

УДК 669.715

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.83

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ У ПРОЦЕСІ МОДИФІКУВАННЯ ДИСПЕРСНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

Глушкова Д. Б.¹, Демченко С. В.¹, Калініна Н. Є.²¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анотація. Запропоновано модифікування алюмінієвих сплавів комплексним дисперсним модифікатором на основі ZrC плазмохімічного синтезу. Досягнуто здрібнення зерна модифікованих сплавів у 1,5...2 рази, підвищення міцнісних властивостей на 12...18 % та покращення корозійної стійкості. Запропоновано механізм дії комплексного дисперсного модифікатора в алюмінієвому розплаві. Застосування таких модифікаторів полегшує технологічний процес, є екологічно безпечним, сприяє рівномірному розподілу введених композицій, що підвищує міцність сплавів та їх стабільність. Досягнуті результати показали ефективність модифікування алюмінієвих сплавів дисперсними композиціями.

Ключові слова: ливарні та деформовані алюмінієві сплави, комплексний дисперсний модифікатор, зеренна структура, міцнісні властивості, корозійна стійкість.

Вступ

Технологія виготовлення якісних виробів відіграє суттєву роль для розвитку машинобудування та енергетики. Упровадження нових ефективних, менш метало- та енергоємних технологій дасть змогу створювати високопродуктивне, надійне, довговічне й конкурентоспроможне обладнання. Проведено дослідження конструкційних алюмінієвих сплавів систем *Al-Si*, *Al-Mg-Sc*, перспективних для атомної енергетики, з метою можливості використання їх за робочих температур до 500 °C для атомних реакторів.

Проаналізовано публікації з питань модифікування алюмінієвих сплавів [1–4]. У напружених конструкціях машинобудування широко використовуються деформовані алюмінієві сплави систем *Al-Cu-Mg*, *Al-Mg-Sc* для зварних листових конструкцій і теплових труб атомних реакторів і ливарні алюмінієві сплави системи *Al-Si*. Аналіз сучасного стану проблеми механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей конструкційних алюмінієвих сплавів дає змогу зробити висновок про доцільність модифікування розплаву дисперсними тугоплавкими композиціями. Для ефективного застосування модифікаторів необхідно, щоб композиціям були властиві: відповідність фізико-хімічної природи елементів модифікатора та матриці сплавів; ізоморфність кристалічних ґраток; незначна різниця атомних радіусів; відсутність розчинності в основній матриці; висока температура плавлення введеної

композиції, що має певний критичний розмір у разі кристалізації [3].

Перспективні напрями модифікування алюмінієвих сплавів реалізуються в галузі застосування порошкових модифікаторів. Їх використання полегшує технологічний процес, є екологічно безпечним, приводить до рівномірного розподілу введених композицій по перерізу вилівка, що підвищує міцність, пластичні властивості сплавів та їх стабільність. Модифікаторами можуть бути карбіди, нітриди, карбонітриди, силіциди та інші тугоплавкі елементи та сполуки [4, 5, 7, 10].

Мета й постановка завдання

Метою роботи є підвищення механічних властивостей і корозійної стійкості алюмінієвих сплавів у процесі модифікування дисперсними композиціями. Для досягнення мети поставлені такі завдання: дослідити комплекс механічних властивостей, необхідні технологічні характеристики, корозійну стійкість і структуру сплавів до і після модифікування.

У машинобудуванні для деталей відповідального призначення застосовують алюмінієві сплави систем *Al-Si*, *Al-Mg-Sc*. Такі сплави мають достатні показники механічних властивостей, пластичність, деформованість, зварюваність, що зумовлює їх перспективність для відповідальних конструкцій. Однак застосування алюмінієвих сплавів ускладнюється одночасним розвитком різних видів корозії в процесі експлуатації.

З огляду на високі вимоги, що висуваються до продукції машинобудування та атомної техніки, промислові підприємства України застосовують модифікування ливарних алюмінієвих сплавів солями натрію. Однак легкоплавкі солі натрію не технологічні для оброблення масивних розплавів, оскільки нетривалий час дії модифікатора не дає змоги досягти необхідне подрібнення зерна й підвищення механічних і технологічних характеристик сплавів. Перспективним напрямом покращення якості та властивостей алюмінієвих сплавів є застосування дисперсних тугоплавких модифікаторів на основі карбідів, нітридів, боридів, чистих металів розмірами частинок до 100 нм [9, 11].

Матеріали й методи досліджень

У цій роботі досліджувалися механічні та корозійні властивості сплавів ливарного сплаву АЛ9 системи *Al-Si* та деформований сплав 1571 системи *Al-Mg-Sc* до і після модифікування. Хімічний склад зазначених сплавів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів АЛ9 та 1571

Сплав	Al	Si	Mg	Cu	Sc	Zn
АЛ9	основа	6,2	0,4	0,1	-	0,2
1571	основа	-	9,3	0,1	0,35	0,15

З метою покращення якості та технологічності алюмінієвих сплавів проведено модифікування їх розплавів сумішшю тонкодисперсними порошками на основі силіциду магнію та карбиду кремнію середнім розміром частинок до 100 нм. Дисперсні порошки *ZrC* отримані методом плазмохімічного синтезу.

Для визначення корозійної стійкості модифікованих алюмінієвих сплавів проведені випробування на загальну, міжкристалітну й розшарувальну корозію, а також корозійне розтріскування.

Результати та їх обговорення

Проведено дослідні плавлення сплавів АЛ9 та 1571 у вихідному та модифікованому стані. Дисперсні модифікатори були обрані з огляду на ізоморфність кристалічних ґраток алюмінію та *ZrC* (г.ц.к.) і малої різниці атомних радіусів з матрицею.

Роль дисперсних домішок-модифікаторів зводиться до створення в розплаві додаткових штучних центрів кристалізації. Для цього такі домішки мають бути співмірні з критичними зародками матричної фази сплавів і

забезпечувати достатню їх кількість для отримання в процесі лиття дрібнодисперсної структури.

Для визначення оптимальної кількості комплексного модифікатора на основі *Mg₂Si+SiC* виконали дослідні плавлення та випробування зразків, що пройшли термоміцньювальне оброблення.

Структуру сплавів досліджували методом стереометричної мікроскопії. Зеренна структура сплаву АЛ9 наведена на рис. 1.

Середній розмір зерна визначали методом стереометричної металографії. До модифікування розмір зерна становив 15,6...16,9 мкм, після модифікування – 7,6...11,2 мкм. Отже, розмір подрібнення зерна в модифікованому стані в 1,5–2 рази менший ніж у вихідному стані.

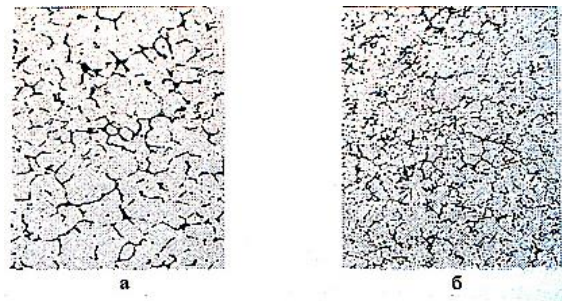


Рис. 1. Зеренна структура сплаву АЛ9: а – до модифікування; б – після модифікування, $\times 100$

На міцнісні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти із застосуванням дисперсних частинок *ZrC* у широкому діапазоні розмірів 50–100 нм. Під час дослідно-промислових експериментів були проведені механічні випробування для визначення міцнісних властивостей у процесі розтягування зразків із різним вмістом комплексного модифікатора.

Результати випробувань подані в табл. 2.

Виявлено, що максимальні значення $\sigma_{0,2}$ і σ_{∞} відповідають оптимальному вмісту порошкової композиції: 0,10 % з подальшим збільшенням модифікатора, міцнісні властивості знижуються, у цьому разі підвищення міцнісних властивостей модифікованого сплаву становить 12...18 % порівняно з вихідним станом.

Відповідно до показників, наведених у табл. 2, побудована залежність межі плинності модифікованого сплаву 1571 від змісту модифікатора (рис. 2).

Таблиця 2 – Межа плинності зразків сплаву 1571 з різним вмістом ZrC

№ плав-лення	Вміст ZrC , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа
1	вихідний стан	344	384
2	0,05	376	415
3	0,10	408	446
4	0,15	360	402

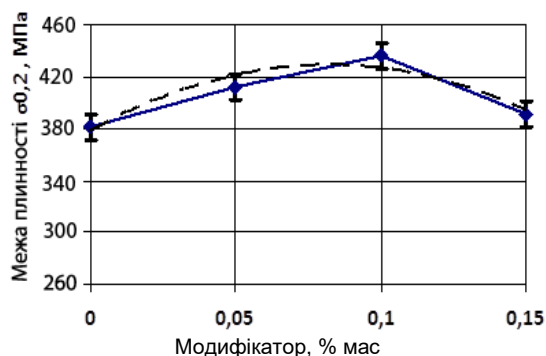


Рис. 2. Залежність межі плинності модифікованого сплаву 1571 від вмісту модифікатора, де пунктирна лінія позначає стан після термооброблення, а суцільна – до термічного оброблення

Термозміцнювальне оброблення передбачає гартування та штучне старіння. Максимальні значення межі плинності отримані за вмістом комплексного модифікатора 0,1 % мас. У цьому разі межа плинності модифікованого сплаву 1571 підвищена до 446 МПа, що становить 18 % порівняно з вихідним станом. Межа міцності модифікованого сплаву підвищена на 12 % порівняно з вихідним станом.

Для отримання порівняльних показників щодо корозійної стійкості сплавів проводили випробування на загальну корозію за стандартною методикою. Для імітації умов експлу-

атації був обраний метод випробувань в умовах 100%-ї відносної вологості, а також метод періодичного впливу 3%-го розчину $NaCl$ за кімнатної температури. Корозійну стійкість алюмінієвих сплавів оцінювали металографічним методом і за зміною маси зразків. Міжкристалітну корозію (МКК) визначали відповідно до стандартної методики [5, 9].

Результати випробувань на загальну корозію показали, що модифікування комплексним модифікатором ZrC призводить до підвищення корозійної стійкості сплавів способом зниження швидкості корозії. Швидкість корозії сплаву АЛ9 в модифікованому стані знижено з $11,04 \cdot 10^{-6}$ до $9,84 \cdot 10^{-6}$ $kg/m^2 \cdot дб$, що становить 18 %. Підвищення корозійної стійкості можна пояснити зміною структури сплавів. У процесі модифікування збільшується протяжність міжфазних границь. Інтерметаліди й домішкові атоми, розташовані на міжфазних границях у сплавах до модифікування, розподіляються після модифікування на більшій площі. Отже, завдяки домішкам зменшуватиметься негативний вплив на корозійну стійкість сплавів. Важливу роль відіграє і напружений стан модифікованої структури [6, 8]. За умови введення дисперсних частинок ZrC мікрооб'єми сплавів стають більш енергетично напруженими, що підвищує корозійну стійкість системи.

Чутливість сплавів до МКК з'являється внаслідок структурної неоднорідності меж зерен, виділення вторинних фаз, збіднення або збагачення прилеглих ділянок $\alpha-Al$ твердого розчину легуючими елементами. У модифікованому ливарному (АЛ9) і деформованому (1571) сплавах схильність до МКК не виявлена. Корозійне розтріскування оцінювалось на основному металі та зварному шві, виконаному аргонно-дуговим зварюванням. Результати випробувань наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Показники корозійного розтріскування сплавів АЛ9 і 1571

Сплав	Корозійне розтріскування			
	основний метал		зварений шов	
	напруга, МПа	тривалість випробування до розтріскування, дб	напруга, МПа	тривалість випробування до розтріскування, дб
АЛ9 вихідний	0,9	40	200	40
АЛ9 модиф.	0,9	понад 45	250	45
1571 вихідний	0,8	45	220	45
1571 модиф.	0,9	понад 55	250	60

З'ясовано, що модифіковані алюмінієві зразки виявляють корозійну стійкість більш тривалий час експлуатації.

Висновки

1. Запропоновано застосування модифікатора ZrC дисперсних композицій ZrC плазмохімічного синтезу.
2. Досліджено структури, корозійні властивості та міцності алюмінієвого ливарного сплаву АЛ9 системи $Al-Si$ та деформованого сплаву 1571 системи $Al-Mg-Sc$ до та після модифікування.
3. У модифікованих сплавах досягнуто подрібнення зернової структури в 2–2,2 раза та підвищення характеристик міцності на 12...18 % порівняно з вихідним станом. Запропоновано механізм дії дисперсного модифікатора в розплаві.
4. Досягнута висока корозійна стійкість модифікованих сплавів протягом тривалого часу експлуатації за умови зменшення швидкості корозії модифікованих сплавів на 18 %.
5. Досягнуті результати показали ефективність модифікування алюмінієвих сплавів дисперсними композиціями.

Література

1. Мільман Ю.В. Вплив скандію на структуру, механічні властивості і опір корозії сплавів алюмінію. Прогресивні матеріали та технології. Київ: Академперіодика, 2003. Т. 1. С. 335–360.
2. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys / N.E. Kalinina et al. *Functional Materials*. 2019. № 3 (26). P. 514–518.
3. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4 (140). P. 125–130.
4. Increasing the corrosion resistance of heatresistant alloys for parts of power equipment / V.S. Vahrusheva et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4 (140). P. 137–140.
5. Куцова В.З., Погребна Н.Є., Хохлова Т.С. Алюміній та його сплави. Дніпро: Пороги, 2014. С. 146.
6. Мільман Ю.В., Коржова Н.П., Сірко А.І. Алюміній та його сплави / Неорганічні матеріали. Метали і технології. Київ: Наукова думка, 2008. Т. 2. Кн. 1. С. 52–68.
7. Gradl P., Mireles O., Andrews N. Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems. *AIAA Propulsion and Energy Forum 2019*. Indianapolis, IN. August 20. 2019. P. 345–350.
8. Іщенко А.Я. Алюмінієві високоміцні сплави для зварних конструкцій. Прогресивні матеріали і технології. Київ: Академперіодика, 2003. Т. 1. С. 50–82.
9. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welded joints / D.B. Hlushkova et al. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. № 28 (1). P. 34–41.
10. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys / D.B. Hlushkova et al. *Functional Materials*. 2023. № 1 (30). P. 74–78.
11. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів: монографія / Н.Є. Калініна та ін. Львів: Простір-М, 2017. 385 с.

References

1. Milman, Yu.V. (2003). The influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Progressive materials and technologies*, vol. 1, Kyiv, pp. 335–360.
2. Kalinina, N.E., Glushkova, D.B., Voronkov, A.I., Kalinin, V.T. (2019). Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*, no. 3 (26), pp. 514–518.
3. Hlushkova, D.B., Bagrov, V.A., Demchenko, S.V., Volchuk, V.M., Kalinin, O.V., Kalinina, N.E. (2022). Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), pp. 125–130.
4. Vahrusheva, V.S., Hlushkova, D.B., Volchuk, V.M., Nosova, T.V., Mamhur, S.I., Tsokur, N.I., Bagrov, V.A., Demchenko, S.V., Ryzhkov, Yu.V., Scrypnikov, V.O. (2022). Increasing the corrosion resistance of heatresistant alloys for parts of power equipment. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), pp. 137–140.
5. Kutsova, V.Z., Pogrebna, N.E., Khokhlova, T.S. (2014). Aluminum and its alloys. Dnipro, pp. 146.
6. Milman, Y.V., Korzhova, N.P., Sirko, A.I. (2008). Aluminum and its alloys / Inorganic materials. Metals and technologies, Kyiv, t. 2, book 1, pp. 52–68.
7. Gradl, P., Mireles, O., Andrews, N. (2019). Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems. *AIAA Propulsion and Energy Forum 2019*. Indianapolis, IN, august 20, pp. 345–350.
8. Ishchenko, A.Ya. (2003). High-strength aluminum alloys for welded structures. *Progressive materials and technologies*, Kyiv, t. 1, pp. 50–82.
9. Hlushkova, D.B., Dzhur, Y.O., Khodyrev, S.Ya., Kalinin, V.T., Polishko, S.A. (2020). Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welded joints. *Journal of Chemistry and Technologies*, no. 28 (1), pp. 34–41.

10. Hlushkova, D.B., Bagrov, V.A., Volchuk, V.M., Murzakhmetova, U.A. (2023). Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*, no. 1 (30), pp. 74–78.
11. Kalinina, N.E., Nikiforchyn, H.M., Kalinin, O.V., Marukha, V.I., Kyryliv, V.I. (2017). Structure, properties and use of structural nanomaterials: monography, Lviv, 385 p.

Глушкова Діана Борисівна¹, д.т.н, проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, e-mail: diana.borisovna@gmail.com, тел. +38097-481-15-93,

Демченко Сергій Володимирович¹, науковий співробітник, e-mail: dsvpochta@gmail.com, тел. 067-577-98-70,

Калініна Наталія Євграфівна², д.т.н., професор кафедри технології виробництва, e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, тел. +38 095-550-28-00.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 49000, Україна м. Дніпро, пр. Гагаріна, 72.

Study of structure formation and strength indicators of aluminum alloys when modified with dispersed compositions

Abstract. Promising directions of modification of aluminum alloys are studied in the field of application of powder modifiers. The use of such modifiers facilitates the technological process, is environmentally safe, leads to a uniform distribution of the introduced compositions over the cross-section of the casting, which increases the strength, plastic properties of the alloys and their stability. **Purpose.** The purpose of the work is to increase the mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys when modified with dispersed compositions. **Methodology and materials.** To achieve the goal, the tasks were set: to conduct a study of a complex of mechanical properties, necessary technological characteristics, corrosion resistance and structure of

alloys before and after modification. Aluminum alloys of the Al-Si, Al-Mg-Sc systems, promising for nuclear power plants, have been proposed. The materials are offered for the production of cast aluminum alloys AL9 and deformed alloys 1571. **Results and discussion.** The modification of aluminum alloys with a complex nano-dispersion modifier based on the plasma chemical synthesis of Mg₂Si and SiC is planned. The crushed grain of modified alloys is achieved by 1.5...2 times, the mechanical strength increases by 12...18% and the corrosion resistance grows too. The results of tests on general corrosion showed that modification with a complex modifier ZrC leads to an increase in the corrosion resistance of alloys due to a decrease in the corrosion rate. The corrosion rate of AL9 alloy in the modified state was reduced from 11.04 10⁻⁶ to 9.84 10⁻⁶ kg/m² days, which is 18%. The mechanism of complex nano-disperse modifier in aluminum melt is proposed. **Conclusions.** The use of such modifiers facilitates the technological process, is environmentally safe, leads to a uniform distribution of introduced nanocomposites, which increases the strength of alloys and their stability. The achieved results showed the effectiveness of modifying aluminum alloys with nano-disperse compositions.

Key words: cast and deformed aluminum alloys, complex nano-disperse modifier, grain structure, strength properties, corrosion resistance.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, tel. +38 097-481-15-93.

Demchenko Sergey¹, researcher, e-mail: dsvpochta@gmail.com, tel. 067-577-98-70,

Kalinina Natalia², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Production Technologies, e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, tel. +38 095-550-28-00.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarina ave., Dnipro, 49000, Ukraine.