

УДК 669.018.28

Н.Е. КАЛИНИНА¹, О.А. КАВАЦ¹, В.Т. КАЛИНИН²¹Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, Украина²Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина

МОДИФИЦИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА ЛИТЕЙНЫХ СИЛУМИНОВ ДИСПЕРСНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

Приведено влияние дисперсного модификатора карбида кремния на свойства литейных алюминиевых сплавов. Показан химический состав важнейших литейных алюминиевых сплавов. Разработана технология введения частиц SiC в расплавы силуминов. Рассчитано оптимальное соотношение составляющих модификатора. Приведены механизмы взаимодействия расплавов с составляющими таблетки. Достигнуто повышение прочности, пластичности и коррозионной стойкости модифицированных сплавов. Даны рекомендации применения различных скоростей перемешивания расплава в заводских условиях. Определена зависимость величины зерна алюминиевого сплава АЛ4 от количества частиц модификатора SiC.

алюминиевый сплав, дисперсный модификатор, частица SiC, микроструктура, механические свойства, коррозионная стойкость

Введение

В отечественном машиностроении литейные алюминиевые сплавы АЛ4, АЛ4С, АЛ25 системы алюминий-кремний, называемые силуминами, применяют для литья деталей сложной конфигурации, несущих большие нагрузки и работающих при повышенных температурах. Химические составы сплавов АЛ4 и АЛ4С приведены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав исследуемых силуминов

Сплав	Содержание элементов, % мас.					
	Al	Si	Mg	Mn	Sb	Fe
АЛ4	О	9,2	0,3	0,3	–	1,0
АЛ4С	С Н	9,2	0,3	0,3	0,18	0,9

Для значительного повышения качества отливок, измельчения зерна и достижения однородной структуры в процессе плавки проводят операции рафинирования и модифицирования. Модификаторы литейных алюминиевых сплавов разделяют на две группы. К первой группе относятся вещества, которые создают в расплаве высокодисперсную взвесь в виде интерметаллидов, являющихся подложкой для образующихся кристаллов. Ко второй группе модификаторов относятся поверхностно-активные веще-

ства, действие которых сводится к адсорбции частиц на гранях растущих кристаллов и тем самым торможению их роста [1].

1. Формулирование проблемы

Качество литейных алюминиевых сплавов при модифицировании их дисперсными тугоплавкими частицами зависит, в основном, от природы дисперсной фазы и качества перемешивания алюминиевого расплава при введении частиц. В работах [2, 3] изучали влияние тугоплавких частиц TiC, TiN, Al₂O₃ на качество и свойства различных марок силуминов. Наиболее важной проблемой, с которой сталкивались авторы указанных работ, были способ введения и равномерного распределения дисперсных частиц в алюминиевых расплавах.

2. Решение проблемы. Теоретическое обоснование

В работе предложены дисперсные частицы карбида кремния в качестве эффективного модификатора литейных силуминов. Днепропетровским национальным университетом также предложен способ введения частиц карбида кремния в алюминиевый расплав в процессе плавки в виде таблеток и

способ их изготовления [4]. Таблетка для модифицирования (рис. 1) состоит из порошка карбида кремния размерами до 0,1 мкм и порошка алюминия марки ПАД фракцией 50 – 150 мкм.



Рис. 1. Прессованные таблетки для модифицирования

Оборудованием для их изготовления являлся пресс-автомат ударного действия давлением до 16 тонн. Различные геометрические параметры таблетки для модифицирования, в зависимости от требуемых размеров и массы таблетки, обеспечивают сменные матрица и пуансон пресса. Оптимальный состав таблетки при соотношении SiC:Al=1:3 обеспечивает предел прочности на сжатие 5 МПа, позволяет облегчить расчёты необходимого количества модификатора в процессе плавки алюминиевых сплавов, а также обеспечивает лёгкость введения в расплав, так как не требует дополнительной технологической литейной оснастки.

Равномерное распределение дисперсной фазы SiC в расплаве силуминов обеспечивается перемешиванием. Перемешивание алюминиевых расплавов в процессе плавки проводили вручную при помощи приспособления, представляющим собой стальной лист размерами 40 x 5 x 1000 мм. Необходимое число оборотов мешалки, при котором достигается равномерное распределение дисперсной фазы SiC во всём объёме расплава в тигле, определили по критериальной зависимости согласно работе [5] с учётом геометрических параметров мешалки, тигля, физических параметров дисперсионной среды и дисперсной фазы. Необходимое число оборотов мешалки,

равное 320, хорошо согласуется с экспериментальными данными. На кривой зависимости величины зерна от числа оборотов отмечено экстремальное значение, соответствующее оптимальному режиму перемешивания. Перемешивание расплава с числом оборотов от 300 до 450 незначительно влияет на величину зерна, а дальнейшее увеличение числа оборотов приводит к росту зерна алюминиевого сплава АЛ4. Введением таблетки значительно облегчен процесс введения порошкового модификатора в расплав. Порошок алюминия, входящий в состав таблетки, расплавляется в процессе плавки алюминиевого сплава, а дисперсные частицы карбида кремния SiC равномерно распределяются в объёме расплава последующим механическим перемешиванием.

Средний размер зерна определяли количественным металлографическим анализом согласно статистическому методу Джеффриса по числу зёрен, приходящихся на единицу площади шлифа. Размер зерна алюминиевого сплава АЛ4 при модифицировании уменьшается в 2,5 – 3,0 раза. При средней скорости перемешивания расплава 40 об/мин время перемешивания составило 8 мин. Применение более высокой скорости перемешивания приведёт к разбрызгиванию жидкого металла. С увеличением времени перемешивания степень усвоения дисперсных частиц ухудшается по экспоненциальной зависимости [5]. Это объясняется тем, что первоначально усвоенные расплавом частицы SiC в дальнейшем частично выводятся из расплава. Явление такого выведения частиц можно объяснить действием центробежных сил, оттесняющих дисперсные частицы модификатора к стенкам тигля, а затем выводящих их на поверхность расплава [6]. Поэтому в производственных условиях следует не проводить перемешивание непрерывно, а периодически возобновлять его перед заливкой металла в форму. Целесообразно также использовать реверсное перемешивание – по 2 – 3 минуты вращения в противоположных направлениях.

Установленный эффект резкого измельчения зе-

рна в данной работе объясняется следующим образом. При принудительном способе движения расплава, а именно, перемешивании, на границе алюминиевого расплава и твёрдых частиц карбида кремния вследствие различия в скоростях колебаний твёрдой и жидкой фаз возникают силы вязкого трения. Силы вязкого трения уменьшают поверхностное натяжение на границе между твёрдой и жидкой фазами. Исходя из того, что в поле упругих колебаний интенсифицируются флуктуационные процессы, определяющие вероятность перехода металла из жидкой фазы в твёрдое состояние, предполагается, что упругие колебания изменяют энергию активации зародышеобразующих частиц SiC. В результате изменения поверхностного натяжения и энергии активации уменьшается работа образования зародыша и увеличивается вероятность зарождения твёрдой фазы, что в свою очередь, увеличивает скорость кристаллизации. Перемешивание жидких модифицированных алюминиевых сплавов АЛ4 и АЛ4С в течение 8 – 12 минут оказывает сильное каталитическое действие на систему «расплав – модификатор SiC», положительно воздействует на капиллярный микрорельеф поверхности дисперсных частиц карбида кремния, превращая их в активные центры кристаллизации. Предложенные представления о механизме измельчения зерна алюминиевых сплавов находятся в соответствии с классическими работами И.И. Теумина и Г.И. Эскина [7].

На основании геометрических и физических параметров дисперсных частиц карбида кремния определили количество дополнительных центров кристаллизации, искусственно введенных в промышленный тигель для плавки алюминиевых сплавов ёмкостью 120 кг. Расчёты проведены для сплавов АЛ4 и АЛ4С, исходя из условия, что частицы SiC имеют правильную сферическую форму диаметром 0,1 мкм. Необходимое количество модификатора карбида кремния в сплавах АЛ4 и АЛ4С, обеспечивающее высокие физико-механические и технологические свойства, составляет 0,1% мас.

В случае плавки в тигле 120 кг алюминиевых сплавов АЛ4 и АЛ4С необходимо ввести 0,12 кг дисперсных частиц SiC, при этом масса каждой частицы составляет $1,66 \cdot 10^{-18}$ кг. Следовательно, значительное повышение прочностных характеристик сплавов отмечается, когда в промышленных условиях в тигле печи находится $6 \cdot 10^{16}$ частиц SiC. Тогда можно определить, что каждый килограмм отлитых из модифицированных алюминиевых сплавов АЛ4 и АЛ4С деталей будет содержать $5 \cdot 10^{14}$ частиц-модификаторов карбида кремния.

Модифицирование карбидом кремния в количестве 0,1% мас. ($5 \cdot 10^{14}$ частиц SiC в 1 кг отливки) литейного алюминиевого сплава АЛ4 приводит к уменьшению размера зерна в 2,5 – 3,0 раза и равномерности величины зерна по высоте отливки. Дальнейшее увеличение количества модификатора и перемешивание модифицированного расплава АЛ4 практически не влияет на уменьшение размера зерна (рис. 2).

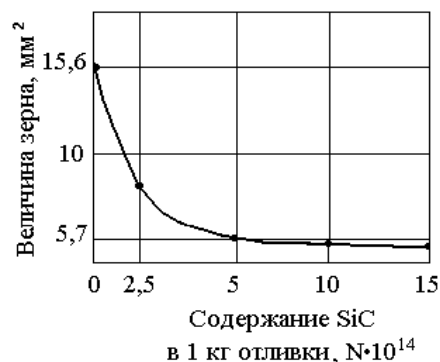


Рис. 2. Зависимость величины зерна модифицированного сплава АЛ4 от содержания модификатора SiC

Микроструктура алюминиевого сплава АЛ4 до модифицирования состоит из дендритов α -твёрдого раствора, эвтектики $\alpha + Si$, железосодержащих фаз и соединений Mg_2Si . Расстояние между дендритными осями второго порядка составляет 15 – 20 мкм. Межосные участки между дендритами заполнены эвтектикой $\alpha + Si$, в которой кристаллы кремния имеют форму стержней длиной до 30 мкм. Микроструктура сплава АЛ4С до модифицирования состоит из α -

твёрдого раствора, эвтектики α +Si, железосодержащих фаз, интерметаллидов AlSb и Mg_3Sb_2 . Исследование микроструктуры сплава АЛ4, модифицированного карбидом кремния, показало измельчение α -твёрдого раствора. Расстояние между осями второго порядка после модифицирования уменьшилось в 1,5 – 2 раза и составило 10 мкм. Измельчение эвтектики и железосодержащих фаз не обнаружено, что позволяет отнести карбид кремния к модификаторам 1-го рода для литейных силуминов.

Проведенные эксперименты и комплексные исследования сплавов, включающие изучение физико-механических свойств, технологических свойств, коррозионной стойкости, а также внутреннего строения отливок, показали, что введение тонкодисперсных порошков карбида кремния в сплавы АЛ4 и АЛ4С способствует:

- повышению предела прочности на 8% при одновременном повышении относительного удлинения сплавов на 25%, а также твёрдости и вязкости;
- повышению плотности отливок на 2,4%;
- высокой коррозионной стойкости сплавов АЛ4 и АЛ4С при испытаниях на общую коррозию и межкристаллитную коррозию;
- измельчению макро- и микроструктуры алюминиевых сплавов;
- высокой стойкости к образованию горячих трещин;
- низкому газосодержанию, соответствующему 1 баллу пористости.

Заключение

Работы, проведенные в промышленных условиях, показали возможность изготовления порошкового модификатора SiC в виде таблеток. Оптимальный состав таблетки при соотношении SiC:Al=1:3 обеспечивает максимальный предел прочности на сжатие 5 МПа. Определены оптимальные параметры равномерного распределения дисперсных частиц SiC в расплавах силуминов. Применение дисперсного модификатора карбида кремния облегчает техно-

логический процесс литья, является экологически безопасным, приводит к повышению физико-механических и технологических свойств, коррозионной стойкости, а также измельчению структуры отливок из литейных силуминов.

Литература

1. Калинина Н.Е., Кавац О.А. Получение высокопрочных алюминиевых сплавов модифицированием ультрадисперсными композициями // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 18-20.
2. Чернега Д.Ф., Могилатенко В.Г. Влияние дисперсных тугоплавких частиц в расплаве на кристаллизацию алюминия и силумина // *Литейное производство*. – 2002. – № 12. – С. 6-8.
3. Young-Dong K. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys / K. Young-Dong, L. Zin-Hyoung // *Mater. Sci. and Eng.* – 2003. – № 1-2. – P. 372-376.
4. Пат. 28570 Україна, МПК⁶ C 22 C 1/00. Склад для модифікування алюмінієвих сплавів / О.А. Кавац, Н.Є. Калініна, Д.А. Кавац, О.К. Федючук; заявник і власник ДП «Вироб. об'єдн. Півд. машинобуд. з-д ім. О.М.Макарова». – №u200709846; заявл. 03.09.07; опубл. 10.12.07, Бюл. №20 (I кн.).
5. Панфилов А.В. Литые композиционные материалы, армированные тугоплавкими дисперсными частицами // *Литейное производство*. – 1983. – № 6. – С. 15-18.
6. Михаленков К.В., Чернега Д.Ф., Могилатенко В.Г. К вопросу об усваиваемости тугоплавких соединений жидкими алюминиевыми сплавами // *Процессы литья*. – 1996. – № 1. – С. 3-10.
7. Эскин Г.И. Обработка и контроль качества цветных металлов ультразвуком. – М.: *Металлургия*, 1992. – 128 с.

Поступила в редакцию 14.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.А. Джур, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.