

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ С ЗАДАННЫМ РАЗМЕРОМ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ЧАСТИЦ

Чернышов Е.А., Мыльников В.В., Романов А.Д., Романова Е.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 600950 г. Нижний Новгород, ул. Минина д 24, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

В настоящее время традиционные материалы уже не в полной мере могут удовлетворить новые запросы конструкторов. Требования современной техники к повышению прочности и жесткости конструкционных материалов при одновременном снижении их плотности привели к созданию и применению нового класса материалов – композиционных с металлической матрицей. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы выгодно отличаются от волокнистых и слоистых изотропией своих свойств, универсальностью и сравнительной простотой технологии изготовления, в связи с чем нашли широкое применение в машиностроении, автомобильном и авиационном двигателестроении в качестве поршневых и конструкционных материалов для изготовления высоконагруженных деталей (обшивки лонжеронов, панелей и др.) и двигателей (лопаток компрессоров и турбин и др.), сопловых блоков; в автомобилестроении – для облегчения кузовов, рессор, рам; в промышленном и гражданском строительстве и т.д. В статье представлена история развития и современное состояние различных технологий получения дисперсно – упрочненных материалов. Приведены их свойства, особенности формирования структуры, преимущественная область применения. Кратко изложены особенности разрабатываемой технологии получения дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия и результаты экспериментов.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненный материал, композитный материал, алюминий, корунд, упрочняющая фаза, технология, свойства, структура.

DEVELOPMENT OF A METHOD OF RECEIVING CAST MULTICOMPONENT SYSTEMS WITH A GIVEN SIZE AND DISTRIBUTION OF THE NONMETALLIC STRENGTHENING PARTICLES

Chernyshov E.A., Mylnikov V. V., Romanov A.D., Romanova E.A.

The Nizhny Novgorod state technical university of R. E. Alekseev, 603950, Nizhny Novgorod, Minin st. 24, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

Now traditional materials already not fully can satisfy new inquiries of designers. Requirements of modern equipment to increase of durability and rigidity of constructional materials at simultaneous decrease in their density led to creation and application of a new class of materials – composite with a metal matrix. The disperse strengthened composite materials favourably differ from fibrous and layered in an isotropy of the properties, universality and comparative simplicity of manufacturing techniques in this connection found broad application in mechanical engineering, automobile and aviation engine-building as piston and constructional materials for production of the high-loaded details (a covering of longerons, panels, etc.) and engines (shovels of compressors and turbines, etc.), nozzle blocks; in automotive industry – for simplification of bodies, springs, frames; in industrial and civil engineering, etc. The history of development and current state of various technologies of receiving dispersno – the strengthened materials is presented in article. Their properties, features of formation of structure, a primary scope are given. Features of the developed technology of receiving the disperse strengthened composite material on the basis of aluminum and results of experiments are briefly stated

Keywords: the disperse strengthened material, composite material, aluminum, corundum, the strengthening phase, technology, properties, structure.

Создание многокомпонентных систем на основе алюминиевых сплавов армированных неметаллическими частицами приводит к повышению в 2 – 3 раза служебных характеристик изделия [2]. Армирующие частицы (15 – 70%) присутствуют в матрице в виде отдельных комплексов и играют роль легирующих добавок, существенно повышающих механические

(предел прочности, твердости) и эксплуатационные (износостойкость, антифрикционность) свойства по сравнению с традиционными Al-сплавами. У композиционных материалов с металлической матрицей достигается повышение предела прочности на 50 – 100%, в 2 – 3 раза увеличивается модуль упругости и коэффициент жесткости, в несколько раз снижается склонность к трещинообразованию и повышается надежность деталей и узлов конструкций. Кроме того повышается жаропрочность, что объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесса рекристаллизации. Применение композиционных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов [2]. Обзор современного состояния ДУКМ за рубежом и в России представлен в работах [3, 4].

Дисперсно-упрочненными композиционными материалами (ДУКМ) принято называть материалы, упрочнителями в которых являются равномерно распределенные на заданном расстоянии одна от другой частицы, не взаимодействующие активно с металлической матрицей, искусственно вводимые в сплавы на одной из стадий их получения. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов и других тугоплавких соединений. Из существующих твердофазных и жидкофазных методов получения ДУКМ наибольшее распространение получили жидкофазные, которые подразделяются на три основных вида:

- ex-situ или экзогенное армирование
- in-situ или эндогенное армирование
- комбинированные способы.

Наряду с жидкофазными способам успешно применяются специальные способы обработки шихтовых материалов в системе «твердое-жидкое-твердое», разработанные применительно к традиционным металлургическим и литейным процессам. К твердофазным способам также можно отнести механоактивацию исходных порошков, деформационную обработку алюмоматричных шихтовых материалов [1, 5]

Наиболее применимы для получения фасонных изделий литейными способами следующие методы:

- **замешивание**, позволяет получать изделия, армированные до 30 % по объему частицами размером 5-100 мкм;
- **пропитка**, позволяет получать изделия, армированные до 70 % по объему, однако при этом необходимо предварительно изготовить каркас из материала армирующего наполнителя;
- **in-situ**, для формирования в матричном расплаве фаз требуемого состава, концентрации и размеров необходимо создавать особые химические и термодинамические условия.

В отличие от волокнистых композиционных материалов в дисперсно-упрочненных композиционных материалах металлическая матрица является основным элементом несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций.

Армирующие частицы присутствуют в матрице в виде отдельных самостоятельных комплексов и играют роль легирующих добавок, обеспечивающих существенное повышение механических или эксплуатационных свойств по сравнению с традиционными сплавами. В затвердевшем композите керамические частицы работают как барьеры при движении дислокаций по матрице, затрудняя их движение. Частицы дисперсной фазы действуют как препятствия движению дислокаций в кристаллической решетке и блокируют процессы скольжения в матрице. При этом расстояние движения дислокаций сокращается при увеличении числа этих частиц. Обычно модуль сдвига частиц более чем в 2 раза больше модуля сдвига матрицы. Дислокации не перерезают и не деформируют частицы, а обгибают выделения с увеличением уровня напряжения.

ДУКМ получают различными способами: выделением частиц из пересыщенного твердого раствора (дисперсионно-твердеющие сплавы), методом порошковой металлургии, в том числе механическим легированием, методами внутреннего окисления и азотирования и др.

На первом месте по объему применения находятся алюмоматричные композиционные материалы. Существуют различные технологии насыщения упрочняющими фазами композиционных материалов, например, упрочнение алюминиевой матрицы собственными оксидами (Al_2O_3) или карбидами (Al_4C_3), смешением оксидов и другой упрочняющей фазы (например, $TiC-Al_2O_3-Al$) или алюминиды (например, $Fe_3Al-TiC$). Смеси порошков получают механическим или химическим смешиванием, например, введением в перегретый выше температуры плавления основной металл, поверхностным или внутренним окислением, разложением смеси солей, водородным восстановлением или химическим осаждением из растворов.

В настоящее время особое внимание уделяется получению литых алюмоматричных композиционных сплавов вводом мелкодисперсных тугоплавких добавок непосредственно при литье (при заливке), что существенно увеличивает их количество в единице объема матричного расплава, тем самым увеличивая число центров кристаллизации при охлаждении расплава. При этом изучение микроструктуры полученных материалов показало, что размер критического зародыша больше размера наночастиц (агломератов) и они не являются центрами кристаллизации, а захватываются зародышем в процессе кристаллизации [6].

Пионерами промышленного освоения ДУКМ, армированных дисперсными частицами SiC и Al_2O_3 , являются зарубежные компании DURALCAN, ALCAN и ALCOA. Однако

объемы промышленного использования ДУКМ пока не адекватны их технико-эксплуатационным возможностям.

Актуальность разработок технологий получения изделий из алюминиевых ДУКМ в автомобилестроении подтверждаются, например, их использованием для изготовления поршней дизельных двигателей (Toyota), цилиндрических вкладышей (Honda Prelude), ведущего вала (General Motors), дисков заднего тормоза (Plymouth Prowler, Lotus Elise, and Volkswagen Lupo). Однако высокая стоимость исходных материалов (например, стоимость частиц SiC составляет 4,0-4,4 \$/кг; коротких волокон Al_2O_3 – 15-22 \$/кг) также является существенным сдерживающим фактором для широкого внедрения литых изделий из КМ. Для дальнейшего увеличения доли ДУКМ и снижения себестоимости их производства за рубежом создана специальная программа сотрудничества по разработке материалов и технологий их получения, позволяющим снизить массу автомобиля - Automotive Lightweighting Materials Program [7].

Механические свойства ДУКМ на основе алюминиевых сплавов, основы и армирующих материалов приведены в табл.1.

Таблица 1

Свойства армирующих и матричных материалов и сплавов [8]

Материал	Плотность, г/см ³	Прочность при растяжении, кгс/мм ²	Модуль Юнга, $E \times 10^{-3}$, кгс/мм ²
Al термообработанный	2,7	32	7,0
Al отожженный	2,7	13	7,0
Al_2O_3 (поликристалл)	3,14	210	175
Сталь	7,74	420	203
Al_2O_3 (усы)	3,96	2100	434

Одной из технологий, развивающейся в настоящее время, является «метод внутреннего окисления», который обладая такими преимуществами, как получение равномерно распределенной устойчивой дисперсной фазы на готовых изделиях. Однако поскольку скорость внутреннего окисления уменьшается с увеличением глубины проникновения кислорода и, следовательно, в том же направлении происходит укрупнение образующихся окислов, поэтому метод внутреннего окисления эффективен для изделий или заготовок с небольшой толщиной.

Кроме того актуален вопрос выбора материала для баллистической защиты техники, где большие площади бронирования с использованием керамических материалов значительно увеличивают конечную стоимость изделия. Так, например, броневладелец «Ocelot/Foxhound» английской фирмы «General Dynamics Force Protection Europe» за счет использования новейших материалов стал стоить 1,3 млн. долл. США, тогда как его аналоги

со стальной защитой того же уровня стоят не более 0,3 млн. долл. Однако при этом масса стальной брони значительно выше.

Для снижения стоимости изготовления ДУКМ в НГТУ им. Р.Е. Алексева разрабатывается принципиально отличная технология получения дисперсно-упроченных композиционных материалов на основе алюминия, которая основана на процессе выгорания расплава алюминия при взаимодействии с кислородом или кислород – азотной смесью. В целом данный процесс основан на следующих технологиях: кислородно-конвертерный процесс, разливка алюминиевых сплавов в атмосфере кислорода и создание воздухонезависимой энергетической установки на основе высокометаллизированного топлива [9].

Отличием предложенной работы является меньшая стоимость исходных компонентов, а также упрощенная конструкция установки получения керамической фазы. Снижение стоимости исходных материалов происходит за счет отказа от порошкообразных компонентов и применение расплава, что практически на порядок дешевле. Кроме того аппаратная часть, блок продувки также значительно дешевле установок спекания, самораспространяющегося синтеза или механического легирования.

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов по созданию дисперсно-упроченного материала был спроектирован и изготовлен стенд для получения и разливки сплава заданного состава. В ходе экспериментальных работ в качестве матричного материала использовался алюминий марки А6 (99,6 Al; примеси, в основном Fe 0,25 % и Si 0,18%) для исключения влияния легирующих добавок и изучения упрочнения композита только за счет частиц упрочняющей фазы.

Изучение структурно-фазового состояния полученного материала проводили с использованием методов оптической металлографии (KEYENCE VHX-1000) и рентгеноструктурного анализа.

В результате металлографических и рентгеноструктурных исследований установлено, что матрицей полученного металлокерамического материала является алюминий, основные фазы внедрения – оксид алюминия, нитрид алюминия. Полнота протекания реакции окисления или нитрования регулируется по времени процесса и вариации конструкции блока продувки, размер частиц - за счет изменения конструкции блока продувки, а также условий кристаллизации [10]. Это позволяет в значительной степени изменять механические свойства получаемого изделия от «мягкого», матрицы с отдельными включениями керамики, до монолитного керамического материала.

Анализ микроструктур, приведенный на рис. 1-4, показывает практически равномерное распределение упрочняющей керамической фазы в металле. Причем преобладающая форма упрочняющего элемента глобулярная.

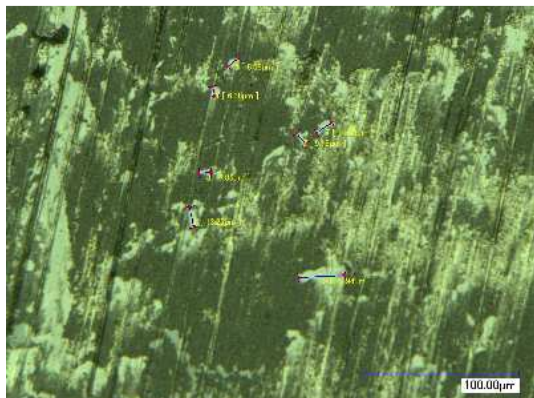


Рис. 1. Образец 1. Средний размер частиц 12 μm
Увеличение 1000x

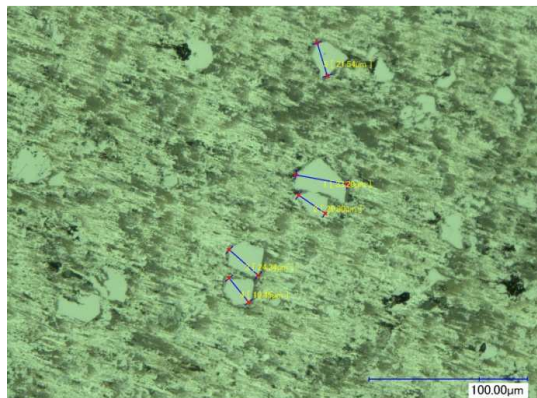


Рис. 2. Образец 2. Средний размер частиц 39 μm
Увеличение 300x

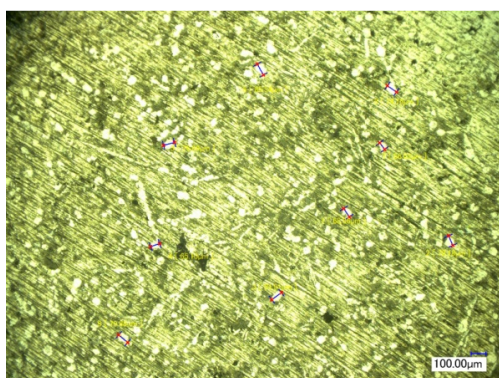


Рис. 3. Образец 3. Средний размер частиц 54 μm
Увеличение 100x

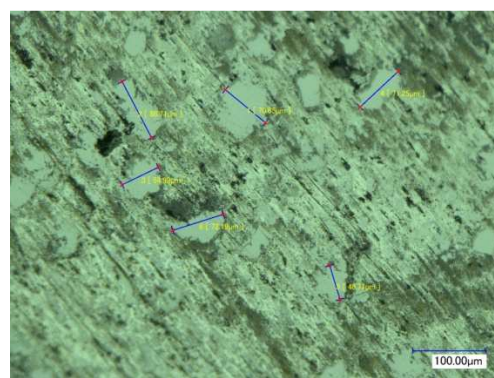


Рис. 4. Образец 4. Средний размер частиц 63 μm
Увеличение 500x

При этом твердость полученного материала в отожженном состоянии при испытании по Бринеллю составляет порядка 25-28 НВ, но при этом микротвердость керамических элементов включений превышает 70 НРС, что значительно увеличивает механическую прочность и стойкость к истиранию.

Выводы

Анализ существующих способов получения литых алюминиевых композиционных сплавов показывает, что традиционные технологии, помимо таких недостатков, как энергоемкость, сложность и длительность, зачастую наносят экологическую вредность. Разработка и внедрение предлагаемой технологии позволит значительно снизить сложность и стоимость получения дисперсно-упрочненного материала.

Список литературы

1. Никитин К.В., Никитин В.И., Амосов А.П. Литые Al-композиты, амированные и модифицированные нано-размерными неметаллическими частицами // *Металлургия машиностроения*. – 2013. - №4. с. 36 – 41
2. *Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего.* / Сост. А.Р.Луц, И.А. Галочкина. – Самара, 2013. – 82 с.
3. Косников Г.А., Баранов В.А., Петрович С.Ю., Калмыков А.В. Литейные наноструктурные композиционные алюмоматричные сплавы // *Литейное производство*. – 2012. №2.
4. Семенов Б.И. Освоение композитов – путь к новому уровню материалов и отливок // *Литейное производство*. – 2000. - № 8. – с. 6-9
5. Никитин В.И., Никитин К.В. *Наследственность в литых сплавах.* – М.: Машиностроение, 2005 – 476 с.
6. Анисимов О. В. *Технология получения композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных дисперсными наночастицами ZrO₂ и SiC в поле центробежных сил центрифуги.* Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2012
7. LAMP | Lightweight Automotive Materials Program [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://lamp.ncms.org>.
8. Кербер М.Л. Композиционные материалы. // *Соросовский образовательный журнал*. №5, 1989. С. 33 - 39
9. Чернышов Е.А., Романов А.Д. *Высокометаллизированное топливо на основе алюминия и его применение* // *Технические науки - от теории к практике*. - 2013. - № 24. - С. 69-73.
10. Чернышов Е.А. *Формирование стальных отливок в условиях внешнего и комплексного воздействия монография* / Е. А. Чернышов;. Нижний Новгород, 2007.

Рецензенты:

Лоскутов А.Б., д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Гущин В.Н., д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.