

УДК 661.74:669.14.046.554

**Кулініч А. А.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМг10**

Для ливарних сплавів системи Al–Mg головною характеристикою макроструктури є середній розмір макрозерна, а мікроструктури – середній розмір дендритної комірки [1–3]. Дані характеристики структури, у більшості випадків, є взаємопов'язаними, і змінити розміри однієї з них при збереженні розмірів усіх інших на постійному рівні на практиці майже неможливо. Це є стримуючим фактором при побудові адекватних кількісних залежностей між механічними властивостями литого сплаву та однієї з характеристик структури. Також це ускладнює встановлення ступеня вкладу кожної окремої характеристики структури в рівень властивостей сплавів.

В роботах [4–9] на основі експериментальних досліджень були встановлені кількісні залежності впливу головних характеристик структури (серед яких середній розмір зерна і дендритної комірки) на механічні властивості ряду алюмінієвих сплавів, зокрема і ливарних сплавів системи Al–Mg. Також зроблені спроби оцінити ступінь впливу цих характеристик на рівень властивостей сплавів. Так, в роботі [1] встановлено, що для алюмінієвих сплавів різних систем (алюміній-мідь і алюміній-магній) ступінь впливу характеристик макро- і мікроструктури (розмір зерна і дендритної комірки) на рівень механічних властивостей є різним. Для системи алюміній-мідь встановлено, що головним чином на рівень механічних властивостей впливає розмір дендритної комірки при незначному впливі розміру зерна, а для сплавів системи алюміній-магній – вплив розміру зерна є більш суттєвим. Але побудовані математичні моделі залежності механічних властивостей від параметрів структури для подвійних і деяких промислових сплавів системи Al–Mg мали високу відносну похибку (окрім моделі, що описує залежність між рівнем межі плинності і розміром зерна сплавів). Це можна пояснити тим, що для їх побудови заздалегідь було обрано лише рівняння Холла–Петча. Воно добре описує кількісну залежність між розміром зерна алюмінієвих сплавів та рівнем межі плинності і є, по суті, не тільки математичною, но і фізичною моделлю [10–12]. Для побудови математичних моделей взаємозв'язку між розміром зерна, дендритної комірки і рівнем тимчасового опору розриву та, особливо, відносним видовженням рівняння Холла–Петча не має фізичного сенсу і автори [3, 8, 9] обрали його тільки по аналогії з залежністю  $D-\sigma_{0,2}$ , що і вплинуло на високі відносні похибки в розрахунках. Для визначення математичного зв'язку з більш низькою відсносною похибкою та більш точному встановленню ступеню впливу основних параметрів структури на рівень механічних властивостей промислових сплавів системи Al–Mg, на прикладі сплаву АМг10, було проведено експериментальні та теоретичні дослідження по встановленню впливу параметрів макроструктури (середнього розміру зерна) та мікроструктури (середнього розміру дендритної комірки) на рівень тимчасового опору розриву, межі плинності та відносного видовження.

Мета роботи – встановити ступінь впливу середнього розміру зерна і дендритної комірки на рівень механічних властивостей промислового сплаву АМг10 та побудувати математичні моделі залежності рівня механічних властивостей сплаву від даних характеристик структури.

Об'єкт дослідження в даній роботі – ливарний сплав АМг10.

Зразки для досліджень отримували шляхом розплавлення промислових чушок сплаву АМг10. Плавки проводили в лабораторній печі опору в графітошамотному тиглі. В тиглі розплавляли куски чушки сплаву АМг10 при температурі  $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  і витримували розплав на протязі 20–30 хв. Потім з поверхні розплаву знімали шлак і заливали його в металеві форми.

Для зміни параметрів структури (середнього розміру зерна і дендритної комірки) досліджуваного сплаву металевий розплав кристалізували з різними швидкостями охолодження.

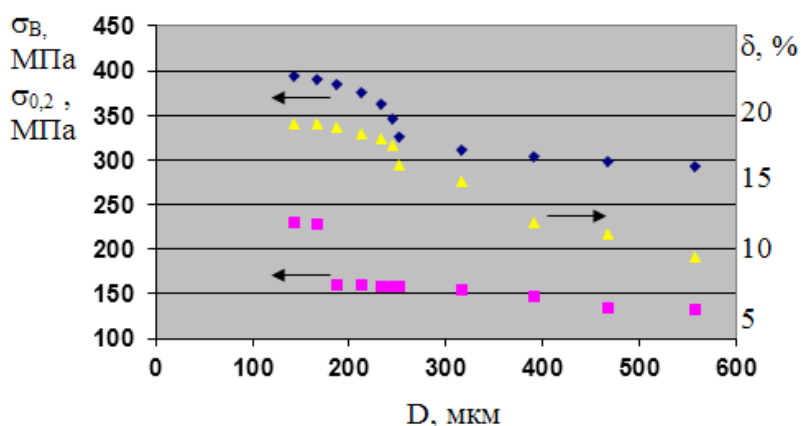
Стандартні зразки діаметром 10 мм сплаву АМг10 піддавали термічній обробці за режимом Т4 (нагрів зразків в муфельних печах електроопору до температур  $430 \pm 10$  °С, витримка при цій температурі протягом 20 г., гартування у воду підігріту до 80–100 °С) і після цього вимірювали рівень механічних властивостей (тимчасовий опір розриву, межу плинності, відносне видовження).

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

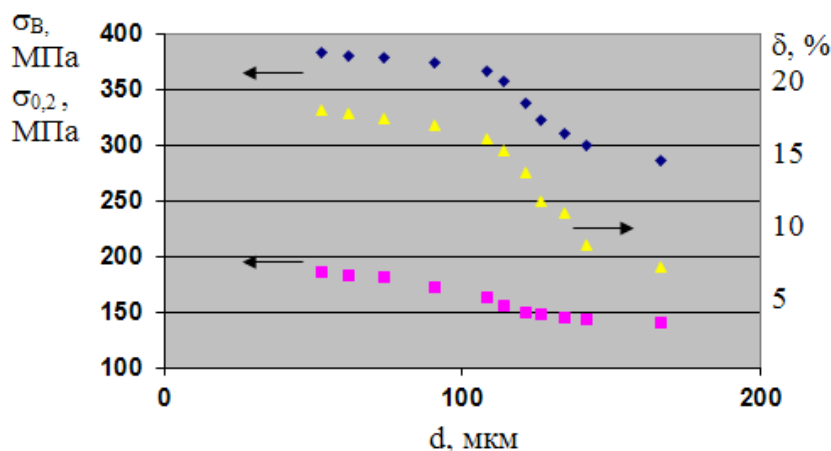
Якісний та кількісний металографічний аналіз виконано на мікроскопі NEOFOT-31. Рентгенографічне дослідження проводили в Cu-характеристичному випромінюванні з застосуванням дифрактометру ДРОН-413.

Для аналізу зв'язку між параметрами структури і механічними властивостями досліджуваних сплавів використовували методику кореляційного та регресійного аналізів [13, 14].

На рис. 1 наведено експериментальні дані по впливу розміру зерна та дендритної комірки на рівень механічних властивостей сплаву АМг10. З діаграми розсіяння емпіричних значень можна зробити попередній висновок про наявність негативної кореляції або зворотного зв'язку між змінними  $D$  ( $d$ ) і  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ).



а



б

Рис. 1. Діаграма розсіяння емпіричних значень змінних розміру зерна (а), розміру дендритної комірки (б) і механічних властивостей для сплаву АМг10 ( $\diamond$  –  $\sigma_B$ ;  $\Delta$  –  $\delta$ ;  $\square$  –  $\sigma_{0,2}$ )

Для встановлення наявності або відсутності лінійної залежності між змінними  $D$  ( $d$ ) і  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) розраховували парний коефіцієнт кореляції Пірсона –  $R$  (табл. 1).

Ступінь лінійного зв'язку (або значущість коефіцієнта кореляції) оцінювали, порівнюючи розрахунковий коефіцієнт кореляції Пірсона ( $R$ ) з його теоретичним значенням ( $R_t$ ), яке визначається довірчою ймовірністю та ступенем свободи [13]. При виконанні умови  $|R| > |R_t|$  вважається, що коефіцієнт кореляції є значущим і залежність між двома змінними є лінійною, в протилежному випадку лінійна залежність відсутня.

З даних, наведених в табл. 1, видно, що умові  $|R| > |R_t|$  відповідають усі залежності окрім  $\sigma_{0,2} = f(D)$ . Тобто, можна зробити висновок, що для сплаву АМг10 залежність між основними параметрами структури ( $D$ ,  $d$ ) та рівнем механічних властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) є лінійною, окрім залежності  $\sigma_{0,2} = f(D)$ .

Таблиця 1

Коефіцієнти парної кореляції між механічними властивостями і характеристиками структури сплаву АМг10 після лиття для лінійної моделі

Властивість	Коефіцієнт кореляції при характеристиці структури			
	$D$		$d$	
	розрахунковий $R$	табличний $R_t$	розрахунковий $R$	табличний $R_t$
$\sigma_b$	-0,904	0,735	-0,936	0,735
$\sigma_{0,2}$	-0,732	0,735	-0,970	0,735
$\delta$	-0,981	0,735	-0,964	0,735

Примітка: Довірча ймовірність  $P = 0,99$ .

Від'ємне значення коефіцієнтів кореляції (табл. 1) підтверджує наявність зворотного зв'язку між змінними  $D$  ( $d$ ) і  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ).

Використовуючи метод регресійного аналізу (метод найменших квадратів) [13, 14], з використанням ПЕОМ, було побудовано математичні моделі, які описують кількісні залежності між змінними  $D$  ( $d$ ) і  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ).

Лінійні моделі, що описують залежності між  $D$  (або  $d$ ) і рівнем механічних властивостей сплаву АМг10 після лиття мають наступний загальний вигляд:

$$y = A + B \cdot X, \quad (1)$$

де  $y$  – механічні властивості  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ );

$X$  – розмір зерна ( $D$ ) або дендритної комірки ( $d$ );

$A$ ,  $B$  – розрахункові коефіцієнти моделі (табл. 2).

Точність розрахунків (адекватність) побудованих математичних моделей залежності механічних властивостей від розміру параметрів структури сплаву АМг10 після лиття встановлювали шляхом аналізу різниці залишків, які є різницею експериментальних і розрахункових значень властивостей даного сплаву.

Для моделей  $\sigma_B = f(d)$  і  $\sigma_{0,2} = f(d)$  максимальна різниця залишків не перевищує 6 %, а для моделі  $\delta = f(d)$  вона не перевищує 9 %. Тому, враховуючі зазначене, отримані моделі можна вважати адекватними.

Аналізуючи побудовані математичні моделі можна зробити висновки, що при подібненні розміру дендритної комірки в три рази (з 167 до 53 мкм.) рівень  $\sigma_B$  зростає на 90–95 МПа (на 30 %), рівень  $\sigma_{0,2}$  зростає на 40–45 МПа (на 35 %), а рівень  $\delta$  зростає на 7–8 одиниць (на 80 %).

Таблиця 2

Коефіцієнти лінійної моделі залежності механічних властивостей від параметрів структури сплаву АМг10 після лиття

Властивість $y$	Коефіцієнти моделі	
	$A$	$B$
Для залежності $y = f(d)$		
$\sigma_B$	445,48	- 0,93
$\sigma_{0,2}$	211,15	- 0,47
$\delta$	22,92	- 0,08
Для залежності $y = f(D)$		
$\sigma_B$	421,57	- 0,27
$\delta$	22,43	- 0,03

Для моделей  $\sigma_B = f(D)$  і  $\delta = f(D)$  максимальна різниця залишків не перевищує 9 %. Тому, враховуючи зазначене, отримані моделі також можна вважати адекватними.

Аналізуючи побудовані математичні моделі, можна зробити висновки, що при подібненні розміру зерна в 3,5–4 рази (з 559 до 145 мкм) рівень  $\sigma_B$  зростає на 90–100 МПа (на 35 %), а рівень  $\delta$  зростає на 9–10 одиниць (в 2 рази).

Для встановлення наявності нелінійної залежності типу моделі Холла-Петча  $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$  між змінними  $D$  і  $\sigma_{0,2}$  розраховували парний коефіцієнт кореляції Пірсона ( $R$ ) після проведення лінеаризуючого перетворення ( $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$ ).

З даних, наведених в табл. 3, видно, що залежність між змінними  $D$  і  $\sigma_{0,2}$  відповідає умові  $|R| > |R_t|$ , тобто дані залежності можна описати моделлю Холла-Петча.

Таблиця 3

Коефіцієнти парної кореляції між межою плинності і розміром зерна сплаву АМг10 після лиття для лінеаризованої моделі Холла-Петча

Властивість	Коефіцієнт кореляції при характеристиці структури	
	$D$	
	Розрахунковий $R$	Табличний $R_t$
$\sigma_{0,2}$	0,854	0,735

Примітка: Довірча ймовірність  $P = 0,99$ .

Математична модель, що описує нелінійну залежність (типу Холла-Петча) між розміром зерна і межою плинності сплаву АМг10 після лиття має наступний загальний вигляд:

$$y = A + B \cdot X, \quad (2)$$

де  $y$  – механічна властивість  $\sigma_{0,2}$ ;

$X = \frac{1}{\sqrt{D}}$  – де  $D$  – розмір зерна;

$A, B$  – розрахункові коефіцієнти моделі (табл. 4).

Таблиця 4

Коефіцієнти нелінійної моделі залежності межі плинності від розміру зерна сплаву АМг10 після лиття для лінеаризованої моделі Холла-Петча

Властивість $y$	Коефіцієнти моделі	
	$A$	$B$
$\sigma_{0,2}$	27,39	2197,44

Для моделі  $\sigma_{0,2} = f(D)$  максимальна різниця залишків становить 17 %.

Аналізуючи дану модель, можна зробити висновки, що при подрібненні розміру зерна в 3,5–4 рази (з 559 до 145 мкм) рівень  $\sigma_{0,2}$  зростає приблизно на 100 МПа (на 80 %).

Таким чином, встановлено, що для сплаву АМг10 на зміну рівня механічних властивостей суттєво впливають обидві характеристики структури (як середній розмір зерна, так і дендритної комірки).

### ВИСНОВКИ

На основі експериментальних даних побудовано математичні моделі залежності рівня механічних властивостей сплаву АМг10 від характеристик макро- і мікроструктури.

Показано, що в характерному для сплаву АМг10 діапазоні змін характеристик макро- і мікроструктури, залежність між основними параметрами структури ( $D$ ,  $d$ ) та рівнем механічних властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) добре описується лінійною функцією, окрім залежності  $\sigma_{0,2} = f(D)$ . Залежність межі плинності від розміру зерна даного сплаву описується рівнянням типу Холла-Петча.

На основі аналізу побудованих математичних моделей встановлено ступінь впливу (відносний внесок) середнього розміру зерна і дендритної комірки на рівень механічних властивостей промислового сплаву АМг10. Встановлено, що зміна розмірів макро- і мікроструктури промислового сплаву АМг10 особливо суттєво впливає на підвищення рівня відносного видовження.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Золотаревский В. С. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов* / В. С. Золотаревский, Н. А. Белов. – М. : МИСИС, 2005. – 375 с.
2. Постников Н. С. *Коррозионностойкие алюминиевые сплавы* / Н. С. Постников. – М. : Металлургия, 1976. – 303 с.
3. Золотаревский В. С. *Структура и прочность литых алюминиевых сплавов* / В. С. Золотаревский. – М. : Металлургия, 1981. – 191 с.
4. Золоторевский В. С., Телешов В. В. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1970. – № 1. – С. 121–126.
5. Золоторевский В. С., Телешов В. В. // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1971. – № 5. – С. 187–194.
6. Золоторевский В. С. // *В кн. : Проблемы металлостроения цветных металлов*. – М. : Наука, 1978. – С. 128–137.
7. Алтунина Л. А., Аристова Н. А., Золоторевский В. С. и др. // *Пошлиной*. – 1972. – № 8. – С. 9–14.
8. Корнаухов А. С., Золоторевский В. С. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1976. – № 4. – С. 157–160.
9. Корнаухов А. С., Белоусов Н. Н., Золоторевский В. С., Кашиевник Л. Я. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1979. – № 1. – С. 122–127.
10. Hall E. O. *The deformation and ageing of mild steel* // *Proc. Phys. Soc.* – 1951. – Vol. 64, № 9. – P. 747–753.
11. Petch N. J. *The cleavage strength of polycrystalline* // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – Vol. 173. – P. 25–28.
12. Low J. R. *Deformation of polycrystalline-iron* // *Properties & Microstructure*. – 1954. – Vol. 1. – P. 163–168.
13. Львовский Э. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул* / Э. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.
14. Хальд А. *Математическая статистика с техническими приложениями* : пер. с англ. / Под. ред. Ю. В. Линника. – М. : ИЛ, 1956. – 664 с.