

А. И. Троцан, А. И. Иценко, В. В. Каверинский

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев, Украина

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ДОЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ ПОРОШКОМ АЛЮМИНИДА ТИТАНА

Экспериментально подтверждена эффективность модифицирования малогабаритных быстро охлаждаемых отливок из доэвтектического силумина дисперсным порошком алюминид титана (TiAl). Достигнуто уменьшение средней площади сечений макрозерна на плоскости шлифа в 4,8 - 5,2 раза. Средний линейный размер зерна в микроструктуре при этом уменьшается на 21,4 %. Установлено существенное улучшение морфологии алюминиево-кремниевой эвтектики. Измельчение структуры металла сопровождается заметным повышением средних значений его твердости: от 66,7 HV до 80,5 HV. Полученные результаты указывают на возможность в значительной мере повысить качество литых изделий из силумина.

Ключевые слова: модифицирование, силумин, алюминид титана, литье, макроструктура, микроструктура.

Табл. 2. Рис. 5. Лит. 6.

А. І. Троцан, А. І. Іценко, В. В. Каверинський

МОДИФІКУВАННЯ ДООВТЕКТИЧНИХ СИЛУМІНІВ ПОРОШКОМ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ

Експериментально підтверджена ефективність модифікування малогабаритних швидко охолоджуваних відливок з доэвтектичних силумінів дисперсним порошком алюмініду титану (TiAl). Досягнуто зменшення середньої площі перетинів макрозерна на площині шлифа в 4,8 - 5,2 рази. Середній лінійний розмір зерна в микроструктурі при цьому зменшується на 21,4%. Встановлено суттєве покращення морфології алюмінієво-кремнієвої евтектики. Подрібнення структури металу супроводжується помітним підвищенням середніх значень його твердості: від 66,7 HV до 80,5 HV. Отримані результати вказують на можливість значною мірою підвищити якість литих виробів з силуміну.

Ключові слова: модифікування, силумін, алюмінідів титану, лиття, макроструктура, микроструктура.

A. I. Trotsan, A. I. Itsenko, V. V. Kaverinsky

MODIFICATION OF HYPOEUTECTIC SILUMINS BY TITANIUM ALUMINIDE POWDER

An efficiency of modification of small swiftly cooled castings from hypoeutectic silumin using disperse titanium aluminide (TiAl) powders was experimentally confirmed. Decrease by 4.8 - 5.2 times of the average area of cross sections of macrograins in the plane of the sample section was achieved. The average linear grain size in the microstructure is then decreased by 21.4%. Considerable improvement in the morphology of the aluminum-silicon eutectic has been found out. Refinement of metal structure accompanied by a significant increase in the average values of its hardness from 66,7 HV up to 80,5 HV. The obtained results allow us to greatly improve the quality of cast products from silumin.

Keywords: modification, silumin, titanium aluminide, casting, macrostructure, microstructure.

Постановка проблемы. В настоящее время применение силуминов в машиностроении резко увеличивается в связи с благоприятным сочетанием в них комплекса механических и функциональных свойств. Относительно хорошая свариваемость, высокие литейные характеристики, коррозионная стойкость, малый удельный вес обеспечивают широкое использование силуминов в авиа-, ракето- и автостроении. Наличие в структуре промышленных доэвтектических силуминов крупных дендритов α -Al, грубых пластинчатых кристаллов эвтектического кремния и хрупких интерметаллидных фаз обуславливает низкие прочностные и пластические свойства, не позволяет расширить их применение [1]. Так как литые изделия из силуминов не подлежат пластической деформации, для улучшения структуры силуминов необходимо применять методы физико-химического воздействия на структурообразование в процессе кристаллизации. Перспективным путем одновременного повышения пластических и прочностных свойств литого металла является измельчение структуры за счёт модифицирования [2].

Целью работы является исследование влияния модифицирования порошком TiAl на структуру и свойства отливок из доэвтектического силумина.

Методика выполнения работы и использованные материалы. В работе [2] нами был предложен способ модифицирования расплавов путём ввода дисперсных тугоплавких частиц, способных растворяться и становиться эффективными наноразмерными подложками к моменту начала кристаллизации основного металла. В работе [3] было показано, что эффективным модификатором для сплавов на основе алюминия является интерметаллическое соединение TiAl

(алюминид титана). Были определены оптимальные характеристики фракционного состава и расхода порошка. Так, для обработки расплава при изготовлении малогабаритных быстроохлаждаемых силуминовых отливок оптимальным является порошок, имеющий логнормальное распределение частиц по размерам, отвечающий параметрам $\mu = 0,8 - 1,0$ и $\sigma = 0,3 - 0,5$. Это порошки со средним размером частиц $2,3 - 3,1$ мкм и интервалом варьирования размеров от $0,5 - 1,0$ до $5,0 - 7,0$ мкм. В связи с этим, для проведения экспериментов использован порошок TiAl, фракционный состав которого отвечал параметрам $\mu = 0,90$ и $\sigma = 0,47$. Гистограмма распределения частиц порошка по размерам представлена на рисунке 1.

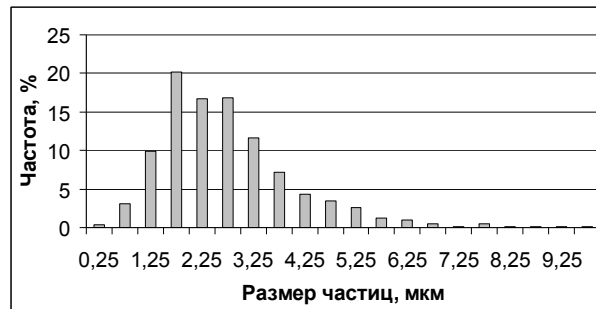


Рис. 1. Фракционный состав порошка TiAl

Температура обработки расплава составляла $720-730$ °С. Расход порошка – $0,3$ г/кг. Для ввода модификатора в расплав применялись закрытые цилиндрические алюминиевые капсулы диаметром $9,5$ и длиной $30-35$ мм (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид капсул для ввода модификатора

Наполнитель капсулы помимо основного компонента – TiAl – дополнительно содержал $10 - 15$ % хлорида марганца $MnCl_2$ с целью первичного распределения порошка по объёму расплава за счёт образующихся при его нагревании газов. Хлорид марганца также был использован для предварительной рафинирующей обработки за счёт барботажного жидкого металла [4]. Добавки марганца не только повышают прочность и твердость металла, но и улучшают пластичности и формуемость [5]. Мелкие дисперсоиды Al_6Mn [6] стабилизируют рост зерна при отжиге. Марганец улучшает литейные свойства, снижает усадку при затвердевании [5]. Модификатор вводился в разливочный ковш перед заливкой в форму. Разливка выполнялась в чугунные кокилы. Отливки имели цилиндрическую форму диаметром – 27 и высотой – 50 мм. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав материала отливок (масс. %)

Si	Mn	Fe	Cu	Al
7,0	0,2	0,75	0,7 - 0,8	основа

На полученных опытных образцах изготавливались металлографические шлифы. Проводился анализ макро и микроструктуры. В качестве травителя использовался водный $15 - 17$ % раствор КОН подогретый до температуры $70 - 80$ °С. Макро и микроструктура изучалась на одних и тех же образцах. Для улучшения качества проявления структуры выполнялось 3-х кратное чередование полировки и травления.

Основные результаты исследования. На рисунке 2 приведены характерные фотографии макроструктур отливок из силумина АК7. Даны разрезы в поперечном направлении.

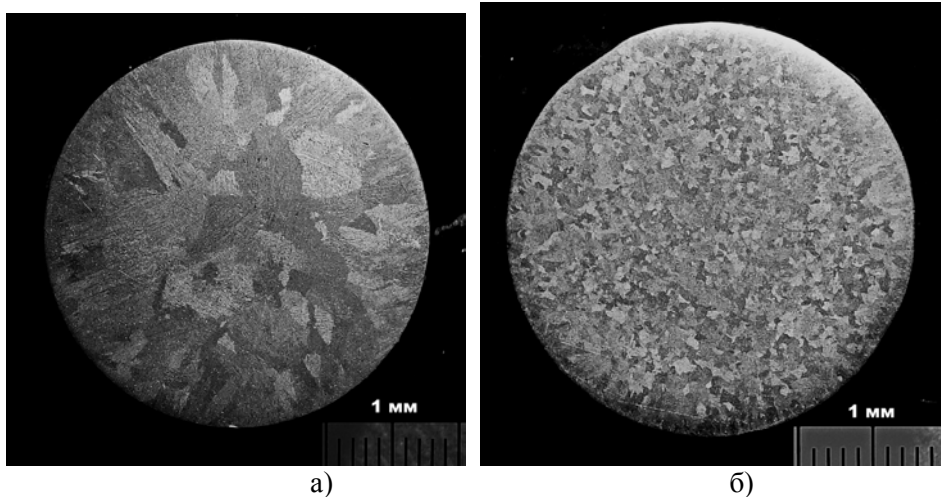


Рис. 2. Макроструктуры отливок из силумина АК7
а) немодифицированная; б) модифицированная

Из приведенных фотографий видно, что структура в немодифицированных отливок крупная, хотя выраженной столбчатости не наблюдается, за исключением отдельных, примыкающих к краю участков (рис. 2 а). Структура отливок, расплав для которых обрабатывался порошком TiAl, значительно мельче (рис. 2 б). Существенных различий в структуре на продольных и поперечных шлифах не обнаружено. Количественные характеристики определялись методом подсчета зёрен и непосредственным измерением их площадей с построением гистограмм частотного распределения. Результаты количественной металлографии приведены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние модифицирования силумина АК7 порошком TiAl на характеристики макроструктуры отливок

Тип образца	Средняя площадь сечения зерна, мм ²	Интервал варьирования, мм ²
Без модифицирования	6,05	0,02 – 43,35
Ввод 0,3 г/кг TiAl	1,17	0,01 – 7,76

На рисунке 3 приведены гистограммы частотных распределений зёрен по площадям сечения на плоскости шлифа.

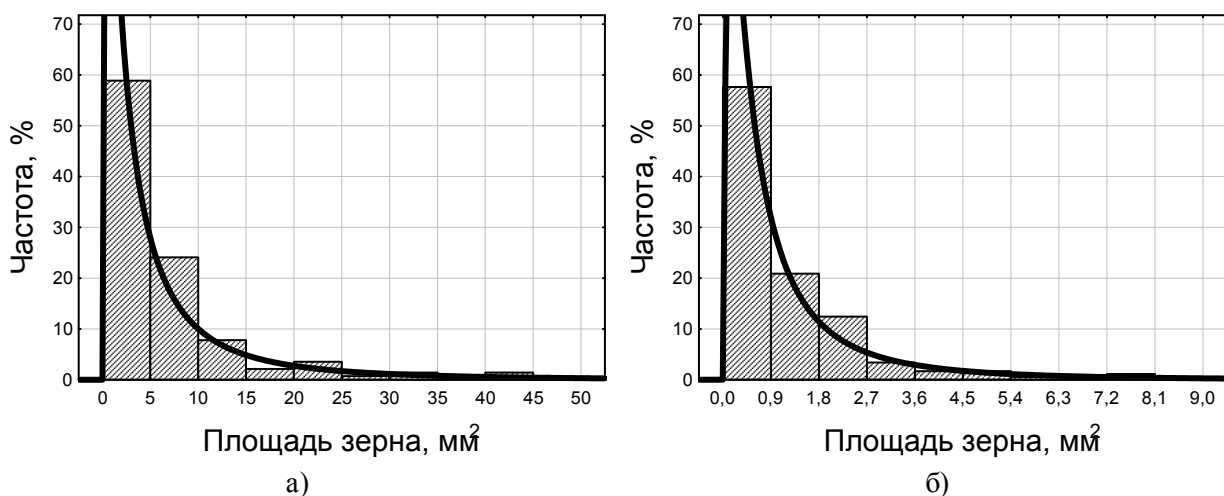


Рис. 3. Частотное распределение сечений зёрен по размерам (площадям) на плоскости шлифа:
а) без модифицирования; б) ввод 0,3 г/кг TiAl

Во всех рассмотренных случаях распределение зёрен по площадям сечения описывается логнормальным распределением. Параметры функции распределения (графики наложены на гистограммы) составляют: для немодифицированной отливки $\mu=1,11$; $\sigma=1,78$; для модифицированной 0,3 г/кг TiAl $\mu= - 0,45$; $\sigma=1,43$.

Интервалы варьирования размеров зёрен пересекаются, для обоснования статистической значимости наличия или отсутствия различия было проведено сравнение средних. Распределение во всех опытах является логнормальным. Известно, что если какая-то величина имеет логнормальное распределение, то значения её логарифма имеет нормальное распределения. Таким образом, в качестве критерия при сравнении средних по критерию Стьюдента нами были использованы средние значения натуральных логарифмов площадей сечения зёрен. Сравнение показало, что разница в среднем размере зёрен между немодифицированными и модифицированными отливками при степени надёжности 95 % является статистически значимой. Разница же между средними размерами зерна между отдельными однотипными отливками статистически незначима. Таким образом, можно сделать вывод, что ввод указанного порошкового модификатора в расплав силумина АК7 в количестве 0,3 г/кг при изготовлении малых отливок позволяет существенно измельчить структуру литого металла. А именно, средняя площадь сечения макрозерна на плоскости шлифа уменьшается примерно в 4,8 - 5,2 раза. Это соответствует измельчению средних линейных размеров зерна, при условном предположении их формы кубической, в 2,2 - 2,3 раза.

На рисунке 4 приведены фотографии микроструктур модифицированного и немодифицированного образцов силумина, полученные методом оптической микроскопии при увеличении $\times 50$. Фотографии алюминиево-кремниевой эвтектики, полученные при увеличении $\times 500$ методом электронной микроскопии, приведены на рисунке 5. Фотографии сделаны вблизи половины радиуса.

Из приведенных снимков видно, что как в модифицированном, так и немодифицированном металле не отмечается направленной пакетной столбчатости. Структура имеет дендритный характер. В немодифицированных отливках даже при небольших увеличениях (рис. 4) можно различить грубые игольчатые кристаллы кремния. Средний размер зерна измерялся методом случайных секущих на фотографиях соответствующих различным участкам отливки. Анализ микроструктуры показал, что хотя некоторая вытянутость кристаллитов имеет место, в немодифицированных образцах она составляет 37,9 мкм при интервале варьирования от 28,1 до 46,9 мкм и среднем квадратичном отклонении $\pm 5,7$ мкм. Для модифицированных отливок средний размер зерна составляет 29,8 мкм при интервале варьирования от 21,8 до 40,3 мкм и среднем квадратичном отклонении $\pm 4,7$ мкм. Следовательно модифицирование силумина АК7 порошком TiAl в количестве 0,3 г/кг позволяет добиться измельчения микроструктуры отливок на 21,4 %.

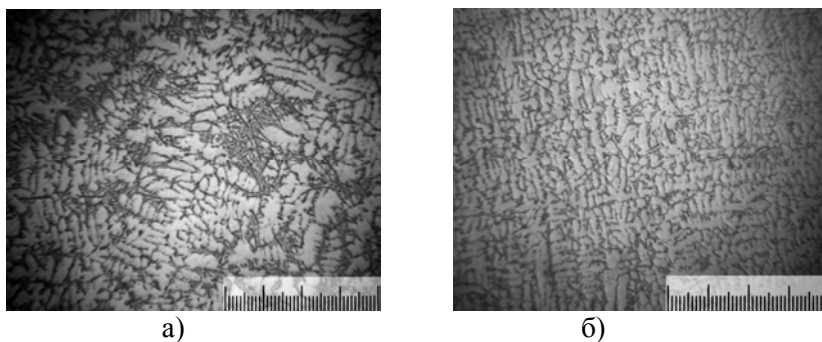


Рис. 4. Микроструктура отливок из силумина АК7 (оптическая микроскопия, увеличение $\times 50$): а) без модифицирования; б) ввод 0,3 г/кг TiAl

Растровая электронная микроскопия позволяет обнаружить более существенные качественные различия в характере микроструктуры модифицированных и немодифицированных отливок (рис. 5). Из представленных результатов видно, что в немодифицированных отливках сечения кристаллов кремния в плоскости шлифа имеют форму длинных ($\sim 50 - 100$ мкм) и тонких ($\sim 1 - 2$ мкм) игл. Подобная их морфология, как известно, ведет к охрупчиванию материала. В модифицированных отливках включения кремния заметно короче ($\sim 10 - 50$ мкм) и несколько толще.

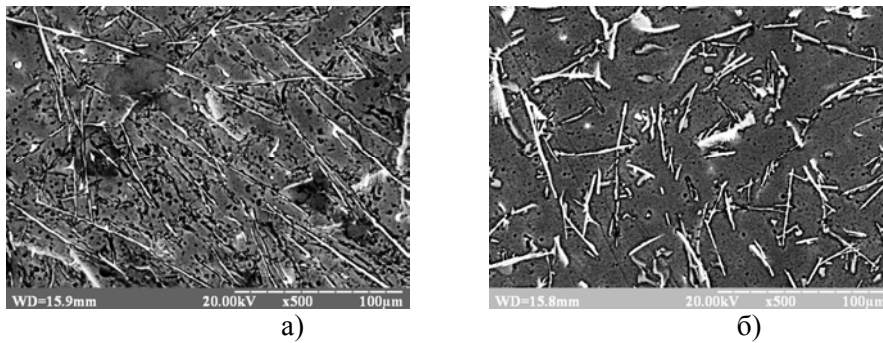


Рис. 5. Микроструктура отливок из силумина АК7 в зоне половины радиуса (растровая электронная микроскопия, увеличения $\times 500$): а) без модифицирования; б) ввод 0,3 г/кг TiAl

Среднее значение твёрдости немодифицированного силумина составило 66,7 HV, при среднем квадратичном отклонении $\pm 9,4$ и интервале варьирования от 48,4 до 86,4 HV. Среднее значение твёрдости модифицированного силумина составило 80,5 HV, при среднем квадратичном отклонении $\pm 10,0$ и интервале варьирования от 65,4 до 99,3 HV. Распределение значений твёрдости в каждом из испытаний является нормальным. Сравнение средних по критерию Стьюдента значений показало, что наблюдаемая разница для степени надёжности 95 % является статистически значимой. Следовательно, при модифицировании доэвтектических силуминов дисперсным порошком алюминид титана также повышает его твёрдость на 20,5 %.

Выводы. Экспериментально подтверждена эффективность модифицирования малогабаритных быстро охлаждаемых отливок из доэвтектических силуминов дисперсным порошком алюминид титана (TiAl)

Установлено, что ввод дисперсного порошка TiAl (расход 0,3 г/кг) при температуре расплава 720-730 °С в силумин АК7 позволяет уменьшить среднюю площадь сечений макрозерна на плоскости шлифа в 4,8-5,2 раза, условных линейных размеров в 2,2-2,3 раза. Средний линейный размер зерна в микроструктуре при этом уменьшается на 21,4 %. Также наблюдается существенное модифицирование кремниевых включений.

Измельчение структуры силумина при модифицировании порошком TiAl сопровождается заметным повышением средних значений его твёрдости: от 66,74 HV до 80,45 HV (на 20,5 %).

1. Куцова В. З. Структура, фазовый состав и свойства сплава АК7ч с добавками стронция, титана и бора / В. З. Куцова, А. С. Елагин // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2010. – № 53. – С. 52 – 57.
2. Троцан А. И. Модифицирование железоуглеродистых расплавов дисперсными порошками / А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий, В. В. Каверинский. – Саарбрюккен: «LAP Lambert Academic Publishing. GmbH & Co. KG», 2012. – 182 с.
3. Троцан А. И. Влияние фракционного состава порошка TiAl на его эффективность в качестве модификатора для алюминиевого литья / А. И. Троцан, В.В. Каверинский, И.Л. Бродецкий, З. П. Сухенко // Металл и литьё Украины. – 2015. – №1. – С. 1 – 6
4. Пат. 69720 Україна, МПК С22С 1/06. Рафінувально -модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Н. В. Широкобокова, О. А. Мігяєв, І. П. Вовчок, С. В. Кюрчев, О. С. Колодій; заявник і патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т; заявл. 31.10.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 6 с.
5. Монфольдо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Монфольдо. – М.: Металлургия. – 1979. – 640 с
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 1. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение. – 1996. – 992 с.

Стаття прийнята до редакції 28.04.2015.