – композиционные гранулы с ОУНТ; б – гранулы чистого алюминиевого матричного порошка

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований

Серия опытов	Рецептура шихты	Характеристика процесса	Гранулометрический состав, % масс.				Твердость HRB
			0...63 мкм	63...140 мкм	140...700 мкм	>700 мкм	
А	99,5 % ПАД-1 0,5 % СК	МЛ без обработки в режиме НШ+ХП	–	9,1	80,9	10,0	<40
Б	99,5 % ПАД-1 0,5 % СК	МЛ после НШ+ХП	–	23,3	75,5	1,2	<40
В	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ без НШ+ХП	16,3	35,2	48,5	–	45...48
Г	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ после НШ+ХП	28,5	41,5	29,8	0,2	57...61
Д	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	ГП образцов из гранул серии Г при 530 °С до плотности 2,6 г/см ³	–	–	–	–	70...73
Е	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	ГП образцов из гранул серии Г при 550 °С до плотности 2,64 г/см ³	–	–	–	–	79,5...80,5

Примечание: МЛ – механическое легирование; ХП – холодное прессование; ГП – горячее прессование; СК – стеариновая кислота; НШ – нормализация шихты.

собой контрольные образцы из чистого матричного порошка, обработанные в режиме механического легирования без применения нормализации шихты (серия А) и с применением нормализации шихты (серия Б) в тех же режимах, в которых обрабатывалась серия образцов Г, можно констатировать следующее.

Применение нормализации шихты при получении контрольных образцов Б без введения ОУНТ приводит к существенному уменьшению размеров фракций гранул после механического легирования, при этом изменение твердости образцов не регистрируется.

Введение 2 % ОУНТ без применения нормализации шихты (серия В) дает дополнительное измельчение фракционного состава и обеспечивает некоторое упрочнение (твердость образцов серии В выше твердости контрольных образцов серий А и Б, деформационно упрочненных в результате механического легирования, в единицах HRB на 15...20 %).

Применение нормализации шихты (серии Г, Д и Е) сопровождается дальнейшим измельчением фракционного состава гранул и обеспечивает дополнительное упрочнение (твердость образцов этих серий после холодного прессования выше твердости деформационно упрочненных образцов серий А и Б в единицах HRB не менее чем на 50 %).

После горячего прессования (серии Д и Е) достигается твердость образцов, превышающая твердость деформационно упрочненных образцов серий А и Б не менее чем на 100 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана технология нормализации шихты, позволяющая решать задачу обеспечения однородного распределения УНТ в массиве композиционного материала на первой стадии подготовки шихты к механическому легированию. Сформулированы основные требования к операции нормализации и режиму ее реализации.

2. Показано, что применение разработанной технологии нормализации шихты обеспечивает повышение прочностных характеристик полуфабрикатов композиционных материалов не менее чем на 25 % по сравнению с технологией без применения нормализации.

3. Результаты работы могут быть использованы как основа для совершенствования технологий получения алюмоматричных композитов с высокими физико-механическими характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-43-732150 р_офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anantha Prasad M.G., Bhandekar N. Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Aluminum/Garnet/Carbon Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs) Fabricated by Chill Casting Method // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. № 3. P. 1–8.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
- Ostovan F., Matori K.A., Toozandehjani M., Oskoueian A., Yusoff H.M., Yunus R., Ariff A.M., Quah H.J., Lim W.F. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 166. P. 160–166.
- Бунаков Н.А., Голованов В.Н., Козлов Д.В., Потапов С.Н., Климов Е.С. Получение композитного материала из алюминия с углеродными нанотрубками методами порошковой металлургии // *Физико-математические методы и информационные технологии в естествознании, технике и гуманитарных науках: сборник материалов международного научного е-симпозиума*. Киров: МЦНИП, 2015. С. 25–37.
- Raviathul B.M., Srivastava V.C., Mukhopadhyay N.K. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling // *Materials & Design*. 2014. Vol. 64. P. 542–549.
- Ci L., Ryu Z., Jin P.N.Y., Rühle M. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. № 20. P. 5367–5375.
- Choi H., Shin J., Min B., Park J., Bae D. Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites // *Journal of Materials Research*. 2011. Vol. 24. № 8. P. 2610–2616.
- Yang C., Zong Y., Zheng Z., Shan D. Experimental and theoretical investigation on the compressive behavior of aluminum borate whisker reinforced 2024Al composites // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 96. P. 84–92.
- Hassan M.T.Z., Esawi A.M.K., Metwalli S. Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminum-carbon nanotube composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 607. P. 215–222.
- Yoo S.J., Han S.H., Kim W.J. Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes // *Scripta Materialia*. 2013. Vol. 68. № 9. P. 711–714.
- Wang L., Choi H., Myoung J.M., Lee W. Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminum powders for the preparation of carbon/metal composites // *Carbon*. 2009. Vol. 47. № 15. P. 3427–3433.
- Zhu X., Zhao Y.G., Wu M., Wang H.Y., Jiang Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling // *Materials*. 2016. Vol. 9. № 3. P. 3–18.
- Nayan N., Murty S.V.S.N., Sharma S.C., Kumar K.S., Sinha P.P. Calorimetric study on mechanically milled aluminum and multiwall carbon nanotube composites // *Materials Characterization*. 2011. Vol. 62. № 11. P. 1087–1093.
- Kukovecz A., Kanyo T., Konya Z., Kiricsi I. Long-time low-impact ball milling of multi-wall carbon nanotubes // *Carbon*. 2005. Vol. 43. № 5. P. 994 – 1000.
- Nam H.R., Kim Y.J., Yang S.S., Ahn J.H. Ball-Milling of Graphite and Multi-Wall Carbon Nanotubes // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2014. Vol. 14. № 12. P. 9103–9107.
- Narayanan S.S., Manickavasagam G., Moorthy S. Experimental Investigation of Aluminium alloy with MWCNT Composite to increase the technical Properties by Stir Casting Method // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015. Vol. 12. № 4 (II). P. 30–34.
- Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Формирование фазового состава, структурных параметров

- и физико-механических свойств композиционных гранул в процессе механического легирования алюминия аллотропными формами углерода // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12. С. 7–11.
18. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Исследование процесса механического легирования алюминия наноразмерными аллотропными модификаторами углерода // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 24–34.
 19. Лопатина Ю.А., Курганова Ю.А. Анализ измерения твердости композиционных материалов системы Al+SiC // III международная научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов»: сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 76–80.
 20. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Экспериментальное исследование процесса механического легирования алюминия техническим углеродом // Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире: сборник статей Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С. 18–21.
 21. Гигиберия В.А., Арьев И.А., Лебовка Н.И. Устойчивость суспензий многослойных углеродных нанотрубок в органических растворителях в присутствии Triton X-165 // Коллоидный журнал. 2012. Том 74. № 6. С. 696–701.
- REFERENCES**
1. Anantha Prasad M.G., Bandekar N. Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Aluminum/Garnet/Carbon Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs) Fabricated by Chill Casting Method. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 1–8.
 2. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 416 p.
 3. Ostovan F., Matori K.A., Toozandehjani M., Oskoueian A., Yusoff H.M., Yunus R., Ariff A.M., Quah H.J., Lim W.F. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, vol. 166, p. 160–166.
 4. Bunakov N.A., Golovanov V.N., Kozlov D.V., Potapov S.N., Klimov E.S. Obtaining a composite material of aluminum and carbon nanotubes by powder metallurgy method. *Sbornik materialov mezhdunarodnogo nauchnogo e-simpoziuma "Fiziko-matematicheskie metody i informatsionnye tekhnologii v estestvoznanii, tekhnike i gumanitarnykh naukakh*. Kirov, MTsNIP Publ., 2015, pp. 25–37.
 5. Raviathul B.M., Srivastava V.C., Mukhopadhyay N.K. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling. *Materials & Design*, 2014, vol. 64, pp. 542–549.
 6. Ci L., Ryu Z., Jin P.N.Y., Rühle M. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 20, pp. 5367–5375.
 7. Choi H., Shin J., Min B., Park J., Bae D. Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 24, no. 8, pp. 2610–2616.
 8. Yang C., Zong Y., Zheng Z., Shan D. Experimental and theoretical investigation on the compressive behavior of aluminum borate whisker reinforced 2024Al composites. *Materials Characterization*, 2014, vol. 96, pp. 84–92.
 9. Hassan M.T.Z., Esawi A.M.K., Metwalli S. Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminum-carbon nanotube composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 607, pp. 215–222.
 10. Yoo S.J., Han S.H., Kim W.J. Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, no. 9, pp. 711–714.
 11. Wang L., Choi H., Myoung J.M., Lee W. Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminum powders for the preparation of carbon/metal composites. *Carbon*, 2009, vol. 47, no. 15, pp. 3427–3433.
 12. Zhu X., Zhao Y.G., Wu M., Wang H.Y., Jiang Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 3–18.
 13. Nayan N., Murty S.V.S.N., Sharma S.C., Kumar K.S., Sinha P.P. Calorimetric study on mechanically milled aluminum and multiwall carbon nanotube composites. *Materials Characterization*, 2011, vol. 62, no. 11, pp. 1087–1093.
 14. Kukovec A., Kanyo T., Konya Z., Kiricsi I. Long-time low-impact ball milling of multi-wall carbon nanotubes. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 994–1000.
 15. Nam H.R., Kim Y.J., Yang S.S., Ahn J.H. Ball-Milling of Graphite and Multi-Wall Carbon Nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, vol. 14, no. 12, pp. 9103–9107.
 16. Narayanan S.S., Manickavasaham G., Moorthy S. Experimental Investigation of Aluminium alloy with MWCNT Composite to increase the technical Properties by Stir Casting Method. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, vol. 12, no. 4 (II), pp. 30–34.
 17. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. The formation of phase composition, structural parameters and physical-mechanical properties of composite granules in the process of mechanical alloying of aluminium allotropic forms of carbon. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 12, pp. 7–11.
 18. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. The study of the process of mechanical alloying of aluminum by nano-dimensional allotropic modifications of carbon. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 24–34.
 19. Lopatina Yu.A., Kurganova Yu.A. Analysis of the hardness measurement of composite materials of the Al + SiC system. *III mezhdunarodnaya nauchnaya shkola molodezhi "Materialovedenie i metallofizika legkikh splavov"*. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2014, pp. 76–80.
 20. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. Experimental study of the process of mechanical alloying of aluminum by technical carbon. *Sbornik statey*

Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya nauchnoy mysli v sovremennom mire". Ufa, AETERNA Publ., 2017, part 2, pp. 18–21.

21. Gigiberiya V.A., Ar'ev I.A., Lebovka N.I. The stability of suspensions of multiwalled carbon nanotubes in organic solvents in the presence of Triton X-165. *Colloid journal*, 2012, vol. 74, no. 6, pp. 663–667.

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE PROCESS OF PRELIMINARY FORMATION OF THE HIGH-HOMOGENEOUS DRY MIXTURE "ALUMINUM POWDER – SINGLE-WALL CNT" IN THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF THE ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES

© 2018

N.I. Vetkasov, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair "Mechanical Engineering"

A.I. Kapustin, Head of Laboratory

V.V. Sapunov, PhD (Engineering), assistant professor of Chair "Mechanical Engineering"

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: composite material; aluminum; carbon nanotubes; mechanical alloying; composite pellets; normalization of charge.

Abstract: The paper considers the problem of synthesis of nanocomposites based on the aluminum matrices reinforced with carbon nanotubes with the high physicomechanical properties, as related to the achievement of a homogeneous dispersion of carbon nanotubes in the aluminum matrix of a composite. The authors developed the principles of the technology of preparation and determined the requirements for the parameters of the so-called normalized charge (a highly homogeneous dry mixture "aluminum powder – single-wall carbon nanotubes") intended for the efficient synthesis of composite granules by the mechanical alloying.

Aluminum primary dispersed powder PAD-1 and the single-wall carbon nanotubes TUBALL were used as the raw materials, and the stearic acid was used as a process control agent. The processes of normalization and mechanical alloying were carried out in the mechanical reactor of the author's design. The derived composite pellets were exposed to cold and then to hot compaction. The paper shows the effectiveness of the new approach proposed by the authors to the implementation of effective reinforcement of the aluminum matrix powder by the nanotubes. This approach is based on the provision of effective dispersion of carbon nanotubes into alloyed matrix material by introducing the special technological operation – "normalization" of charge – in the technology of synthesis of composite granules, which are the semi-finished material for the production of a composite material with the high physical and technical characteristics.

The paper presents data on the strength parameters of the semi-finished aluminum matrix composites, which were produced using a normalized charge. It is shown that the application of the developed technology for charge normalization provides the increase in the strength characteristics of semi-finished composite materials by at least 25 % compared with the technologies without the application of normalization. The results obtained during the research can be used when improving the technologies of production of the aluminum matrix composites.