

- in Al-Fe Hypereutectic Alloy Crystallization / L. Li, Y. Zhang, C. Esling et. al. // Dongbei Daxue Xuebao. Ziran Kexue Ban=J. Northeast. Univ. Natur. Sci. – 2010. – Vol. 31, № 9. – P. 1278-1282.
16. Живодеров В. М., Ананченко Т. О. Повышение структурной и химической однородности сплава АЛ 4 // Литейн. пр-во. – 1986. – № 5. – С. 7-8.
17. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
18. Середенко О. В. Розподіл міді у сплаві Al-3,5 % Cu при накладанні постійного магнітного поля на розплав, що твердне // Металознавство та обробка металів. – 2012. – № 2. – С. 50 – 53.
19. He J., Wang Q., Wang C., Liu T, Pang X. Crystal Growth and Microstructure Evolution Processes of Metallic Materials under High Magnetic Field Conditions // Proc. 5 th Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. – Sendai: Japan, ISIJ, 2006. – P. 15-20.
20. Ban C., Ba Q., Cui J., Zeng C. Effect of Magnetic Field on Microstructure of Third Aluminum Alloys during Crystallization // J. Northeast Univ. Natur. Sci. – 2002. – V. 23, № 8. – P. 779 – 782.

Поступила 29.01.2013

УДК 621.743.45:669.719:62-492.3

**А. С. Затуловский, В. А. Лакеев, Е. А. Каранда,  
Е. В. Миронова, В. А. Щерецкий**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ЛИТЫЕ АЛЮМОМАТРИЧНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АРМИРОВАННЫЕ СТАЛЬНЫМИ ГРАНУЛАМИ**

*Представлены технология производства и результаты исследования нового литого алюмоматричного антифрикционного композиционного материала, армированного стальными гранулами, а также результаты математического моделирования формирования отливок, технологические режимы литья и анализ микроструктуры. Трибоиспытания подтверждают перспективность нового материала.*

**Ключевые слова:** литой композиционный материал, интерметаллиды, износостойкость, гетерофазная структура.

*Представлено технологія виробництва та результати вивчення нового литого алюмоматричного антифрикційного композиційного матеріалу, армованого сталевими гранулами, а також результати математичного моделювання формування виливок, технологічні режими лиття та аналіз микроструктури. Трибовипробування підтверджують перспективність нового матеріалу.*

**Ключові слова:** литий композиційний матеріал, інтерметаліди, зносостійкість, гетерофазна структура.

*The presents technology and investigation of the new, reinforced by steel granules. The results of mathematical modeling of the castings forming, the technological parameters of casting, analysis of microstructure are presented. Tribotests confirm perspectivity of the new material.*

**Keywords:** cast composite material, intermetallic phases, wear-resistats, heterophaseous structure.

Развитие научно-технического прогресса в областях современной техники происходит на основе масштабного применения наукоемких технологий и новых материалов. Повышенные требования к уровню свойств материалов радикально не могут быть реализованы за счет использования традиционных сплавов [1]. На современном этапе важное значение приобретает повышение конкурентных преимуществ изделий при внедрении новых материалов за счет замены традиционных материалов на основе дорогостоящих цветных металлов (меди, олова и др.). Этим требованиям удовлетворяют металломатричные макрогетерогенные композиционные материалы (КМ), целенаправленное регулирование состава и совершенствование методов изготовления которых позволяет выйти на принципиально новый уровень эксплуатационных свойств и низкой себестоимости. Поэтому актуальной является разработка технологий получения антифрикционных композитов с использованием литейных технологий, реализуемых на стандартном оборудовании [2].

Впервые был получен литой алюмоматричный композит, где в качестве армирующей фазы использовалась стальная дробь диаметром 0,8-2,0 мм.

Отливки получали двумя способами:

- заливкой алюминиевого расплава при непрерывной подаче армирующих сферических элементов (стальной дроби) в литниковую чашу одновременно со струей заливаемого металла;
- заливкой расплава на слой дроби с приложением давления.

Для отработки первой технологии были использованы системы математического моделирования, что позволило установить характеристики затвердевания отливки, определить вероятность образования литейных дефектов, в том числе усадочного характера, и предсказать их вид и расположение на отливке. Применение современных программных пакетов существенно облегчило и удешевило (за счет снижения количества натуральных экспериментов) процесс разработки технологического процесса.

В работе, применяя модуль автоматического моделирования программного пакета LVMFlow, моделировали заливку алюминиевого расплава АК7, содержащего дискретные упрочняющие частицы, в литейную форму типа полый цилиндр (высота 200 мм, диаметр наружный 100 мм, диаметр внутренний 90 мм). В качестве упрочняющих частиц, поступающих одновременно с расплавом в литниковую чашу, выступали сферические элементы диаметром 0,8 мм с плотностями, близкими к реальным сталям. **Объемная доля частиц в расплаве составляла 10 %.** Моделировали процессы гравитационной заливки и заливки под давлением в кокиль и ПГФ. Температура формы составляла 20 °С, температура расплава – 670 °С, время заполнения – 5 с. При заданных начальных условиях объем усадки при литье в ПГФ для прямой верхней заливки составил 8,4 %, при литье в кокиль – 10,07 %, а с применением литниковой системы сифонного типа – 4,13 и 1,96 % соответственно. При формировании гетерогенной структуры КМ основным качественным критерием является равномерное распределение композиционной фазы в металлической матрице, что в условиях литья достигается распределением частиц в расплаве и фиксацией их положения в затвердевшей отливке. Для предотвращения гравитационного перераспределения частиц их фиксация должна происходить с наименьшей задержкой после заливки, что в данном случае обеспечивает литье в кокиль. Выполнение визуализации процесса позволило установить особенности и степень распределения частиц, а также наиболее уязвимые места отливки, подверженные возникновению усадочных пор. Установили, что потоки расплава при введении частиц под давлением вовлекают их за собой, не позволяют равномерно распределиться. При гравитационной заливке частицы равномерно распределяются по объему всей отливки (рис. 1)

По второму способу образцы диаметром 10 мм изготавливали следующим образом: на слой дроби (состав, в %: углерод – 0,8-1,2; кремний – 3,0-3,5; марганец

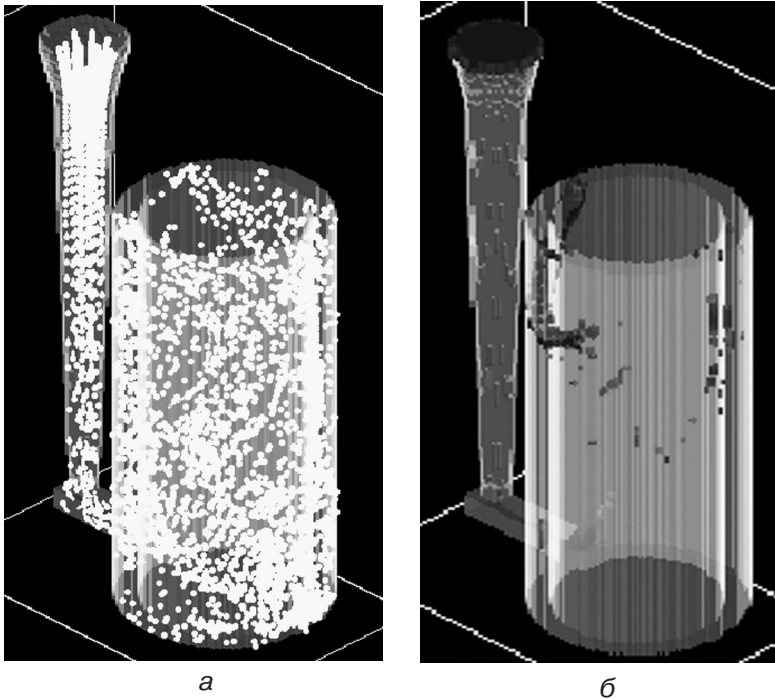


Рис. 1. Распределение стальных гранул (а) и усадочной пористости (б) при формировании КМ методом гравитационного литья

– 0,3-0,5; хром – 8,5-9,5; никель – 8,5-9,5; молибден – 3,0-3,5; железо – остальное), которую предварительно засыпали в пресс-форму, заливали расплав силумина АК7 (ГОСТ 1583-93), разогретый до температуры 800-810 °С. После этого к поверхности расплава подвели пуансон, к которому прикладывали нагрузку. Благодаря этому в расплаве создавалось давление 70-80 кПа, и он заполнял пустоты между частицами дробы.

Алюминий с железом и легирующими элементами, присутствующими в материале гранулы, способен образовывать твердые растворы и интерметаллидные соединения. Наличие таких соединений в структурах образцов свидетельствует, что гранулы смачиваются расплавом и взаимодействуют с ним, что способствует растворному диффузионному соединению матрицы и армирующих элементов. На рис. 2, а показана начальная стадия образования интерметаллидной прослойки вокруг гранулы. После выдержки залитого матричного металла в жидком состоянии

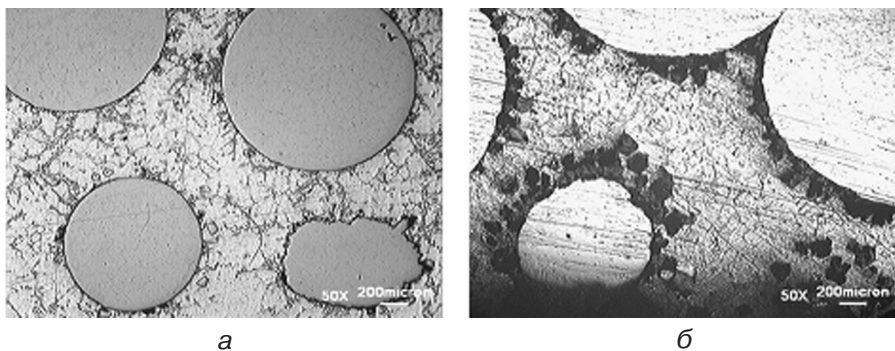


Рис. 2. Микроструктуры композиционного материала: а – заливка и охлаждение; б – заливка с выдержкой 2 ч при температуре 790-810 °С

происходит его более интенсивное взаимодействие с армирующими элементами и формирование фронта интерметаллидов (2, б).

Образующиеся in-situ интерметаллидные фазы ( $Fe_3Al$ ) могут находиться возле поверхности гранулы или выделяться в матрице в виде отдельных кристаллов различной формы и химического состава. Твердость их находится в пределах  $H\mu$  515-580 кг/мм<sup>2</sup>.

Триботехнические испытания нового материала (рис. 3) показали перспективность его применения в качестве антифрикционного. Установлено, что износ образца композита АК7-стальная дробь в 1,5 раза ниже, чем износ образца матричного сплава и примерно одинаков по сравнению с образцами других композиционных материалов.

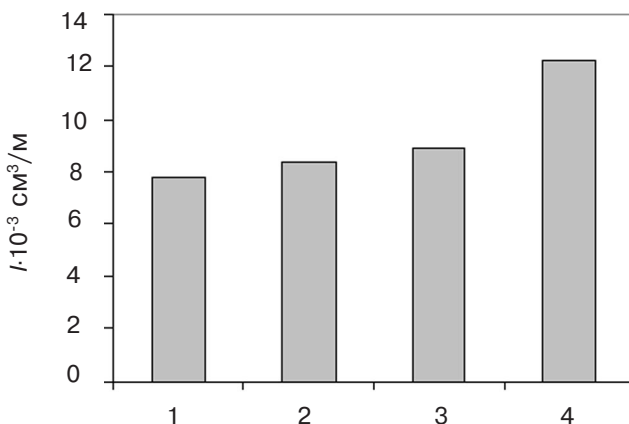


Рис. 3. Интенсивность изнашивания образцов при сухом трении  $V = 0,2$  м/с,  $P = 6,4$  кг/см<sup>2</sup>: 1 – АК7 + отходы КМ системы бронза-стальная дробь; 2 – АК7 + стальная дробь; 3 – АК7 + SiC; 4 – АК7

Таким образом, в материале реализовано комплексное армирование алюминиевой матрицы стальными гранулами и интерметаллидами, образующимися в результате диффузионно-реакционных процессов, которые протекают в процессе производства новых композитов. Дальнейшие исследования, без сомнения, представляют большой научно-технический интерес.



### Список литературы

1. Литые композиционные и нанокристаллические материалы – достижения, проблемы / В. Л. Найдек, С. С. Затуловский, А.С. Затуловский и др. // *Металлургия машиностроения*. – 2005. – № 6. – С. 18– 28.
2. *Затуловский С. С. Литые композиционные материалы*. – Киев: Техника, 1990. – 240 с.

Поступила 04.02.2013