

А. А. Кулинич, канд. техн. наук, доцент, e-mail: kulinich@kpi.iff.ua

А. Н. Доний, канд. техн. наук, доцент, e-mail: dosha@kpi.iff.ua

В. В. Христенко, канд. техн. наук, доцент, e-mail: kvad63@meta.ua

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМгбл

Построены математические модели, описывающие влияние параметров структуры на механические свойства сплава АМгбл в литом состоянии. Установлено, что зависимости показателей механических свойств от среднего размера дендритной ячейки можно описать линейной функцией, а зависимость показателей механических свойств от среднего размера зерна – уравнением типа Холла-Петча.

Ключевые слова: сплав АМгбл, механические свойства, математическая модель, размер зерна, размер дендритной ячейки.

Побудовано математичні моделі, що описують вплив параметрів структури на механічні властивості сплаву АМгбл у литому стані. Встановлено, що залежності показників механічних властивостей від середнього розміру дендритної комірки можна описати лінійною функцією, а залежність показників механічних властивостей від середнього розміру зерна – рівнянням типу Холла-Петча.

Ключові слова: сплав АМгбл, механічні властивості, математична модель, розмір зерна, розмір дендритної комірки.

Mathematical models, describing influence of structure parameters on mechanical properties of as-cast АМгбл alloy has been developed. It is established that dependences of mechanical properties indexes on dendritic cell mid-size can be described by linear function, and dependence of mechanical properties indexes on grain mid-size – by Hall–Petch type relationship.

Keywords: АМгбл alloy, mechanical properties, mathematical model, grain size, dendritic cell size.

Механические свойства литейных сплавов определяются всей совокупностью параметров, характеризующих структуру [1–3]. В большинстве случаев эти характеристики не являются взаимонезависимыми. Поэтому изменить показатели одной из них, сохранив неизменными показатели других характеристик, практически не представляется возможным. Указанное обстоятельство существенно усложняет определение степени влияния каждой отдельно взятой характеристики структуры на уровень механических свойств сплава в целом.

Для литейных сплавов системы Al–Mg основной характеристикой макроструктуры считается средний размер макрозерна, а основной характеристикой микроструктуры – средний размер дендритной ячейки [3]. В [4, 5] предприняты попытки количественно установить влияние показателей основных характеристик структуры на уровень механических свойств ряда алюминиевых сплавов (в том числе и литейных сплавов системы Al–Mg). Однако существующим математическим моделям, описывающим влияние параметров структуры на показатели механических свойств двойных и некоторых промышленных сплавов системы Al–Mg, свойственна значительная погрешность (за исключением модели, описывающей зависимость предела текучести от размера зерна). В качестве основы таких моделей взято одно лишь уравнение Холла-Петча. Хотя это уравнение, в сущности, является не только математической, но и физической моделью [6–8], для алюминиевых сплавов оно удовлетворительно

описывает только зависимость между размером зерна и пределом текучести. А при описании влияния размера зерна (и размера дендритной ячейки) на временное сопротивление разрыву при растяжении и, особенно, на относительное удлинение, уравнение Холла-Петча теряет физический смысл. Авторы [3–5] избрали его лишь по аналогии с зависимостью предела текучести от размера зерна, что и повлияло на точность расчета. Поэтому целью данной статьи было построение математических моделей, описывающих влияние среднего размера зерна и дендритной ячейки на показатели механических свойств сплава АМгбл.

Сплав выплавляли в лабораторной печи сопротивления в графито-шамотном тигле и заливали в формы из различных материалов (температура заливки – 700 °С). Изменение материала литейной формы обеспечивало вариацию скорости охлаждения расплава, а, следовательно, – и средних размеров зерна и дендритной ячейки. Механические свойства (временное сопротивление разрыву, предел текучести и относительное удлинение) определяли по стандартным методикам. Качественный и количественный металлографический анализ осуществляли при помощи микроскопа NEOFOT–31. Степень связи между параметрами структуры и механическими свойствами оценивали с помощью корреляционного и регрессионного анализов [9–11].

Результаты анализа экспериментальных данных (рис. 1, 2, табл. 1) свидетельствуют о наличии отрицательной корреляции между параметрами структуры (размерами зерна D и дендритной ячейки d) и показателями механических свойств (пределом прочности на разрыв (σ_B), пределом текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительным удлинением (δ)). Степень линейности связи между параметрами структуры и показателями механических свойств оценивали, сравнивая расчетную величину коэффициента корреляции Пирсона (R) с табличным значением (R_t) для заданных доверительной вероятности и числа степеней свободы [9]. При выполнении условия $|R| > |R_t|$ принимали гипотезу о значимости коэффициента корреляции, а, следовательно, – и о линейной зависимости между двумя переменными. В противном случае – гипотезу о линейной зависимости отвергали.

Установлено, что условию $|R| > |R_t|$ отвечают лишь зависимости механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ) от размеров дендритной ячейки d (для сплава АМгбл эти зависимости являются линейными). Причем отрицательное значение коэффициентов корреляции (см. табл. 1) свидетельствует, что уменьшение среднего размера дендритной ячейки приводит к повышению уровня механических свойств.

Математические модели, количественно описывающие зависимости между размером дендритной ячейки и показателями механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ), строили путем регрессионного анализа (метод наименьших квадратов) [9, 11]. Для сплава АМгбл в литом состоянии указанные зависимости имеют вид:

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

где y – показатель механического свойства (σ_B и $\sigma_{0,2}$, МПа; δ , %); d – размер дендритной ячейки, мкм; A и B – коэффициенты модели (табл. 2).

Для линейной модели $\sigma_B = f(d)$ разности между экспериментальными и расчетными значениями не превышают 4 %. Для модели $\sigma_{0,2} = f(d)$ максимальная разность не превышает 3 %, а для модели $\delta = f(d)$ она составляет около 11 %. Поэтому полученные модели можно считать адекватными. Результаты анализа полученных зависимостей позволяют заключить, что при уменьшении размера дендритной ячейки со 153–145 до 55–42 мкм уровень σ_B возрастает на 30–40 МПа (на 25–30 %), уровень $\sigma_{0,2}$ возрастает на 10–15 МПа (на 10 %), а уровень δ возрастает на 1–2 единицы (на 30–35 %).

В то же время зависимости показателей механических свойств от размера зерна (D) не являются линейными (условие $|R| > |R_t|$ не выполняется, см. табл. 1). Гипотезу о

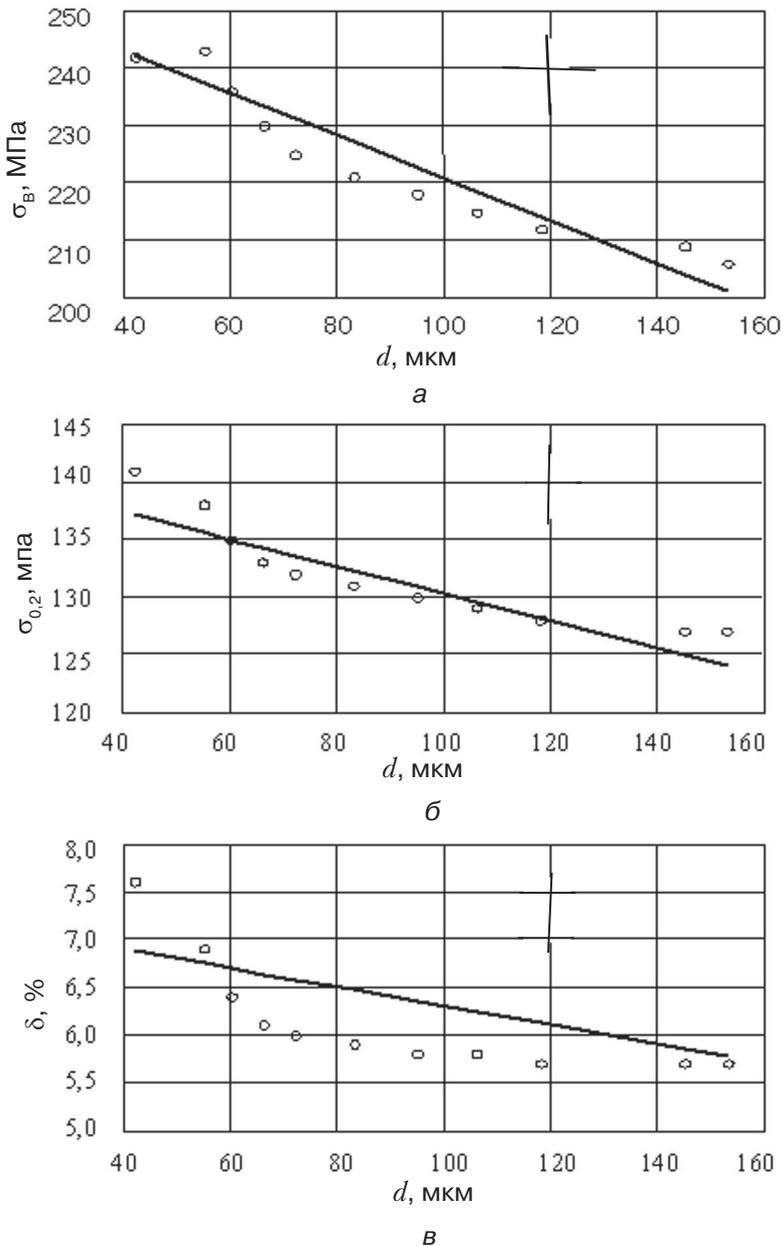


Рис. 1. Влияние размера дендритной ячейки на механические свойства сплава АМгбл: а – предел прочности при растяжении; б – предел текучести; в – относительное удлинение; о – экспериментальные данные, — – расчетные данные

наличии нелинейной зависимости типа модели Холла-Петча $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$ между размером зерна и показателями механических свойств ($\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$, δ) проверяли по величине коэффициента корреляции Пирсона (R) после линеаризующего преобразования. Установлено, что зависимость между переменными $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$ и $\sigma_{в}$ ($\sigma_{0,2}$, δ) от-

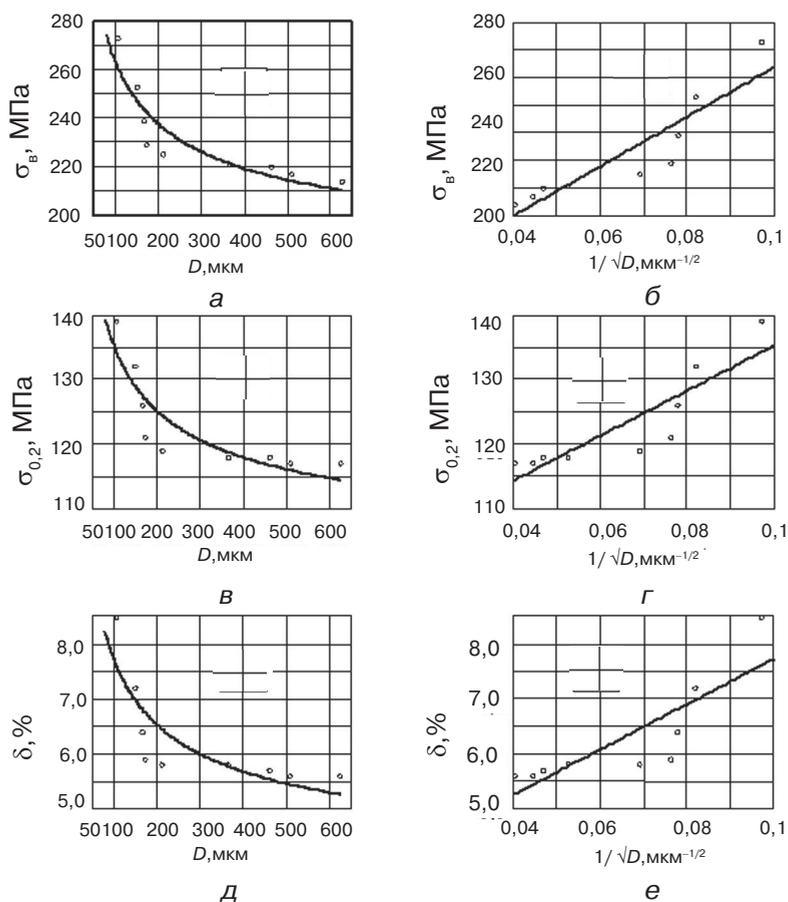


Рис. 2. Влияние размера зерна на механические свойства сплава АМгб1: а, б – предел прочности при растяжении; в, г – предел текучести; д, е – относительное удлинение; а, в, д – модель типа Холла-Петча $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$; б, г, е – линеаризованная модель $y = A + B \cdot X$,

Петча $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$; б, г, е – линеаризованная модель $y = A + B \cdot X$,
 $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$; о – экспериментальные данные; — – расчетные данные

Таблица 1
Коэффициенты парной корреляции между механическими свойствами и характеристиками структуры сплава АМгб1 в литом состоянии для линейной модели (доверительная вероятность $P = 0,99$)

Свой-ство	Значение коэффициента корреляции между характеристикой структуры и свойством			
	D		d	
	расчетное R	табличное R_t	расчетное R	табличное R_t
σ_B	-0,780	0,798	-0,928	0,735
$\sigma_{0,2}$	-0,737		-0,905	
δ	-0,673		-0,769	

Таблица 2
Коэффициенты линейных моделей влияния размера дендритной ячейки на показатели механических свойств сплава АМгбл в литом состоянии

Показатель свойства y	Величины коэффициентов модели	
	A	B
σ_B	257,80	- 0,37
$\sigma_{0,2}$	142,07	- 0,11
δ	7,30	- 0,01

вечает условию $|R| > |R_i|$ (табл. 3). Поэтому математические модели, описывающие нелинейные зависимости между размером зерна и уровнем механических свойств сплава АМгбл в литом состоянии (линеаризованные модели Холла-Петча) можно представить в виде (рис. 2):

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

где y – показатели механических свойств (σ_B и $\sigma_{0,2}$, МПа; δ , %); $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$, мкм^{-1/2}; D – раз-

мер зерна, мкм; A и B – коэффициенты модели (табл. 4).

Максимальная разность между экспериментальным и расчетным значениями для модели $\sigma_B = f(D)$ не превышает 6 %. Для модели $\sigma_{0,2} = f(D)$ указанная разность не превышает 5 %, а для модели $\delta = f(D)$ – составляет около 14 %.

Таблица 3
Коэффициенты парной корреляции между механическими свойствами и характеристиками структуры сплава АМгбл в литом состоянии для линеаризованной модели Холла-Петча (при доверительной вероятности $P = 0,99$)

Свойство	Значение коэффициента корреляции между размером зерна D и свойством	
	расчетное R	табличное R_i
σ_B	0,912	0,798
$\sigma_{0,2}$	0,886	
δ	0,839	

Следует отметить, что при измельчении зерна с 620–500 до 150–100 мкм показатель σ_B увеличивается на 40–60 МПа (на 20–25 %), предел текучести $\sigma_{0,2}$ увеличивается на 15–22 МПа (на 15–20 %), а относительное удлинение δ возрастает на 1,5–3,0 единицы (на 30–50 %).

Таблица 4
Коэффициенты линеаризованной модели Холла-Петча зависимости механических свойств от размера зерна сплава АМгбл в литом состоянии

Показатель свойства y	Значения коэффициентов модели	
	A	B
σ_B	174,24	894,95
$\sigma_{0,2}$	100,40	348,16
δ	3,60	41,33

По результатам работы можно сделать вывод, что, в отличие от сплавов системы Al–Cu, для которых уровень механических свойств в основном определяется размером дендритной ячейки, показатели механических свойств сплава АМгбл в литом состоянии существенно образом определяются как характеристиками макроструктуры (средним размером зерна), так и микроструктуры (средним размером дендритной ячейки). Ко-

личественно зависимости показателей механических свойств от среднего размера дендритной ячейки с достаточной точностью описываются линейной функцией, а зависимость показателей механических свойств от среднего размера зерна – уравнением типа Холла-Петча. Измельчение макро- и микроструктуры сплава АМгбл особенно сказывается на повышении показателей относительного удлинения. Величина предела текучести в большей степени определяется средним размером зерна, а показатели предела прочности при растяжении более чувствительны к изменению размера дендритной ячейки.



Список литературы

1. Золотаревский В. С., Белов Н. А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. – М.: МИСИС, 2005. – 375 с.
2. Постников Н. С. *Коррозионностойкие алюминиевые сплавы*. – М.: Metallurgija, 1976. – 303 с.
3. Золотаревский В. С. *Структура и прочность литых алюминиевых сплавов*. – М. Metallurgija, 1981. – 191 с.
4. Корнаухов А. С., Золотаревский В. С. Исследование зависимости напряжения течения от размера зерна в закаленных отливках сплавов алюминий-магний // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. – 1976. № 4. – С. 157–160.
5. Корнаухов А. С., Белоусов Н. Н., Золотаревский В. С., Кашевник Л. Я. О возможности расчета механических свойств отливок из промышленных сплавов на основе системы Al–Mg // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. – 1979. № 1. – С. 122–127.
6. Hall E. O. The deformation and ageing of mild steel // *Proc. Phys. Soc.* – 1951. – Vol. 64. – № 9. – pp. 747–753.
7. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystalline // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – Vol. 173. – pp. 25–28.
8. Low J. R. Deformation of polycrystalline-iron // *Properties&Microstructure*. – 1954. – Vol. 1. – pp. 163–168.
9. Львовский Э. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул*. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
10. Хальд А. *Математическая статистика с техническими приложениями: Пер. с англ.* / Под. ред. Ю. В. Линника. – М.: ИЛ, 1956. – 664 с.
11. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ.* / Под. Ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.



References

1. Zolotarevskij, V. S., Belov, N. A. (2005) *Metallovedenie litejnyh aljuminievjyh splavov* [*Metallurgy of foundry aluminum alloys*]. Moscow: MISIS, 375 p. [in Russian].
2. Postnikov, N. S. (1976) *Korrozionnostojkie aljuminievye splavy* [*Corrosion-resistant aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgija, 303 p. [in Russian].
3. Zolotarevskij, V. S. (1981) *Struktura i prochnost' lityh aljuminievjyh splavov* [*Structure and strength of cast aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgija, 191 p. [in Russian].
4. Kornauhov, A. S., Zolotarevskij, V. S. (1976) *Issledovanie zavisimosti naprjazhenija techenija ot razmera zerna v zakalennyh otlivkah splavov aljuminij-magnij* [*Investigation of the dependence of the flow stress on the grain size in hardened castings of aluminum-magnesium alloys*]. *Izvestija VUZov. Cvetnaja metallurgija*, no. 4, pp. 157–160. [in Russian].

5. Kornauhov, A. S., Belousov, N. N., Zolotarevskij, V. S., Kashevnik, L. Ja. (1979) O vozmozhnosti rascheta mehanicheskikh svojstv otlivok iz promyshlennyh splavov na osnove sistemy Al – Mg [*On the possibility of calculating the mechanical properties of castings from industrial alloys based on the Al-Mg system*]. Izvestija VUZov. Cvetnaja metallurgija, no. 1, pp. 122–127. [in Russian].
6. Hall, E. O. (1951) The deformation and ageing of mild steel. Proc. Phys. Soc., Vol. 64, no. 9, pp. 747–753. [in English].
7. Petch, N. J. (1953) The cleavage strength of polycrystalline. J. Iron and Steel Inst., Vol. 173, pp. 25–28. [in English].
8. Low, J. R. (1954) Deformation of polycrystalline-iron. Properties&Microstructure, Vol. 1, pp. 163–168. [in English].
9. L'vovskij, Je. N. (1988) Statisticheskie metody postroenija empiricheskikh formul [*Statistical methods for constructing empirical formulas*]. Moscow: Vysshaja shkola, 239 p. [in Russian].
10. Linnik, Ju. V. (ed.) (1956) Matematicheskaja statistika s tehničeskimi prilozhenijami [*Mathematical statistics with technical applications*]. Moscow: IL, 664 p. [in Russian].
11. Adler, Ju. P., Gorskiy, V. G. (ed.) (1973) Prikladnoj regressionnyj analiz [*Applied regression analysis*]. Moscow: Statistika, 392 p. [in Russian].

Поступила 03.10.2017

**К сведению читателей
и подписчиков!
Телефон редакции
журнала "Процессы литья"
(044) 424-04-10**