

4. Datasheet for Sinclair RW3-0.060 reaction wheel [Электронный ресурс] // sinclairinterplanetary.com: портал по предоставлению услуг разработки и продажи оборудования для космических аппаратов. Доступен с <https://78462f86>.

Надійшла до редакції 06.07.2017

УДК 669.14.44

О.В. Калінін, З.В. Щурко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Наразі актуальним стає вивчення особливостей структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів, оброблених нанодисперсними модифікаторами. Проведено аналіз існуючих модифікаторів алюмінієвих сплавів системи Al-Si. На основі класичної теорії модифікування обрано тип тугоплавкого модифікатора - порошок карбиду кремнію SiC розміром частинок 50 ... 100 нм. Розроблено технологію введення модифікатора в розплав. Проведено дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів АЛ4, АЛ4С. Встановлено критерії вибору нанодисперсного модифікатора SiC. Наведено термічно-часові параметри модифікування. Отримано ефект подрібнення дендритних структури модифікованих сплавів. Досягнуто однорідну дрібнозернисту структуру виливків та модифікованого сплаву АЛ4. Підвищено технологічні і механічні властивості промислових алюмінієвих сплавів, знижена газонасиченість.

Ключові слова: *алюмінієві сплави, нанодисперсний модифікатор, виливок, властивості, структура.*

Сегодня актуальным становится изучение особенностей структуры и свойств литейных алюминиевых сплавов, обработанных нанодисперсными модификаторами. Проведен анализ существующих модификаторов алюминиевых сплавов системы Al-Si. На основе классической теории модифицирования выбран тип тугоплавкого модификатора - порошок карбида кремния SiC размером частиц 50 ... 100 нм. Разработана технология введения модификатора в расплав. Проведены опытно-промышленные плавки алюминиевых сплавов АЛ4, АЛ4С. Установлены критерии выбора нанодисперсного модификатора SiC. Приведены термически-временные параметры модификации. Получен эффект измельчения дендритных структуры модифицированных сплавов. Достигнута однородная мелкозернистость структуры отливок и модифицированного сплава АЛ4. Повышены технологические и механические свойства промышленных алюминиевых сплавов, снижена газонасыщенность.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, нанодисперсний модифікатор, отливка, свойства, структура.*

The purpose of this work is studying of features of structure and properties of the foundry aluminum alloys processed by nanodisperse modifiers. The analysis of the existing modifiers of aluminum alloys of Al-Si system is carried out. On the basis of the classical theory of modifying the type of the refractory modifier – carbide silicon as SiC of particles in size 50...100 nanometers it was offered. The technology of input of the modifier in fusion is developed. It is carried out industrial experiences of melting of an aluminum alloy AL4, AL4S. Criteria of a choice of the nanodispersive SiC modifier are established. Thermotemporary parameters of modifying are laid. The effect of crushing of dendrit's structure of the modified alloys is received. The uniform fine-grained structure of castings from the modified AL4 alloy is reached. Technological properties the industrial aluminum alloys are increased, mechanical properties is reduced.

Keywords: *aluminum alloys, nanodispersion modifier, casting, properties, structure.*

Постановка проблеми. Підвищення якості і властивостей виробів відповідального призначення не може бути вирішено без розробки нових і вдосконалених існуючих технологічних процесів виробництва сплавів на основі алюмінію. До відливок з алюмінієвих сплавів, що входять до складу турбонасосних агрегатів, насосів палива пред'являють вимоги, що поєднують герметичність, низьку пористість, високий комплекс механічних властивостей [1-3]. При отриманні ливарних алюмінієвих сплавів важливим етапом є процес плавки і обробки розплавів. Саме на цих стадіях ефективно використовуються операції модифікування та рафінування розплавів [2, 5, 6].

Однак відсутність адаптації виливків до механічної обробки стримує широке застосування алюмінієвих сплавів як конструкційних матеріалів. Низька технологічність пояснюється наявністю в сплавах крихких і важкорозчинних фаз: $FeAl_3$, Mg_2Si , $MgZn_2$, що виникають у вигляді великих кластерів і формують безперервну сітку [1]. Ці крихкі фази є причиною утворення тріщин при литті злитків і фасонних виливків. Крім того, вони сприяють уповільненню дифузійних процесів розчинення інтерметалідів при гомогенізації виливків [3]. Великим недоліком є висока газонасиченість ливарних сплавів.

Розвиток сучасних технологій вимагає створення нових матеріалів і удосконалення існуючих сплавів. Одним з ефективних способів підвищення якості виливків, подрібнення зерна і отримання однорідної структури є модифікування [5].

Промислові підприємства застосовують модифікування ливарних алюмінієвих сплавів солями натрію, що сприяє диференціації евтектики Al-Si. Однак легкоплавкі солі натрію не екологічні і не застосовні для обробки великих мас розплавів.

Перспективним напрямком при модифікуванні є використання дисперсних тугоплавких модифікаторів: карбідів, нітридів, боридів, чистих металів з розміром частинок 0,1 ... 1 мкм [9-11]. При модифікуванні ливарних алюмінієвих сплавів дисперсними частками карбиду кремнію розміром до 1 мкм відзначено підвищення технологічних і механічних властивостей сплавів і корозійної стійкості [3, 7].

Теоретичні основи модифікування викладені в основоположних роботах М.В. Мальцева [2]. В даний час існує декілька теорій модифікування, вони пояснюють певні сторони процесу модифікування алюмінієвих сплавів, але не характеризують його повністю. Це обумовлено складністю процесу і його залежністю від умов плавки і лиття, а також впливом неконтрольованих домішок і взаємодією компонентів які вводяться і які можуть як посилювати, так і послаблювати дію модифікаторів.

Всі речовини, що мають меншу електронегативність і менший ефективний іонізаційний потенціал (U_{me}), ніж металева основа сплаву, матимуть модифікуючий вплив на процес кристалізації [7, 9, 11].

Матеріали, що мають більше значення U_{me} - металевої основи сплаву, матимуть негативний вплив. Це відбувається тому, що чим нижче значення іонізаційного потенціалу, тим легше елемент віддає свої валентні електрони матриці і навпаки. Фактор, який характеризує здатність речовини впливати на процес кристалізації, слід розглядати як фактор розчинності домішок в матриці. Модифікатор повинен розташовуватися на межі кристалів і кластерів, але не входити до складу матричного сплаву.

Модифікатор не повинен утворювати свої власні кластери. Елемент, що має властивості модифікатора, повинен мати низьку розчинність в твердому стані і обмежену в рідкому. На основі коефіцієнтів зміни активності різних елементів найбільш потужними модифікаторами алюмінію і його сплавів є: Ge, La, Sr, Ti, Sc і їх з'єднання. Вивчено вплив перехідних металів: Hf, Ta, Ti, V, Nb, Zr на властивості алюмінієвих сплавів [4]. Встановлено що елемент є ефективним модифікатором, якщо на діаграмі стану він має найбільше значення інтервалу кристалізації.

В даний час опубліковано достатню кількість якісних робіт, присвячених модифікації дисперсними частками тугоплавких сполук. У дисперсних системах відображаються особливості стану поверхні, оскільки частка поверхневих атомів в дисперсних частинках є переважаючою. У зв'язку з викладеним, тематика представленої роботи є актуальною для отримання якісних виливків в машинобудуванні.

Результати дослідження та їх обговорення. З метою підвищення якості виливків з алюмінієвих сплавів системи Al-Si в даній роботі проведені дослідно-промислові плавки сплавів АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д. Хімічний склад досліджуваних алюмінієвих сплавів наведено в таблиці 1.

Як показано в роботах [10-12, 13], найбільш ефективним модифікатором алюмінієвих сплавів є порошкові тугоплавкі композиції на основі карбиду SiC розміром менше 1 мкм.

Таблиця 1 Хімічний склад ливарних алюмінієвих сплавів

Сплави	Вміст елементів, % мас							
	Al	Si	Zn	Mg	Sb	Mn	Cu	Fe
АЛ4	основа	10,5	0,3	0,35	-	0,50	0,3	0,4
АЛ4С	основа	10,0	0,3	0,25	0,25	0,35	0,3	0,8
АЛ4Д	основа	7,5	0,3	0,45	-	-	1,2	1,0

У промислових умовах були випробувані порошки титану, нітриду, титану, карбїду кремнію для модифікування сплавів АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д. З метою підвищення якості та технологічності багатокомпонентних сплавів системи Al-Si, поліпшення механічних властивостей проведено модифікування розплавів тонкодисперсними порошками карбїду кремнію модифікації β -SiC розмірами до 100 нм.

Досліджувані сплави є багатокомпонентними, що призводить до можливості зміцнення твердого розчину алюмінію розчиненими легуючими елементами, а також виділенню з пересиченого твердого розчину інтерметалідних фаз, що створює ефект зміцнення при подальшому старінні. Одержуваний модифікатор є тугоплавкий карбід кремнію, який не розчиняється в розплаві, а служить додатковим центром кристалізації. Оптимальну кількість введеного модифікатора визначено експериментально на лабораторних плавках і коливається від 0,07 до 0,1% від маси розплаву.

У таблиці 2 наведені дані впливу якості модифікатора на розмір зерна і пористість виливків.

Таблиця 2

Вплив дисперсних добавок модифікатора SiC на зеренну структуру сплаву АЛ4

Кількість добавок в % від маси розплаву	Розмір зерна сплаву, мкм	
	До модифікування	Після модифікування
0,03	160	95
0,07	130	72
0,10	150	90

Мікроструктура сплаву АК9ч являє собою α -твердий розчин, невелика кількість евтектики і різні інтерметалідні фази: AlSb, MgZn₂, AlFeSi, CuAl₂, які виділяються з пересиченого твердого розчину при подальшому старінні.

Оскільки розчинність водню в рідкому розплаві алюмінію вище, ніж в твердому стані. Це - основна причина газової пористості при затвердінні вилівка. Для зменшення пористості проводили рафінування розплаву

гексахлоретаном. Для усунення вторинної пористості при термічній обробці відливання захищали титановою стружкою.

В роботі запропонований технологічний процес модифікування алюмінієвих сплавів АЛ4 і АЛ4С нанодисперсним порошком карбиду кремнію. Дисперсний порошок β -SiC був вибраний виходячи з відповідності кристалічних решіток Al і SiC (ГПУ решітка) і малої різниці атомних радіусів Al і SiC. Порошок модифікації β -SiC отримано методом плазмохімічного синтезу. Середній гранулометричний склад модифікатора склав 100 нм. Для зручності подачі в розплав використаний таблетований модифікатор.

Були визначені технологічні властивості виливків до і після модифікування. Рідиннотекучість визначали методом пруткової проби. В результаті модифікування підвищена текучість сплавів АЛ4С і АЛ4 на 5 ... 11%. Зміст газів в сплавах визначали за допомогою технологічних проб. При зниженні температури рідкого металу в формі знижується розчинність газів і тим самим збільшується кількість бульбашок газу. Сплави АЛ4 і АЛ4С доевтектичного і евтектичного складу мають гарну рідиннотекучість, що зменшує ймовірність утворення в виливках газових раковин.

Сплави виплавляли в електричній печі опору САТ - 0,15 ємністю 150 кг. Після розплавлення лігатури Al-Mg, Al-Mn сплави перегрівали до температури 720 ... 760°C і піддавали модифікації. Навішування модифікатора вводили в нижню частину тигля і механічно перемішували. Результати оцінки газовмісту зразків (табл. 3) показали, що модифікування сплавів забезпечує низький газовміст, відповідний 1 балу пористості виливків з алюмінієвих сплавів по ДСТУ 2839-94.

Роботи, проведені в промислових умовах, показали підвищення механічних властивостей модифікованих ливарних алюмінієвих сплавів АЛ4-М і АЛ4С до 270 МПа, що на 25% вище міцності властивостей немодифікованих сплавів.

Таблиця 3
Результати визначення газовмісту і рідиннотекучесті сплавів

Досліджені сплави	Пористість, бал	Рідиннотекучість, мм
АЛ4	3	385
АЛ4-М	1	377
АЛ4С	1	225
АЛ4Д	1	250

Висновки

1. Обґрунтовано вибір типу модифікатора ливарних алюмінієвих сплавів - порошкової композиції карбиду кремнію модифікації β -SiC середнім розміром частинок 50 ... 100 нм. Проведено промислові плавки сплавів АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д із застосуванням таблетованого модифікатора.

2. Вивчено технологічні властивості сплавів. В модифікованих сплавах знижена пористість з 3-го до 1-го бала і підвищена рідиннотекучість на 5 ... 11%.

3. В результаті модифікування отримана однорідна дисперсна структура виливків і досягнуто підвищення міцності властивостей на 25% в порівнянні з не модифікованим станом.

Бібліографічні посилання

1. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 365с.

2. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – Москва: Металлургия, 1964. – 214 с.

3. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. – М.: Металлургия, 1975. -125с.

4. Куцова В.З. Вплив легування комплексом GeP на структуру та властивості сплавів системи Si-Ge / В. З. Куцова, О.А. Носко, О. В. Олійник //Вісник ДНУ. – 2010. - Вип. 74. – С. 120-126.

5. Іщенко А.Я. Зварювання сучасних конструкцій із алюмінієвих сплавів / А.Я. Іщенко, Т.М. Лабур. – Київ: Наукова думка, 2013. – 405с.

6.Калинина Н.Е. Особенности модифицирования алюминиевых сплавов Al-Mg / Н.Е. Калинина, З.В. Вилищук // Авиационно-космические материалы и технологии. – 2011. - №7(84). – С.80-84.

7. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б.М. Неменюк. – Ленинград : Технопринт, 1999. – 272 с.

8. Богуслаев В. О., Качан О. Я., Калініна Н. Є. Авіаційно-космічні матеріали та технології : підручник для вузів. – Запоріжжя : Мотор Січ, 2010. – 385с.

9. Андриевский Р. А. Наноматериалы : концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский //Рос. хим. журнал. – 2002. - №5. – С. 50-56.

10. Калинина Н. Е. Дисперсное модифицирование литейных алюминиевых сплавов / Н. Е. Калинина, О. А. Ковац //Вісник ДНУ. -2007. - №9/2. – С.27-31

11. Патент 28570 України, МПК С22С//00. Склад для модифікування алюмінієвих сплавів / Кавац О. А., Калініна Н. Е., Кавац Д. А., Федючук О. К. : Заявка ДПВО Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова. № 200709846; заявл. 03.09.07; опубл. 10.12.07; Бюл. №20, 8с.

12. Вилищук З. В. Влияние модифицирования на фазовый состав высокопрочных алюминиевых сплавов / З. В. Вилищук, Н. Е. Калинина / Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПГАСА, 2010. – С. 39-44.

13. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва : Физматлит, 2005. – 426 с.

Надійшла до редакції 25.07.2017