

УДК 669.715

Н.Є. Калініна<sup>1</sup>, А.В. Давидюк<sup>1</sup>, В.Т. Калінін<sup>2</sup>, Т.В. Носова<sup>1</sup>, С.І. Мамчур<sup>1</sup>  
І.С. Савченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
<sup>2</sup>Національна металургійна академія України

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, МОДИФІКОВАНИХ ДИСПЕРСНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

Вивчено вплив модифікування дисперсними композиціями на зеренну структуру та механічні властивості промислових алюмінієвих сплавів. Алюмінієві сплави систем Al-Si, Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mn модифікували дисперсним порошком SiC розміром часток до 200 нм. Розрахована кількість модифікатора для введення у розплав. Вивчено фізико-хімічні властивості дисперсного SiC. Проведені плавки сплавів AL4S, 1570, 2219, АК9ч у вихідному стані та з обробкою розплавів SiC. Встановлено залежності розміру частинок та кількості модифікатора на механічні властивості сплавів. Встановлено механізм взаємодії модифікатора з алюмінієвим розплавом під час кристалізації. У промислових експериментах встановлено найбільш ефективний розмір часток SiC для підвищення  $\sigma_T$  сплаву АК9ч зі 115 до 260 МПа у литому стані. Визначено оптимальний вміст SiC (0,10%) для підвищення  $\sigma_T$  алюмінієвих сплавів.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, структура, механічні властивості, дисперсний модифікатор.

Изучено влияние модифицирования дисперсными композициями на зеренную структуру и механические свойства промышленных алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы систем Al-Si, Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mn модифицировали дисперсным порошком SiC размером частиц до 200 нм. Рассчитано количество модификатора для ввода в расплав. Изучены физико-химические свойства дисперсного SiC. Проведено плавки сплавов АМг6, 1570, 2219, АК9ч в исходном состоянии и с обработкой расплавов SiC. Установлены зависимости размера частиц и количества модификатора на механические свойства сплавов. Установлен механизм взаимодействия модификатора с алюминиевым расплавом при кристаллизации. В промышленных экспериментах установлено наиболее эффективный размер частиц SiC для повышения  $\sigma_T$  сплава АК9ч со 115 до 260 МПа в литом состоянии. Определено оптимальное содержание SiC (0,10%) для повышения  $\sigma_T$  алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав, структура, механические свойства, дисперсный модификатор.

The effect of modifying dispersed compositions on the grain structure and mechanical properties of industrial aluminum alloys is studied. Aluminum alloys of the Al-Mg, Al-Mg-Sc systems were modified with dispersed SiC powder with a particle size of up to 200 nm. Calculated the amount of modifier to enter into the melt. The physicochemical properties of dispersed SiC were studied. The melting of alloys AL4S, 1570, 2219, АК9ch in the initial state and with the processing of SiC melts was carried out. The dependences of the particle size and amount of the modifier on the mechanical properties of the alloys are established.

**The mechanism of interaction of the modifier with the aluminum melt during crystallization is established. In industrial experiments, the most effective particle size of SiC was found to increase the  $\sigma_T$  of the AK9ch alloy from 115 to 260 MPa in the cast state. The optimal SiC content (0,10%) was determined to increase the  $\sigma_t$  of aluminum alloys.**

**Keywords:** *aluminum alloy, structure, mechanical properties, disperse modifier.*

**Вступ.** Створення дисперсних матеріалів безпосередньо пов'язано з розробкою і застосуванням нанотехнологій. На установках плазмохімічного синтезу можна отримувати широкий спектр нанодисперсних сполук, а саме: карбіди, нітриди, карбонітриди, силіциди різних елементів (Si, Al, Ti, V, Mo, W та ін.), а також нанодисперсні порошки чистих металів [1-3].

У вітчизняній ракетно-космічній техніці широко застосовують нержавіючі сталі, ливарні і деформовані алюмінієві та магнієві сплави, ливарні нікелеві сплави. Для деталей ракетно-космічної техніки (РКТ) можуть бути корисні перспективні напрямки з обробки наномодифікаторами сплавів різних систем легування.

**Постановка задачі.** Встановити вплив модифікування дисперсними композиціями на зеренну структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів.

**Методика досліджень і аналіз отриманих результатів.** Матеріалом дослідження є алюмінієві сплави систем Al-Si, Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mn, АЛ4С, 1570, 2219, АК9ч. Запропоновано модифікування алюмінієвих сплавів дисперсним порошком карбіду кремнію SiC розміром часток до 200 нм. Дисперсний SiC отримано методом плазмохімічного синтезу. Проведені дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів. Досліджено структуру та механічні властивості сплавів у литому та деформованому стані.

З урахуванням принципу про кристалографічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоплавких сполук [7, 8] встановили, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбіди кремнію, ніобію і танталу, а також карбіди і нітриди титану, цирконію, гафнію і ванадію. Як ефективний модифікатор ливарних алюмінієвих сплавів запропоновано нанодисперсний порошок карбіду кремнію SiC розміром часток до 200 нм [5], який отримано методом високотемпературного плазмохімічного синтезу [4].

Карбід кремнію існує у двох алотропічних модифікаціях:  $\beta$ -SiC і  $\alpha$ -SiC. Кристали  $\beta$ -SiC мають кубічну будову з алмазоподібною решіткою сфалериту з параметром  $a = 0,4360$  нм [9]. Кристали  $\alpha$ -SiC у широких межах проявляють політипізм. В основі їх будови існує гексагональна і ромбоедрична решітки. Хімічний склад тонкодисперсного  $\beta$ -SiC, мас. %: 68,5 Si; 30,5 C; 1,0 N. Перехід  $\beta$ -SiC  $\rightarrow$   $\alpha$ -SiC відбувається при 2100°C і супроводжується зміною об'єму на 0,06%. Нанодисперсні частинки карбіду кремнію розмірами до 200 нм є хорошими геттерами, матеріалами з розвиненою вільною поверхнею [6, 7].

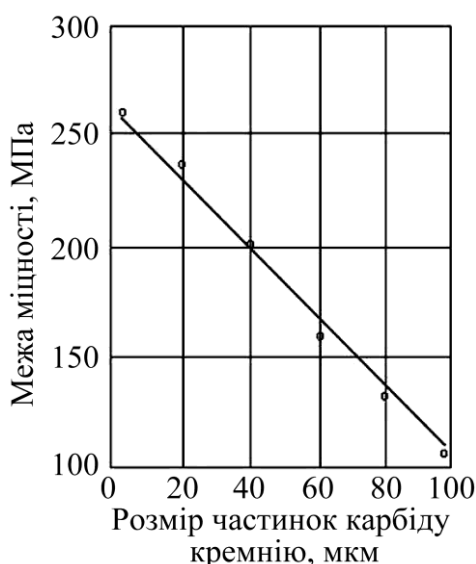
Високі фізико-механічні характеристики  $\beta$ -SiC пояснюють міжатомним зв'язком. Атоми в карбіді кремнію пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найбільш сильним у природі і обумовлює в кристалах високу

температуру плавлення, твердість і хімічну тривкість. Кристал SiC складається з атомів двох видів, що мають різну спорідненість до електрону, причому атом кожного сорту оточений чотирма атомами іншого сорту. Тому поряд з ковалентним зв'язком тут є деяка частка гетерополярного зв'язку [8].

Дія нерозчинних додатків, ізоморфних до алюмінію, аналогічність впливу розчинних елементів дотримується лише тоді, коли кількість нерозчинного додатку перевищує кількість кристалів, що утворилися довільно за тих самих умов [3, 5]. Таким чином, зі збільшенням кількості нерозчинного додатку, зокрема частинок карбіду кремнію, розмір зерна спочатку зменшується, а потім буде постійним.

Механізм впливу дисперсних частинок карбіду кремнію на формування структури доевтектичних алюмінієвих сплавів під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу і бере участь у подрібненні структурних складових сплаву. Частинки карбіду кремнію сприяють також дисперсному зміцненню сплаву, так як дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності ливарних алюмінієвих сплавів.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти з застосуванням дисперсних частинок SiC у широкому діапазоні розмірів 0,075...0,100; 10...20; 30...40; 50...60 і 90...100 мкм виявили, що зі зменшенням розмірів частинок карбіду кремнію до 100 нм межа міцності сплаву АК9ч зростає з 115 до 260 МПа (рис. 1).



**Рис. 1. Вплив розмірів частинок SiC на міцність сплаву АК9ч**

Для визначення оптимальної кількості модифікатора карбіду кремнію виконали промислові плавки та випробування зразків, що пройшли термічну обробку за режимом Т6 (гартування і штучне старіння).

Для комп'ютерної обробки даних складу сплавів і вмісту модифікаторів використали програму Microsoft Excel. Аналіз результатів засвідчив, що модифікування частинками карбиду кремнію в кількості 0,1 мас. % максимально підвищує пластичність ( $\delta$ ) сплаву АК9ч (рис. 2) за одночасного збільшення межі міцності ( $\sigma_B$ ) і межі текучості ( $\sigma_T$ ).

Подальше збільшення кількості модифікатора SiC від 0,10 до 0,25% в сплаві АК9ч суттєво не впливає на механічні властивості, а за вмісту більше 0,25% SiC незначно знижується параметр  $\sigma_B$  (рис. 3). Незначне зниження межі плинності сплаву АК9ч спостерігали під час введення більше 0,1 мас. % модифікатора SiC.

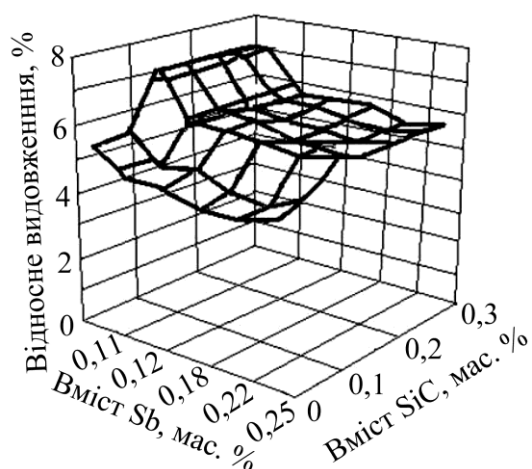


Рис. 2. Зміна відносного видовження модифікованого сплаву АЛ4С залежно від вмісту SiC.

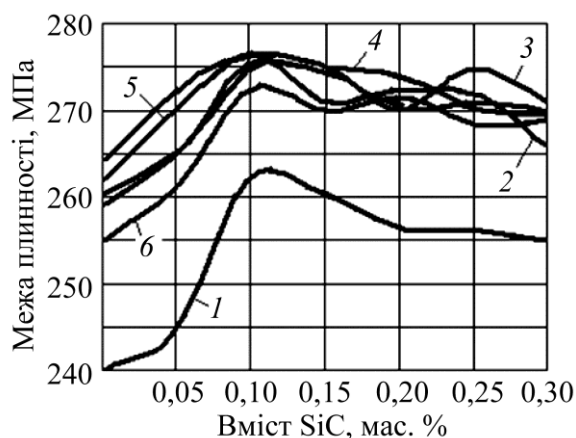


Рис. 3. Залежність межі міцності модифікованого сплаву АЛ4С від вмісту SiC за різного вмісту Sb: 1 – 0%; 2 – 0,11; 3 – 0,12; 4 – 0,18; 5 – 0,22; 6 – 0,25%

Таким чином, механічні характеристики ливарного алюмінієвого сплаву АК9ч значно підвищуються з введенням у розплав 0,1 мас. % нанодисперсних частинок карбиду кремнію. Якість ливарних алюмінієвих сплавів під час модифікування залежить від багатьох чинників: природи дисперсної фази, температури розплаву, режимів його перемішування під час введення частинок. Під час вивчення впливу температури на ступінь засвоєння тугоплавких частинок SiC встановлено, що за певної для даного розплаву температури спостерігається максимум засвоєння частинок. Характерною особливістю результатів досліджень, виконаних з різними тугоплавкими композиціями в алюмінієвих сплавах, є досягнення максимуму засвоєння частинок за нижнього значення температури розплавів.

**Висновки.** Вивчено фізико-хімічні властивості дисперсного модифікатора - карбиду кремнію SiC. Проведено промислові плавки сплавів АЛ4С, 1570, 2219, АК9ч у вихідному стані та з обробкою розплавів порошковим модифікатором. Встановлено механізм взаємодії дисперсного модифікатора з алюмінієвим розплавом під час кристалізації. В результаті дослідження досягнуто значне подрібнення зернової структури модифікованих сплавів.

Встановлено залежності розміру часток та кількості модифікатора на механічні властивості алюмінієвих сплавів.

### Бібліографічні посилання

1. Большаков В.І., Куцова В.З., Котова Т.В. Наноматеріали і нанотехнології. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2016. – 220 с.
2. Калініна Н.Є., Никифорчин Г.М., Калінін О.В. та ін. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів: Монографія – Львів: Простір. – 2017. – 304 с.
3. Сутугин А.Г. Кинетика образования малых частиц при объемной конденсации // Физикохимия нанодисперсных систем: Сб. тр. Ин-та металлургии им. А.А. Юайкова. – М.: Наука, 1987. – С. 15-21.
4. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов // Черепанов А.А. и др. – Новосибирск: Наука. – 1995. – 344 с.
5. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: Підручник – Львів: Афіша, 2002. – 304 с.
6. Алюміній та сплави на його основі // В.З. Куцова, Н.Е. Погребна, Т.С. Хохлова та ін. – Дніпропетровськ: Пороги. 2004. – 136 с.
7. Костин В.А., Григоренко Г.М., Жуков В.В. Модифицирование структуры сварных швов высокопрочных низколегированных сталей наночастицами тугоплавких металлов // Строительство, материаловедение, машиностроение, 2016. – вып. 89. – С. 93-98.
8. Сабуров В.П., Еремін Е.Н., Черепанов А.А., Миннеланов Г.Н. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. – Омск: ОмГТУ. – 2002. – 257 с.
9. Young- Domd K., Zin-Hyoung L. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys // Mater. Sci. and Eng. – 2003. - №12. – P. 372-376.

*Надійшла до редколегії 24.05.2019*