

А. А. Щерецкий, А. С. Затуловский, В. А. Щерецкий, А. В. Соловьева

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Исследование особенностей взаимодействия компонентов алюмоматричных композиционных материалов на границе матрица – армирующая фаза\*

Методом ДСК (дифференциально-сканирующей калориметрии) изучено влияние легирования на температуру начала интенсивного карбидообразования в системе «сплав на основе алюминия – дисперсные частицы графита». Показано, что для промышленных силуминов эта температура выше, чем у чистого алюминия.

**Ключевые слова:** композиционные материалы на основе алюминия, межфазное взаимодействие, легирование

Применение металломатричных композиционных материалов (МКМ), армированных дисперсными частицами, позволяет не просто заменить дефицитные дорогостоящие цветные сплавы, но и производить изделия, обладающие уникальным комплексом свойств и характеристик. Путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и методов изготовления МКМ осуществляется направленное регулирование прочности, жесткости, износостойкости, рабочих диапазонов трибонагружения и температур, а также других механических и эксплуатационных характеристик [1].

Ключевым вопросом при получении КМ является взаимодействие металлических расплавов и наполнителя. Введенные в расплав частицы оказывают комплексное воздействие на матричный сплав. Взаимодействие частиц с расплавом может привести к образованию переходных зон или же появлению на межфазных границах вторичных соединений, что может как повышать, так и понижать свойства материала. Образование нежелательных хрупких соединений на границах (например, карбида алюминия) не только понижает свойства КМ, но и может привести к разрушению материала при их содержании более 10 %об. [2].

Состояние межфазных границ, обеспечивающих необходимую передачу нагрузок от одного структурного элемента композита к другому, во многом определяет физико-механические и функциональные свойства готового изделия. Поэтому проблема управления межфазным взаимодействием в гетерофазных расплавах при получении КМ имеет определяющее значение. При жидкофазном объединении элементов ЛКМ реализуются следующие стадии взаимодействия фаз: смачивание поверхности армирующих элементов в процессе пропитки частиц без образования химических связей на границах раздела фаз; диффузионное и/или химическое взаимодействие, сопровождающееся образованием твердых растворов и интерметаллидных соединений

на межфазной границе матрица-наполнитель; кристаллизация расплава матрицы; структурные изменения и фазовые превращения в процессе нагрева и охлаждения, определяющие окончательное строение и свойства КМ.

Вопросам взаимодействия графита с расплавами алюминия посвящены работы, основанные на экспериментальных и теоретических методах исследований [2-4]. Среди сообщений существуют также противоречивые данные относительно влияния некоторых легирующих элементов в этой системе [5, 6]. Это связано с тем, что реальные процессы объединения структурных составляющих литых композиционных материалов на базе алюминиевых сплавов происходят в неравновесных условиях, поэтому при экспериментальном исследовании межфазного взаимодействия в МКМ необходимо дополнительно учитывать кинетические факторы, а также влияние оксидной пленки, характерной для этих сплавов. Поэтому, эмпирические исследования взаимодействия в этой системе следует проводить при максимально приближенным к реальным условиям получения ЛКМ.

Исследование межфазного взаимодействия в гетерогенной системе МКМ выполняли методом ДСК с использованием прибора STA 449 F1 фирмы NETZSCH. Эксперименты проводили при двух скоростях нагрева: 10 и 0,5 град./мин в вакууме ( $P = 1,3 \text{ Па}$ ) и среде гелия (при давлении  $0,1-1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). Исследования процесса взаимодействия армирующих элементов с матричным расплавом осуществляли методом ДСК. При этом 3-4 мг дисперсного наполнителя (графит МПГ-7, 80-100 мкм) загружали на дно алундового тигля, сверху помещали цилиндрический образец из алюминиевого сплава диаметром 2 мм и высотой 3 мм (20-25 мг), со всех сторон равномерно покрытый порошком графита. Соотношение между наполнителем и алюминиевым сплавом составляло 1:10 во всех опытах. В качестве эталонного образца использовали плавный

\* Работа выполнена в рамках Государственной целевой научно-технической программы «Нанотехнологии и наноматериалы», проект № 4.13.11/612

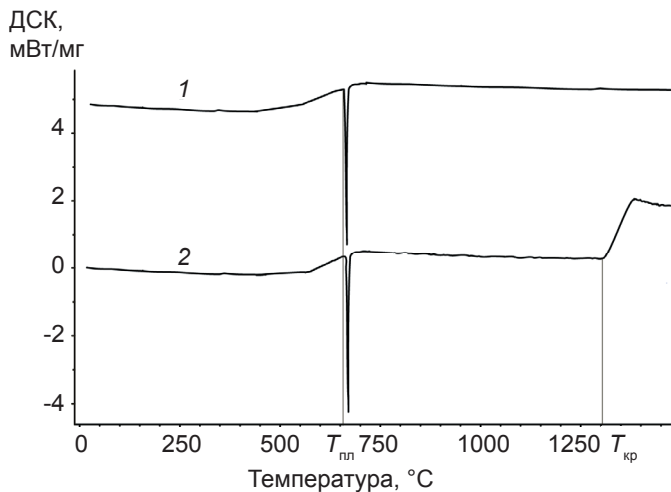


Рис. 1. Кривые ДСК процесса взаимодействия частиц графита с алюминиевым расплавом

оксид алюминия. Опытные образцы нагревали до температуры 1400 °С, а потом охлаждали с постоянной скоростью. При изучении взаимодействия алюминиевого расплава с дисперсными частичками графита при скорости нагрева 10 град./мин на кривой ДСК наблюдается одиночный пик (рис. 1, кривая 1), который отвечает температуре плавления ( $T_{пл}$ ) сплава основы. Металлографические исследования и химический анализ ДСК образцов ( $T_{max} = 1400$  °С), показали, что практически весь дисперсный графитовый наполнитель в результате взаимодействия со сплавом основы переходит в карбид алюминия. Процесс карбидообразования растянут во времени и происходит одновременно с заметным изменением теплофизических характеристик исследуемой системы, поэтому на ДСК кривых он не фиксируется.

Температуру начала интенсивного карбидообразования ( $T_{кр}$ ) для МКМ, армированных дисперсными частичками графита, определяли по перегибу ДСК кривой при скорости нагрева образца 0,5 град./мин (рис. 1, кривая 2). Как показали исследования, на температуру начала интенсивного карбидообразо-

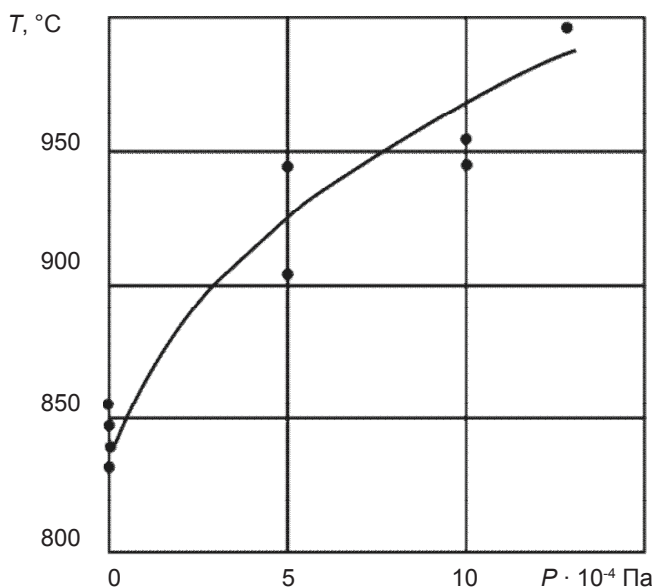


Рис. 2. Влияние давления на температуру начала интенсивного карбидообразования в системе дисперсные частички графита – алюминиевый расплав

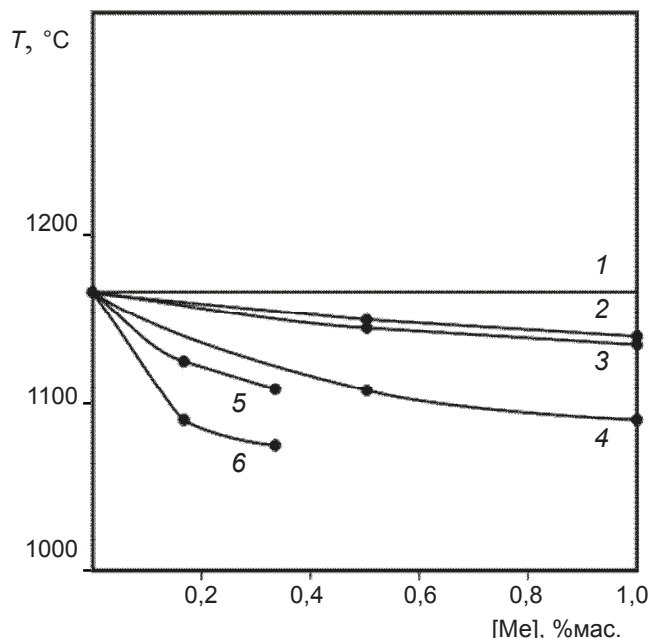


Рис. 3. Влияние легирования на температуру начала интенсивного карбидообразования в системе Al-C-Me: 1 – кремний; медь, цинк, никель, молибден; 2 – железо; 3 – марганец; 4 – магний; 5 – цирконий; 6 – титан

вания в системе частицы графита – алюминиевый расплав существенно влияет давление. С увеличением давления в плавильной печи начало интенсивного карбидообразования смещается в сторону более высоких температур. Повышение температуры начала взаимодействия в системе алюминий-графит с увеличением давления в плавильной печи, вероятно, связано с повышением температуры разрушения оксидной пленки алюминия (рис. 2).

Методом ДСК исследовали влияние легирования на температуру начала интенсивного карбидообразования в системе Al-C. Для исследования использовали сплавы на основе алюминия марки А95, легированные титаном, цирконием, магнием, марганцем, железом, кремнием, медью, цинком, никелем, молибденом и порошок графита марки МПГ-7 дисперсностью 60-80 мкм.

Сплавы выплавляли в индукционной печи в графитовых тиглях. Содержимое легирующих элементов определяли рентгеноспектральным анализом. Было установлено, что титан, цирконий и магний значительно снижают температуру начала интенсивного карбидообразования, влияние же кремния, меди, цинка, никеля, молибдена, железа и марганца можно считать незначительным (рис. 3).

**Данные температур начала интенсивного карбидообразования для системы «стандартный сплав на основе алюминия – дисперсные частички графита»**

Сплавы	$T_{кр}, \pm 20$ °С	Сплавы	$T_{кр}, \pm 20$ °С
А95	1062	АМ5	1052
АК7	1083	АМг5К	995
АК12	1090	Д16	1033
АК12М2	1088	АМг2	1001
АК5М7	1068	АМг5Мц	971

$T_{кр}$  – температура начала интенсивного карбидообразования

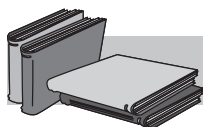
Полученные результаты подтверждают, что температура начала интенсивного карбидообразования совпадает с разрывом алюминиевой оксидной пленки, поэтому активные элементы (титан, цирконий, магний), которые оказывают содействие ее разрыву, снижают температуру начала взаимодействия. По разработанной ДСК методике зафиксировали данные температур начала интенсивного карбидообразования для композиционных материалов, содержащих дискретные частицы графита на основе стандартных матричных сплавов алюминия (таблица).

### Выводы

Установлено, что температура начала интенсивного карбидообразования для промышленных сплавов алюминия немного выше, чем у чистого алюминия.

Сплавы, которые содержат в качестве легирующих элементов магний, титан и марганец обладают пониженной температурой начала интенсивного карбидообразования при взаимодействии с дисперсными частицами графита по сравнению с алюминием. Значительное понижение температуры начала интенсивного карбидообразования связано не только с термодинамическими характеристиками системы, но и со снижением стойкости оксидной пленки за счет взаимодействия легирующих элементов с оксидом алюминия и образованием легкоплавких соединений типа шпинели.

Показана эффективность метода дифференциально-сканирующей калориметрии для экспресс-контроля процессов карбидообразования при получении композиционных материалов, армированных дисперсными частицами графита.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Затуловский С. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. / Литые композиционные материалы. – Киев: Техника, 1990. – 240 с.
2. Yoon H., Okura A., Ishinose H. Interfacial Reaction of C/Al Composite and Influence of Reaction on its Tensile Strength // Tetsu-To-Hagane. – 1989. – V. 75, N. 9. – P. 1455-1462.
3. Варенков А. Н., Голащупов Ф. А. Взаимодействие графитированного материала с алюминием и никелем в твердой фазе // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1983. – № 9. – С. 4-7.
4. Колесниченко Г. А. Исследование смачиваемости и взаимодействия жидких металлов с поверхностью алмаза и графита: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1966. – 18 с.
5. Ласковнев А. П. Развитие теории и технологических основ малоотходного производства композиционных материалов с использованием алюминиевых порошков: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Минск, 2003. – 45 с.
6. Jacquier C., Chaussende D., Ferro G. Study of the interaction between graphite and Al-Si melts for the growth of crystalline silicon carbide // J. Mater. Sci. – 2002. – № 37. – P. 3299-3306.

### Анотація

Щерецький О. А., Затуловський А. С., Щерецький В. О., Соловйова А. В.  
Дослідження особливостей взаємодії компонентів алюмоматричних композиційних матеріалів на границі матриця – армуюча фаза

Методом ДСК (диференційно-скануючої калориметрії) досліджено вплив легування на температуру початку інтенсивного карбидоутворення в системі «сплав на основі алюмінію – дисперсні частинки графіту». Показано, що для промислових силумінів ця температура вища, ніж для чистого алюмінію.

### Ключові слова

композиційні матеріали на основі алюмінію, міжфазна взаємодія, легування

### Summary

Shcheretsky A., Zatulovsky A., Shcheretsky V., Solovyova A.  
Investigation of interaction features of aluminum based composite materials components in matrix – arming phase boundaries

The affect of alloying on intensive carbonization temperature in the system aluminum alloy – graphite dispersed particles is studied by DSC technique (differential scanning calorimetry). It is shown that the temperature for commercial silumins is higher then for pure aluminum.

### Keywords

aluminum based composite materials, interphase interaction, alloying

Поступила 02.06.11