

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ОБРОБКИ ДИСПЕРСНИМИ МОДИФІКАТОРАМИ

Калінін В.Т.<sup>1</sup>, Калініна Н.Є.<sup>2</sup>, Носова Т.В.<sup>2</sup>, Мамчур С.І.<sup>2</sup>, Цокур Н.І.<sup>2</sup>,  
Серженко І.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національна металургійна академія України

<sup>2</sup>Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

**Анотація.** Вивчено вплив модифікування дисперсними композиціями на зернисту структуру та механічні властивості промислових алюмінієвих сплавів. Алюмінієві сплави АЛ4 і АЛ9 модифікували дисперсним порошком  $Mg_2Si$  розміром часток до 200 нм. Розрахована кількість модифікатора для введення в розплав. Вивчено фізико-хімічні властивості дисперсного  $Mg_2Si$ . Проведені плавки сплавів АЛ4, АЛ9 у вихідному стані та з обробкою розплавів  $Mg_2Si$ . Встановлено вплив розміру частинок та кількості модифікатора на механічні властивості сплавів. Встановлено механізм взаємодії модифікатора з алюмінієвим розплавом під час кристалізації. У промислових експериментах визначений найбільш ефективний розмір частинок  $Mg_2Si$  для підвищення  $\sigma_6$  сплаву АЛ4 зі 110 до 260 МПа у литому стані. Визначено оптимальний вміст  $Mg_2Si$  (0,10 %) для підвищення  $\sigma_6$  алюмінієвих сплавів.

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

### 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 роботах [5–9] наведено способи модифікування сплавів різного типу композицій. Але відсутні дані з використання модифікаторів у нанодисперсному стані.

У вітчизняному машинобудуванні широко застосовують нержавіючі сталі, ливарні й деформовані алюмінієві та магнієві, титанові та нікелеві сплави. Для відповідальних деталей машинобудування можуть бути корисні перспективні напрями з обробки наномодифікаторами сплавів різних систем легування.

### Аналіз публікацій

Модифікування дисперсними композиціями різних сплавів широко досліджувалося у наукових працях Большакова В.І., Сутугина А.Г., Сабурова В.П., статтях та наукових роботах багатьох видатних учених галузі матеріалознавства. Дослідження модифікування дисперсними композиціями алюмінієвих сплавів є продовженням робіт, пов'язаних з цією тематикою. У роботах [5–9] на-

ведено способи модифікування сплавів різного типу композицій. Але аналіз літературних джерел показав, що недостатньо інформації з використання модифікаторів у нанодисперсному стані.

### Мета і постановка завдання

Метою роботи є встановлення впливу модифікування дисперсними композиціями на структуроутворення та механічні властивості алюмінієвих сплавів. Завдання досліджень: провести дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів; дослідити структуру та механічні властивості сплавів у литому стані до і після модифікування.

### Дослідження впливу модифікування дисперсними композиціями на структуроутворення та механічні властивості алюмінієвих сплавів

Матеріалом дослідження є алюмінієві сплави АЛ4, АЛ9. Дисперсний  $Mg_2Si$  отримано методом плазмохімічного синтезу. Проведені дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів. Досліджено структуру та механічні властивості сплавів у ливарному стані. Хімічний склад досліджених сплавів наведено у табл. 1.

З урахуванням принципу про кристалографічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоп-

лавких сполук [7, 8] встановили, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбід кремнію, ніобію і бору, а також карбід і нітриди титану, цирконію.

Як ефективний модифікатор ливарних алюмінієвих сплавів запропоновано дисперсний порошок  $Mg_2Si$  розміром часток до 200 нм [5], який отримано методом високо-температурного плазмохімічного синтезу [4].

Для нерозчинних домішок, ізоморфних до алюмінію, аналогічність впливу розчинних елементів дотримується лише тоді, коли кількість нерозчинного домішку перевищує кількість кристалів, що утворилися довільно за тих самих умов [3, 5]. Таким чином, зі збільшенням кількості нерозчинного домішку, зокрема частинок  $Mg_2Si$ , розмір зерна спочатку зменшується, а потім буде постійним.

Таблиця 1 – Хімічний склад ливарних сплавів АЛ4, АЛ9

Сплав	Вміст легувальних елементів, % мас.					
	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Al
АЛ4	8,0-10,5	0,2-0,5	0,17-0,3	0,1	1,0	основа
АЛ9	6,0-8,0	0,2-0,5	0,2-0,4	0,2	1,5	основа

Механізм впливу дисперсних частинок  $Mg_2Si$  на формування структури доевтекційних 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  $Mg_2Si$  сприяють також дисперсному зміцненню сплаву, так як дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності ливарних алюмінієвих сплавів.

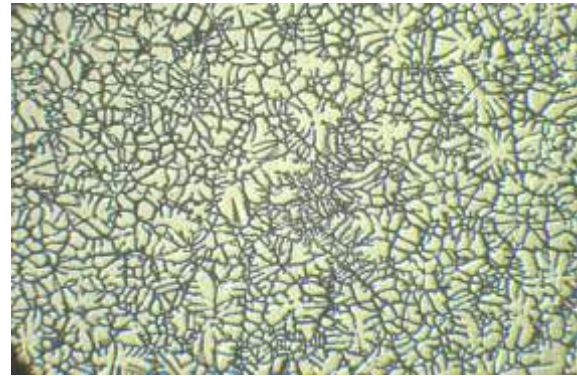
На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти із застосуванням дисперсних частинок у широкому діапазоні розмірів 10...20; 30...40; 50...60 і 90...200 нм виявили, що зі зменшенням розмірів частинок до 100 нм межа міцності сплаву АЛ4 зростає з 110 до 260 МПа. Мікроструктура сплаву АЛ4 до і після модифікування наведена на рис. 1. У вихідному стані виявлено крупнозеренну структуру.

Після модифікування досягнуто подрібнення зерна до 7,6 мкм<sup>2</sup>.

Для визначення оптимальної кількості модифікатора 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  $Mg_2Si$  в кількості 0,1 мас. % максимально підвищує пластичність ( $\delta$ ) сплаву АЛ4 за одночасного збільшення межі міцності ( $\sigma_B$ ) і межі текучості ( $\sigma_T$ ).



а



б

Рис. 1. Мікроструктури сплаву АЛ4 до (а) і після модифікування (б),  $\times 100$

Подальше збільшення кількості модифікатора від 0,10 до 0,25 % у сплаві АЛ4 суттєво не впливає на механічні властивості, а за вмісту, більшому за 0,25 %, незначно знижується параметр  $\sigma_B$ . Незначне зниження межі плинності сплаву АЛ4 спостерігали під час введення більше 0,1 мас. % модифікатора  $Mg_2Si$ .

Отже, механічні характеристики ливарного алюмінієвого сплаву АЛ4 значно підвищуються за рахунок введення у розплав

0,1 мас. % нанодисперсних частинок. Досягнуто такий рівень властивостей сплавів:  $\sigma_b$  – 260 МПа,  $\delta$  – 7,2 %, що на 10 % вище за показники міцності та на 8,2 % вище від показника пластичності сплавів у вихідному стані.

Якість ливарних алюмінієвих сплавів під час модифікування залежить від багатьох чинників: природи дисперсної фази, температури розплаву, режимів його перемішування під час введення частинок. Вивчення впливу температури на ступінь засвоєння тугоплавких частинок  $Mg_2Si$  дозволило встановити, що за певної для цього розплаву температури спостерігається максимум їхнього засвоєння. 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. Проведено промислові плавки ливарних сплавів АЛ4, АЛ9 у вихідному стані та з обробкою розплавів дисперсним порошковим модифікатором.

Установлено механізм взаємодії дисперсного модифікатора з алюмінієвим розплавом під час кристалізації. Унаслідок дослідження досягнуто значне подрібнення зернової структури модифікованих сплавів.

Установлено залежності розміру частинок та кількості модифікатора на механічні властивості ливарних алюмінієвих сплавів.

Одержано наступний рівень властивостей сплавів:  $\sigma_b$  – 260 МПа,  $\delta$  – 7,2 %, що на 10 % вище за показники міцності та на 8,2 % вище, ніж показник пластичності сплавів у вихідному стані.

### Література

1. Большаков В.І., Куцова В.З., Котова Т.В. Наноматеріали і нанотехнології. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2016. – 220 с.
2. Калініна Н.С., 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. – Москва: Наука, 1987. – С. 15–21.
4. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов /

А.А.Черепанов и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 344 с.

5. Кузін О.А., Яцок Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. – Львів: Афіша, 2002. – 304 с.
6. Алюміній та сплави на його основі / В.З. Куцова 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 инкуляторами. – 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.

### References

1. Bolshakov V.I., Kutsova V.Z., Kotova T.V. Nanomaterials and nanotechnology. Dnipropetrovsk: PDABA, 2016. 220 s.
2. Kalinina N.E., Nikiforchin G.M., Kalinin O.V. et al. Structure, properties and use of construction nanomaterials: monograph. Lviv: Prostir, 2017. 304 s.
3. Sutugin A.G. Kinetics of formation of small particles in volume condensation // Physical chemistry of nanodisperse systems: Sb. tr. Institute of Metallurgy named after A.A. Yuykova. M.: Nauka, 1987. S. 15–21.
4. Plasmachemical synthesis of ultradisperse powders and their application for modification of metals and alloys / Cherepanov A.A. et al. Novosibirsk: Nauka, 1995. 344 s.
5. Kuzin O.A., Yatsyuk R.A. Metal science and thermal processing of metals: Textbook. Lviv: Afisha, 2002. 304 s.
6. Aluminum and alloys based on it / V.Z. Kutsova et al. Dnipropetrovsk: Porogi, 2004. 136 s.
7. Kostin V.A., Grigorenko G.M., Zhukov V.V. Modification of the structure of welded joints of high-strength low-alloyed steels with nanoparticles of refractory metals // Construction, materials science, machine building, 2016. Issue 89. S. 93–98.
8. Saburov V.P., Eremin E.N., Cherepanov A.A., Minnelanov G.N. Modification of steels and alloys with dispersion inclusions. Omsk: OmgTU, 2002. 257 s.
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.

**Калінін Василь Тимофійович**, д.т.н. проф., кафедра ливарного виробництва НМетаУ, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com).

**Калініна Наталія Євграфівна**, д.т.н. проф., кафедра технології виробництва ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com).

**Носова Тетяна Валеріївна**, к.т.н., доц., кафедра технології виробництва ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0965706935, [amaretanya0512@gmail.com](mailto:amaretanya0512@gmail.com).

**Мамчур Стелла Ігорівна**, к.т.н., доц., кафедра технології виробництва ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0984112246, [1964stella1965@gmail.com](mailto:1964stella1965@gmail.com).

**Цокур Наталія Іванівна**, аспірант., кафедра технології виробництва ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0980718008, [monicaa@gmail.com](mailto:monicaa@gmail.com).

**Серженко Іванна Олегівна**, аспірант., кафедра ливарного виробництва НМетаУ, пр. Гагаріна, 4, Дніпро 49000, Україна, телефон +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com).

### Features of the structure and properties of aluminum alloys after processing by dispersed modifiers

**Abstract. Goal.** Studying the effect of modification with dispersed compositions on the grain structure and mechanical properties of industrial aluminum alloys is the goal of the work. **Methodology.** Cast aluminum alloys AL4 and AL9 were smelted in an industrial induction furnace. The alloys were modified with dispersed powder of magnesium silicide  $Mg_2Si$  with a particle size of up to 200 nm. The modifier was introduced in tablet form after melting the charge with mechanical stirring of the melt. The amount of modifier to be added to the melt is calculated (0.1%). **Results.** The physicochemical properties of dispersed  $Mg_2Si$  were studied. Experimental melting of AL4 and AL9 casting alloys was carried out. Mechanical properties of alloys were tested and analyzed in the initial state and with processing of  $Mg_2Si$  melts. Dependences of the particle size and the amount of the modifier on the mechanical properties of the alloys have been established. The mechanism of interaction of the modifier with the aluminum melt during crystallization has been established. In industrial experiments, the most effective size of  $Mg_2Si$  particles was established to increase  $\sigma_b$  of alloys from 110 to 260 MPa in the cast state. The optimal content of  $Mg_2Si$  (0.10%) for increasing  $\sigma$  in aluminum alloys has been determined, and grain

refinement in modified alloys and a dispersed structure have been obtained. **Scientific novelty.** The mechanism of action of the dispersed modifier in the melt, which includes the formation of dispersed crystallization centers, has been established. The optimal amount of modifier for melt processing has been determined and the way to enter it. **Practical value.** The values of the strength properties of modified alloys on the size of particles and the amount of modifier have been established. Grain refinement and uniformity of the structural components of the modified alloys have been achieved.

**Key words:** aluminum alloy, structure, mechanical properties, dispersed modifier.

**Kalinin Vasyi Timofeevich**, Doctor of Technical Sciences Prof., Department of Foundry Production NMetaU, Gagarina Ave., 4, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com)

**Kalinina Natalia Evgrafivna**, Ph.D. Prof., Department of Production Technology, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com)

**Nosova Tetyana Valeriivna**, Ph.D., Associate Professor, Department of Production Technology, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0965706935, [amaretanya0512@gmail.com](mailto:amaretanya0512@gmail.com)

**Mamchur Stella Ihorivna**, Ph.D., Associate Professor, Department of Production Technology, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0984112246, [1964stella1965@gmail.com](mailto:1964stella1965@gmail.com)

**Tsokur Natalia Ivanivna**, postgraduate student, Department of Production Technology, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0980718008, [monicaa@gmail.com](mailto:monicaa@gmail.com)

**Serzhenko Ivanna Olehivna**, graduate student, department of foundry production of NMetaU, 4 Gagarina Ave., Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0955502800, [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com)

### Особенности структуры и свойств алюминиевых сплавов после обработки дисперсными модификаторами

**Аннотація.** Изучено влияние модифицирования дисперсными композициями на зернистую структуру и механические свойства промышленных алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы AL4 и AL9 модифицировали дисперсной порошком  $Mg_2Si$  с размером частиц до 200 нм. Рассчитано количество модификатора для ввода в расплав. Изучены физико-химические свойства дисперсного  $Mg_2Si$ . Проведены плавки сплавов AL4, AL9 в исходном состоянии и с обработкой расплавов  $Mg_2Si$ . Установлено влияние размера частиц и количества модификатора на механические свойства сплавов. Установлен механизм взаимодействия модификатора с алюминиевым расплавом при кристаллизации. В промышленных экспе-

*риментах определён наиболее эффективный размер частиц  $Mg_2Si$  для повышения  $\sigma_b$  сплава АЛ4 со 110 до 260 МПа в литом состоянии. Определены оптимальное содержание  $Mg_2Si$  (0,10%) для повышения  $\sigma_b$  алюминиевых сплавов.*

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

**Калинин Василий Тимофеевич**, д.т.н., проф., кафедра литейного производства НМетаУ, пр. Гагарина, 4, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0955502800, kalinina.dnu@gmail.com.

**Калинина Наталия Евграфовна**, д.т.н. проф., кафедра технологии производства ДНУ имени Олесея Гончара, ул. Научная, 1, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0955502800, kalinina.dnu@gmail.com.

**Носова Татьяна Валериевна**, к.т.н., доц., кафедра технологии производства ДНУ имени Олесея Гончара, ул. Научная, 1, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0965706935, amaretanya0512@gmail.com.

**Мамчур Стелла Игоревна**, к.т.н., доц., кафедра технологии производства ДНУ имени Олесея Гончара, ул. Научная, 1, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0984112246, 1964stella1965@gmail.com.

**Цюкур Наталия Ивановна**, аспирант., кафедра технологии производства ДНУ имени Олесея Гончара, ул. Научная, 1, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0980718008, monicaa@gmail.com.

**Серженко Іванна Олеговна**, аспирант, кафедра литейного производства НМетаУ, пр. Гагарина, 4, Днепр 49000, Украина, телефон +38 0955502800, kalinina.dnu@gmail.com.

---