

## ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СПЛАВУ АК9М2

Котляр С. М.

Встановлено, що вплив міді, магнію та марганцю на рівень механічних властивостей сплаву АК9М2 в литому стані має нелінійний характер. Важливим є не тільки сумарний вміст даних компонентів в сплаві, але і їх співвідношення. Збільшення вмісту міді, магнію або марганцю в сплаві АК9М2 дозволяє підвищити рівень його механічних властивостей тільки при певних співвідношеннях двох інших компонентів.

Застосування методу багатокритеріальної оптимізації при аналізі побудованих моделей дозволило встановити оптимальне співвідношення вмісту міді, магнію та цинку в сплаві АК9М2.

Определено, что влияние меди, магния и марганца на уровень механических свойств сплава АК9М2 в литом состоянии имеет нелинейный характер. Важно не только суммарное содержание данных компонентов в сплаве, но и их соотношение. Увеличение содержания меди, магния или марганца в сплаве АК9М2 позволяет повысить уровень его механических свойств только при определенных соотношениях двух других компонентов.

Применение метода многокритериальной оптимизации при анализе построенных моделей позволило установить оптимальное соотношение содержания меди, магния и марганца в сплаве АК9М2.

Determined that the effect of copper, magnesium and manganese to the level of mechanical properties of the alloy in the molten state АК9М2 is nonlinear. It is not only the total content of these components in the alloy, and their relationship. Increasing the content of copper, magnesium or manganese in the alloy allows АК9М2 improve its mechanical properties under certain proportions of two other components.

Application of the method in the analysis of multi-criteria optimization model enabled the optimal ratio of copper, magnesium and manganese alloy АК9М2.

Котляр С. Н.

асистент НТУУ «КПИ»

[ktserg@mail.ru](mailto:ktserg@mail.ru)

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

УДК 661.74:669.14.046.554

Котляр С. М.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СПЛАВУ АК9М2

Сплав АК9М2 є одним з широко використовуємих промислових силумінів системи Al-Si-Cu. Хімічний склад сплаву АК9М2 змінюється в широких межах. Відповідно на виробництві отримують сплави з суттєво різним рівнем механічних властивостей [1–4].

Особливістю даного сплаву є невисока пластичність, що пов'язано з неоптимальним співвідношенням легуючих елементів та домішок в даному сплаві [5–9]. В наслідок широкого коливання вмісту легуючих і мікролегуємих елементів в сплаві АК9М2 в виробничих умовах значення пластичності можуть, навіть, бути меншими за вимоги державного стандарту до даного сплаву.

Підвищити рівень механічних властивостей ливарних сплавів системи Al-Si-Cu, виготовлених з вторинної сировини, можливо шляхом оптимізації хімічного складу сплавів по вмісту головних легуючих компонентів.

Встановлено що на рівень механічних властивостей даного сплаву впливає не тільки вміст окремих компонентів в сплаві АК9М2, але і їх співвідношення. Встановивши оптимальне співвідношення легуючих компонентів в даному сплаві, можливо на виробництві прямо під час технологічного процесу виготовлення сплаву, шляхом підшихтовки отримувати виливки з оптимальним комплексом механічних властивостей.

Мета роботи – встановити можливість підвищення рівня механічних властивостей сплаву АК9М2 шляхом оптимізації хімічного складу сплаву по вмісту міді, магнію і марганцю.

Хімічний склад досліджуваного сплаву наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АК9М2

Марка сплаву	Вид продукції	Масова частка основних компонентів, %				
		Mg	Si	Mn	Cu	Ti
АК9М2	Чушка	0,25–0,85	7,5–10	0,1–0,4	0,5–2,0	0,05–0,2
	Виливок	0,2–0,8				

Таблиця 2

Вміст домішок в сплаві АК9М2

Марка сплаву	Вид продукції	Масова частка домішок, не більше, %						
		Fe		Mn	Zn	Ni	Pb	Sn
		З	К					
АК9М2	Чушка	-	0,9	-	1,2	0,5	Pb + Sn = 0,3	
	Виливок		1,0					

Дослідні плавки проводили в електричних печах опору типу СШОЛ, з використанням графіто-шамотного тигля. В тиглі розплавляли алюміній і при температурі  $720 \pm 10$  °С вводили лігатуру Al-Si, яка крім кремнію містить залізо, цинк, нікель, титан. Після їх розплавлення

вводили лігатури: Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg. Після розчинення даних лігатур розплави витримували при цій температурі протягом 15 хв. Після цього з поверхні розплаву видаляли шлаки та розливали його в металеву виливницю.

На отриманих стандартних зразках діаметром 10 мм. визначали механічні властивості досліджуваних сплавів (тимчасовий опір розриву, межу плинності, відносне видовження).

Випробування механічних властивостей проводились на розривній машині TIRA – TEST за стандартними методиками.

Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей знаходились в межах:  $\sigma_b - \pm 20$  МПа,  $\sigma_{0,2} - \pm 10$  МПа,  $\delta - \pm 15$  %.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопу РЕММА – 101А. Хімічний аналіз зразків досліджуваних сплавів проводили використовуючи метод оптичної спектроскопії випаровуючим розрядом.

Якісний та кількісний металографічний аналіз виконано на мікроскопі NEOFOT – 31. Рентгенографічне дослідження проводили в Cu – характеристичному випромінюванні з застосуванням дифрактометру ДРОН – 413.

Дослідження по встановленню впливу співвідношення легуючих компонентів на рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву проводили з використанням методу математичного планування експерименту. Для побудови квазіквадратичних моделей використовували метод повного факторного експерименту, а для побудови квадратичних моделей – метод найменших квадратів.

Концентраційні інтервали зміни хімічного складу досліджуваних сплавів наведено в табл. 3. Вони відповідають межах хімічного складу сплаву АК9М2 згідно державного стандарту України.

Таблиця 3

Концентраційні інтервали зміни хімічного складу сплаву АК9М2

Концентраційний інтервал зміни вмісту легуючих компонентів	Mg, % $X_1$	Mn, % $X_2$	Cu, % $X_3$
Максимальний вміст в сплаві	0,8	0,4	2,0
Середній вміст компоненту	0,5	0,25	1,25
Мінімальний вміст в сплаві	0,2	0,1	0,5

Вид побудованих математичних моделей залежності механічних властивостей сплаву АК9М2 від співвідношення вмісту легуючих компонентів після лиття в кокіль, має наступний вигляд:

$$\sigma_b = 1067,82 - 104,546 \cdot U_2 \cdot U_3 - 24,761 \cdot Z_1 - 53,6958 \cdot U_1 \cdot U_2 + 11,2967 \cdot U_1;$$

$$\delta = 0,495455 + 0,0505479 \cdot Z_1 - 0,10407 \cdot x_1 - 0,177087 \cdot Z_3 - 0,154607 \cdot Z_2 - 0,0779549 \cdot V_1;$$

$$HB = 236,909 + 10,9884 \cdot U_1 - 12,367 \cdot Z_1 - 23,6209 \cdot Z_2 - 86,6788 \cdot V_3 - 20,6487 \cdot U_2 + 67,1399 \cdot V_1,$$

де:

$$x_1 = 3.33333 \cdot (X_1 - 0.5);$$

$$z_1 = 1.45503 \cdot ((x_1^2) - 2.97708e - 008 \cdot x_1 - 0.312727);$$

$$u_1 = 3.73264 \cdot ((x_1^3) - 5.85683e - 008 \cdot (x_1^2) - 0.732093 \cdot x_1 + 9.00577e - 009);$$

$$v_1 = 6.8875 \cdot ((x_1^4) - 9.62321e - 008 \cdot (x_1^3) - 0.9698 \cdot (x_1^2) + 4.36559e - 008 \cdot x_1 + 0.0743376);$$

$$x_2 = 3.45912 \cdot (X_2 - 0.489091);$$

$$z_2 = 1.82273 \cdot ((x_2^2) + 0.178679 \cdot x_2 - 0.272695);$$

$$u_2 = 5.29026 \cdot ((x_2^3) + 0.327241 \cdot (x_2^2) - 0.543147 \cdot x_2 - 0.0405122);$$

$$x_3 = 1 \cdot (X_3 - 2.5);$$

$$z_3 = 1.45503 \cdot ((x_3^2) + 9.82909e-009 \cdot x_3 - 0.312727);$$

$$u_3 = 3.73264 \cdot ((x_3^3) - 1.06582e - 007 \cdot (x_3^2) - 0.732093 \cdot x_3 + 3.64048e - 008);$$

$$v_3 = 6.8875 \cdot ((x_3^4) - 7.52881e - 008 \cdot (x_3^3) - 0.9698 \cdot (x_3^2) + 1.11586e - 008 \cdot x_3 + 0.0743376);$$

Застосування методу багатокритеріальної оптимізації при аналізі побудованих моделей дозволило встановити оптимальне співвідношення вмісту міді, магнію та цинку в сплаві АК9М2, яке забезпечує підвищений рівень механічних властивостей, порівняно з вимогами державного стандарту до даного сплаву (табл. 4).

Використання методу багатокритеріальної оптимізації дозволяє зробити висновки що: для сплаву АК9М2, який використовується після лиття без подальшої термічної обробки, оптимальним можна вважати наступний хімічний склад: (0,2–0,3) % Mg, (1,5–2,0) % Cu, (0,4–0,5) % Mn.

Досягти оптимального складу сплаву АК9М2 в виробничих умовах можливо шляхом підшихтовки, при умові встановлення середньостатистичного складу шихти на конкретному підприємстві.

Таблиця 4

Оптимальний склад сплаву АК9М2\*

Марка сплаву	Масова частка основних компонентів, %		
	Cu	Mg	Mn
	Для сплаву, що використовується після лиття		
(АК9М2) <sub>л</sub>	1,5–2,0	0,2–0,3	0,3–0,4
	Хімічний склад сплаву згідно ДСТУ2839-94		
АК9М2	0,5–2,0	0,2–0,8	0,1–0,4

\* Примітка. Інші компоненти: Si = (9–10) %; Ti = (0,05–0,2) %; Ni < 0,5 %; Zn < 1,5 %; Fe < 1,3 %

Таблиця 5

Механічні властивості вторинного силуміну АК9М2

Марка сплаву	Спосіб лиття	Вид термічної обробки	$\sigma_b$ , МПа	НВ	$\delta$ , %
	Дані згідно ДСТУ2839-94				
АК9М2	К	-	186	70	1,5
АК9М2	К	T1	206	80	1,5
	Властивості сплаву АК9М2 оптимального складу				
(АК9М2) <sub>л</sub>	К	-	208	83	1,8

Порівнюючи рівень механічних властивостей сплаву АК9М2 оптимального складу, та цього ж сплаву, виготовленого з середньостатистичної шихти видно, що його міцність підвищується приблизно на 10 %, а пластичність на 20 %. (табл. 5). З даних наведених в табл. 5 можна, також, зробити висновок, що механічні властивості сплаву АК9М2 оптимального складу навіть перевищують рівень властивостей цього сплаву після термічної обробки за режимом T1.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що вплив міді, магнію та марганцю на рівень механічних властивостей сплаву АК9М2 в литому стані має нелінійний характер. Важливим є не тільки сумарний вміст даних компонентів в сплаві, але і їх співвідношення. Збільшення вмісту міді, магнію або марганцю в сплаві АК9М2 дозволяє підвищити рівень його механічних властивостей тільки при певних співвідношеннях двох інших компонентів.

2. Побудовано математичні моделі залежності рівня механічних властивостей ливарного сплаву АК9М2, який використовується після лиття в кокіль, від вмісту міді, магнію і марганцю. Застосування методу багатокритеріальної оптимізації при аналізі побудованих моделей дозволило встановити оптимальне співвідношення вмісту даних компонентів в сплаві АК9М2 яке забезпечує підвищений рівень механічних властивостей порівняно з вимогами державного стандарту до даного сплаву.

Встановлено, що при використанні сплаву АК9М2 після лиття без термічної обробки оптимальним є хімічний склад сплаву який має підвищений вміст міді і марганцю та мінімальні значення вмісту магнію.

3. Для сплаву АК9М2 оптимального складу, тимчасовий опір розриву підвищується на 10 %, а відносне видовження на 20 %, порівняно зі сплавом виготовленим з середньостатистичної шихти.

Перспектива подальших досліджень полягає у встановленні оптимального складу сплаву АК9М2, який використовується після лиття та подальшої термічної обробки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Золотаревский В. С. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов* / В. С. Золотаревский, Н. А. Белов – М. : МИСИС, 2005. – 375 с.
2. *Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II* / И. Н. Фридляндер, О. Г. Сенаторова, О. Е. Осинцев [и др.]; под общ. ред. И. Н. Фридляндера – М. : Машиностроение, 2001. – 880 с.
3. Строганов Г. Б. *Сплавы алюминия с кремнием* / Г. Б. Строганов, В. А. Ротенберг, Г. Б. Гершман – М. : Металлургия, 1977 – 272 с.
4. Альтман М. Б. *Сплавы цветных металлов* / М. Б. Альтман, Г. Б. Строганов, Н. С. Постников – М., «Наука», 1972. – С. 180–186.
5. Боом Е. А. *Природа модифицирования сплавов типа силумин* / Е. А. Боом – М. : Металлургия, 1972. – 69 с., ил.
6. Малахов А. Н. *Основы металлостроения и теории коррозии* / А. Н. Малахов, А. П. Жуков – М. : Металлургия, 1978.
7. Лейбов Ю. М. *Металлургия вторичных цветных металлов и сплавов* / Ю. М. Лейбов, В. М. Базилевский – М., «Металлургия», 1972. – С. 81–86.
8. Кашевник Л. Я. *Свойства сплавов в отливках* / Л. Я. Кашевник, Н. Н. Белоусов – Л., «Наука», 1975. – С. 75–80.
9. Мондольфо Л. Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов* / Л. Ф. Мондольфо – М. : Металлургия, 1979. – 639 с.