

потребителей путем снижения давления на выходе из газораспределительной станции. Однако, потребление газа городом неравномерно по дням недели в течение месяца. В будние дни, особенно зимнего периода года, отбор газа потребителями превышает суточную норму газопотребления, а в выходные дни и ночные часы потребление сокращается. Накопленный за такой период газ в трубном резервуаре будет поступать к потребителю.

Таким образом, трубные резервуары резервного газоснабжения способны обеспечить регулирование режима работы газовых сетей без нарушения установленного лимита газопотребления.

Устройство трубных резервуаров позволит

также решить вопрос резервного топливоснабжения объектов коммунально-бытового назначения, а так же котельных, газоиспользующее оборудование которых конструктивно не приспособлено к работе на других видах топлива. В трубных резервуарах за счет накопления газа за период низкого его отбора потребителями возможно создать резервные запасы газа для обеспечения бесперебойной работы газоиспользующих установок объектов, у которых отключение газа или снижение его давления вызовет нарушение технологического процесса и повлечет за собой остановку оборудования или материальный ущерб вследствие порчи или недоотпуска продукции.

#### *Список использованных источников*

1. Дядичкин, А.Ф. Как создать резервный запас газа для обеспечения надежности снабжения им потребителей / А.Ф. Дядичкин // Промышленная безопасность: журнал. – 2007. – № 5.

УДК 539.2: 658.562

## **ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Алексеева Ю.С., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г., Калашиников И.Е.*

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

*Витязь П.А., Хейфец М.Л.*

*Президиум НАН Беларуси, Минск*

*Сенють В.Т.*

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск*

**Введение.** Градиентные композиционные материалы (ГКМ) отличаются от традиционных изотропных КМ наличием пространственно неоднородных структур, благодаря которым они приобретают новые свойства и способны выпол-

нять новые функции. Поиск и разработка новых технологических процессов синтеза ГКМ для моделирования их строения, определяемого параметрами нагружения изделия, представляют собой актуальную задачу при проектировании и

изготовлении конструкций, работающих в экстремальных условиях [1, 2].

ГКМ изготавливают чаще всего методами порошковой металлургии, спеканием градиентных порошковых смесей или инфильтрацией специально собранных порошковых каркасов переменного состава. Изготовление анизотропных структур центробежным литьем известно давно, однако возможности получения заданного молекулярного дизайна в дисперсно наполненных КМ изучены слабо, а влияние градиента распределения наполнителя на работоспособность литых ГКМ осталось практически неизученным [3–5].

Цель работы – апробировать центробежное литье для получения ГКМ на базе алюминиевых сплавов армированием керамическими частицами различной природы и состава, а поверхностные слои с повышенной концентрацией армирующей фазы сформировать за счет направленного перемещения дисперсных частиц в жидкой металлической суспензии.

Анализ движения армирующих частиц в центробежном поле. Перемещение дисперсных частиц в поле действия центробежных сил определяется их плотностью. Твердые дисперсные частицы, имеющие плотность большую, чем матричный алюминиевый сплав, перемещаются к наружной стенке формы (изложницы), менее плотные – к оси вращения, на свободную поверхность (во внутреннюю часть отливки).

Центробежная сила, действующая на частицу, описывается уравнением:

$$P_{ц} = \omega^2 r V (\rho_{ч} - \rho_{м}),$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения,  $\text{сек}^{-1}$ ;  $r$  – радиус центра сил инерции частицы и радиус центра сил инерции вытесненного объема жидкого металла, в случае, когда тело имеет однородную плотность, см;  $V$  – объем дисперсной частицы,  $\text{см}^3$ ;  $\rho_{ч}$  и  $\rho_{м}$  – соответственно плотность частицы и жидкого металла,  $\text{г/см}^3$ .

Из уравнения видно что силы, действующие на частицу, погруженную во вращающийся расплав, возрастают в  $\omega^2 r/g$  раз (где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{см/с}^2$ ). Видно также, что сила, действующая на частицы при центробежном литье, увеличивается с увеличением плотности частиц, помещенных в расплав.

В табл. 1 приведены значения  $\rho_{ч} - \rho_{м}$  для алюминиевого сплава АК12 (удельный вес  $\rho_{м} = 2,67 \text{ г/см}^3$ ) и различных частиц, используемых для армирования КМ.

Таблица 1

Значения  $\rho_{ч} - \rho_{м}$  для различных армирующих частиц в алюминиевом расплаве

Дисперсные частицы	$\rho_{ч}, \text{г/см}^3$	$(\rho_{ч} - \rho_{м}), \text{г/см}^3$
SiC	3,2	0,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,99	1,33
Графит	1,7	-0,96
SiO <sub>2</sub>	2,65	-0,01
B <sub>4</sub> C	2,5	-0,16
Базальт	2,75	0,09

Из табл. 1 следует, что подъемная сила частиц графита, SiO<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C имеет отрицательный знак, что объясняет их всплывание и перемещение к свободной внутренней поверхности при вращении жидкого расплава. Основная часть армирующих частиц, находящихся во вращающемся расплаве, согласно табл. 1, будет стремиться к перемещению в сторону стенок изложницы. Известно также, что если инородное включение в момент заливки жидкого металла касается стенки формы, то оно прижимается жидким металлом к ней и не всплывает, несмотря на меньшую плотность. Необходимо также учитывать транспортные функции частиц разной плотности. Это в совокупности, создает возможности для синтезирования ГКМ методами литья с различной степенью армирования.

Методика исследований и аппаратура. Технологией центробежного литья были изготовлены образцы градиентных КМ различных составов (табл. 2).

Образцы ГКМ имели форму втулок с наружным диаметром 90 мм, внутренним диаметром 60 мм, высотой 60 мм. Цилиндры разрезали на сектора по образующей и анализировали их боковую поверхность с наружной и внутренней сторон.

Таблица 2

Составы образцов, изготовленных методом центробежного литья

№№ составов	Композиции
1	AK12-10%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (средний размер частиц $\bar{A}_{ср} = 40\text{мкм}$ )
2	AK12+10%C ( $\bar{A}_{ср} = 200\text{--}400\text{мкм}$ )
3	AK12+2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +3%C
4	AK12+10%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +2%C
5	AK12+10%B <sub>4</sub> C ( $\bar{A} \approx 60\text{мкм}$ )
6	AK12 + 5% базальта (короткие волокна $\bar{A}_{ср} = 12 \text{ мкм}$ , длина $\bar{L} \approx 3 \text{ мм}$ )

Режим центробежного литья был одинаков для всех образцов: температура нагрева оснастки  $T = 210 \pm 10$  °С, расплава  $T = 750 \pm 10$  °С, скорость вращения  $n = 1200$  об/мин, длительность обработки 3 мин.

Изучались структуры и распределение частиц в градиентных слоях на трех уровнях по высоте отливок. Исследования проводили на микроскопе Leica. Измерения твердости образцов производились при помощи твердомера ультразвукового МЕТ – У1 (ТУ 4271-001-18606393-00).

**Результаты и обсуждение.** Структура градиентных композиционных материалов показана на рис. 1, а распределение частиц в градиентных слоях на трех уровнях по высоте отливок – на рис. 2. Выявлено, что ширина градиентных слоев и распределение частиц в них меняются с изменением удельного веса частиц, а так же по высоте втулок.

В образце состава 1 в верхней части втулки содержание частиц  $Al_2O_3$  заметно меньше, чем в центральной и нижней части образца.

В образце состава 2 градиентный слой не обнаружен. В верхней части втулки наблюдается возрастание объемной доли графита, а в нижней части ее снижение. Это можно объяснить, во-первых, величиной и объемным содержанием частиц, а также тем, что плотность частиц графита меньше, чем алюминия, что влечет за собой снижение центробежной силы.

Для полиармированных образцов состава 3 и 4, градиентный слой формируется более заметно в образце состава 4, содержание частиц  $Al_2O_3$  в котором в 5 раз больше. Распределение частиц по высоте примерно одинаково, всплыванию графита препятствуют частицы  $Al_2O_3$ .

В образце состава 5, армированном частицами  $V_4C$ , градиентный слой обнаружен и у внутренней стенки втулки, что естественно, так как значение  $\gamma_c - \gamma_m$  для этих частиц (табл. 1) отрица-

тельно, а также, вероятно, в результате завершения кристаллизации композиционного расплава после прекращения вращения формы.

В образце состава 6, армированном базальтом, градиентный слой ярко выражен в верхней и средней части втулки, в нижней же ее части градиентный слой практически не наблюдается.

В результате исследований установлено, что введение относительно мягких графитовых частиц в матрицу АК12 (образец состава 2) не повышает твердости КМ по сравнению с исходной матрицей.

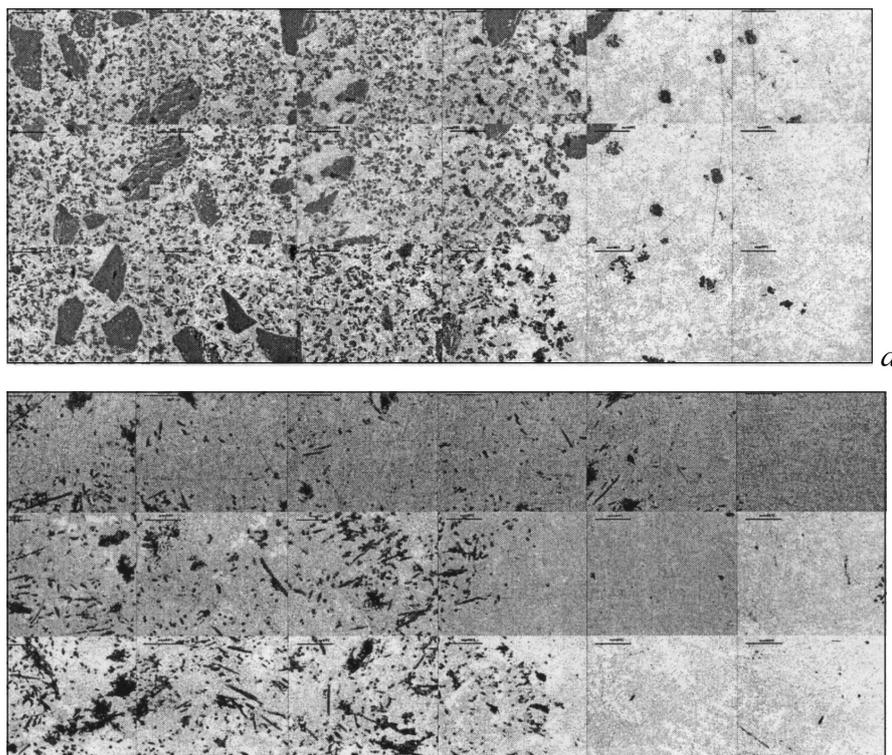


Рис. 1. Панорамный вид микроструктуры образцов (x 500)  
а) АК12 + 10% $Al_2O_3$  + 2%С; б) АК12 + 5% базальта

Введение базальтовых волокон (образец состава б) повышает твердость в поверхностном слое от 362 у.е. до 433 у.е.

Наиболее высокую твердость в поверхностных слоях имеют образцы (составы 1, 3 и 4), армированные частицами  $Al_2O_3$  (430 – 464 у.е.).

#### Заключение

Показана возможность и перспективность получения градиентного слоя у дисперсно армированных алюмоматричных композиционных материалов методом центробежного литья.

Выявлена, выполняемая легирующими частицами, транспортная функция при изготовлении КМ методом центробежного литья, заключающая-

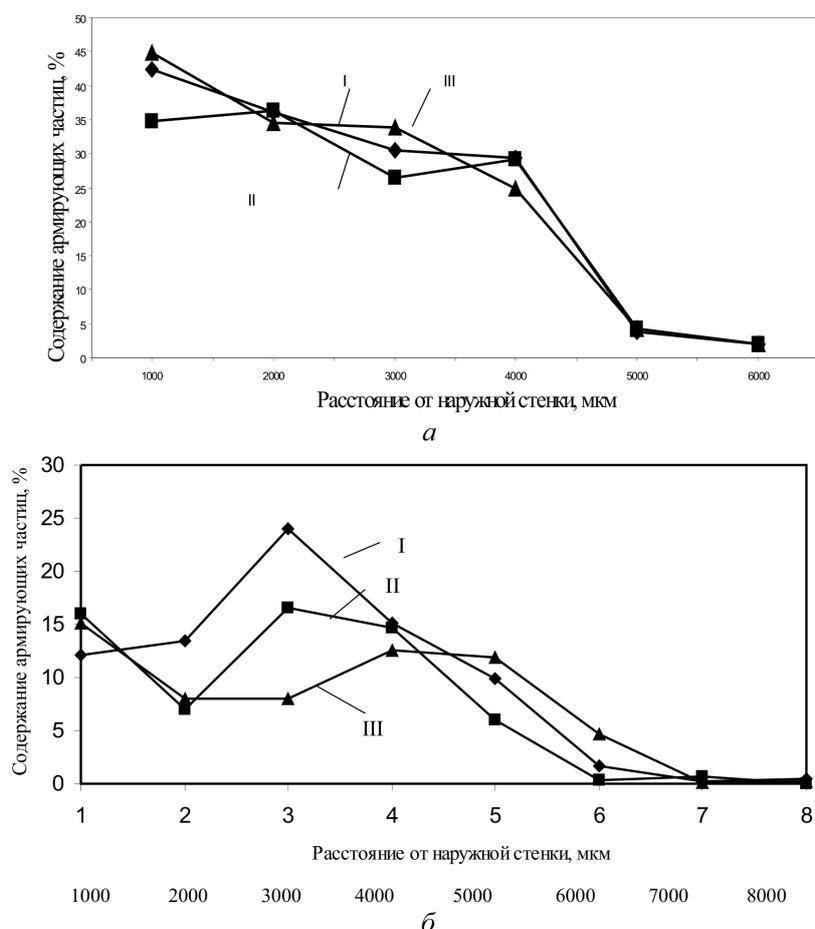


Рис. 2. Распределение армирующих частиц в образцах:  
 а) АК12 + 10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2%С; б) АК12 + 5% базальта;  
 I, II, III – верх, середина, нижняя часть втулки соответственно

яся в том, что частицы с большей плотностью (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) увлекают за собой к внешней стенке изложницы менее плотные частицы (графита).

Установлено, что методом центробежного литья можно изготавливать градиентные КМ с твердым поверхностным слоем, обладающим повышенной износостойкостью.

Исследования частично поддержаны белорусско-российским грантом БРФФИ-РФФИ по проекту Т14Р-198.

**Список использованных источников**

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева.– Минск: Бел. наука, 2011.- 283с.
2. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. - М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
3. Гусев С.С., Лобков Д.Н., Казачков С.С.. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью // Материаловедение, 1999, №5, С. 50.
4. Kevorkijan V. Functionally graded aluminum–matrix composites // American ceramic Society Bulletin, 2003, V. 82, Is. 2, P. 60.
5. Анисимов О.В., Штанкин Ю.В. Создание металлокомпозитов на основе алюминия путем кристаллизации жидкого металла в поле центрифуг // Перспективные материалы, 2010, № 2, С. 5.