

УДК 669.721.5

Н. Д. Айкин, д-р техн. наук В. А. Шаломеев, д-р техн. наук Э. И. Цивирко, В. В. Клочихин

¹Запорожский национальный технический университет, ²АО «Мотор Сич», г. Запорожье

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НОВОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА ДЛЯ АВИАЦИОННОГО ЛИТЬЯ

Изучено влияние основных легирующих элементов (Zr, Nd, Zn) на механические свойства нового магниевого сплава. Построена матрица планирования эксперимента по плану 2³. Проведена оптимизация химического состава сплава для получения повышенного комплекса свойств.

Ключевые слова: магниевый сплав, неодим, цирконий, предел растворимости, матрица планирования эксперимента, графическая оптимизация.

В авиационной технике широко используют сплавы на основе легких цветных металлов, которые обладают широким диапазоном свойств и удовлетворяют требуемым условиям эксплуатации [1]. Литейные магниевые сплавы – одни из самых легких конструкционных материалов, что позволяет широко их использовать в авиадвигателестроении [2]. Развитие научно-технического прогресса приводит к усложнению конструкции и количества структурных элементов двигателей и агрегатов, что приводит к повышению их массы. Поэтому применение легких сплавов на основе магния при производстве авиационных двигателей является актуальной задачей.

При производстве авиадвигателей на предприятии АО «Мотор Сич» для ряда ответственных отливок широко применяют магниевый сплав МЛ10, легирующими элементами которого являются неодим (2,2–2,8%), цирконий (0,4–1,0%) и цинк (0,1–0,7%) и имеющего следующий уровень механических свойств: $\sigma_B = 230$ МПа, $\delta = 3\%$ [3].

Различное содержание данных элементов может изменять структуру и физико-механические свойства сплава. Согласно диаграммам состояния Mg-Nd и Mg-Zr, пределы растворимости неодима и циркония в твердом состоянии – соответственно 3,36% и 1,5%. Приведенные значения превышают максимальные содержания соответствующих легирующих элементов по ГОСТ, что дает возможность повысить механические свойства сплава за счет увеличения содержания неодима и циркония. Анализ диаграмм состояния показал, что повышение содержания неодима в сплаве приведет к дополнительному легированию твердого раствора, а также к образованию большого количества упрочняющей фазы $(MgZn)_{12}Nd$, что приведет к увеличению предела прочности (σ_B) [4]. Увеличение количества циркония в сплаве положительно скажется на пластичности за счет увеличения количества центров кристаллизации и последующего измельче-

ния зерна, тем самым повысив его относительное удлинение (δ) [5]. Таким образом, дополнительное легирование магниевого сплава неодимом и цирконием является перспективным для повышения общего комплекса механических свойств.

При разработке нового магниевого сплава и анализе его свойств был использован метод активного многофакторного эксперимента 2³ [6]. Данный метод позволяет получить достоверную информацию на базе небольшого количества исследовательского материала.

Изучали влияние (сод.) магниевого сплава в следующих пределах: Zr – 0,4...1,5%; Nd – 2,2...3,36%; Zn – 0,1...0,7%.

Образцы для эксперимента из магниевого сплава системы Mg-Zr-Nd выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Рафинирование расплава проводили флюсом ВИ-2 в раздаточной печи, из которой порционно отбирали ковшем металл и вводили возрастающие присадки лигатур, содержащих Zr, Nd, Zn, заливали стандартные образцы для механических испытаний в песчано-глинистую форму. Полученные образцы проходили термическую обработку в печах типа Бельвью и ПАП-4М по режиму: закал от 415^{±5}°C, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе и старение при 200^{±5}°C, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе. Временное сопротивление разрыва (σ) и относительное удлинение (δ) образцов с рабочим диаметром 12 мм. определяли на разрывной машине P5 при комнатной температуре.

Были построены матрицы планирования эксперимента по плану 2³ для изучения влияния неодима и циркония на (табл. 1) и (табл. 2) соответственно. Количество опытов для каждого уровня матриц планирования равнялась восьми, а количество серий опытов на нулевом уровне – трем. Влияние Zr в матрице закодировано под номером X₁, Nd – соответственно X₂, Zn – X₃, совместное влияние элементов Zr и Nd – X₁₂, Zr и Zn – X₁₃, Nd и Zn – X₂₃, Zr, Nd и Zn – X₁₂₃.

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты исследований по анализу предела прочности магниевого сплава

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₃	X ₁₂₃	σ _B
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	230
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	238
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	279
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	255
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	232
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	243
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	282
8	1	1	1	1	1	1	1	254
9	0	0	0	0	0	0	0	274
10	0	0	0	0	0	0	0	267
11	0	0	0	0	0	0	0	264

При расчете погрешности эксперимента получено значение дисперсии воспроизведения $G = 0,11$, что при величине критического значения критерия Кохрена

$G_{кр} = 0,331$ для доверительной вероятности 0,95 является целиком удовлетворительным результатом.

В процессе расчета были получены следующие значения коэффициентов регрессии: $B_0 = 251,62$; $B_1 = -4,125$; $B_2 = 15,875$; $B_3 = 1,125$; $B_{12} = -8,875$; $B_{13} = -0,125$; $B_{23} = -0,625$; $B_{123} = -0,875$. Проведен анализ уровня влияния коэффициентов с помощью критерия Стьюдента. Было определено, что критическое значение критерия Стьюдента равняется 3,182, поэтому значимыми для уравнения регрессии будут лишь коэффициенты B_2 и B_{12} . Окончательный вид уравнения регрессии (1), которое описывает влияние исследуемых химических элементов на предел прочности сплава имеет следующий вид:

$$\sigma_B = 251,63 + 15,875x_2 - 8,875x_1x_2 \pm 0,14 \text{ (МПа)}. \quad (1)$$

Анализ полученной математической модели показывает, что повышение содержания неодима существенно увеличивает уровень прочности сплава. Совместное влияние содержания неодима и циркония на значение предела прочности имеет отрицательный эффект. Влияние цинка было не значимым.

Металлографические исследования опытного металла показали, что исходная структура сплава состоит из твердого раствора неодима, циркония и цинка в магнии, эвтектики $\alpha + (\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ и интерметаллидов

$(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ (рис. 1а). Увеличение содержания Nd приводило к повышению количества и размера упрочняющей фазы, что повышало предел прочности (рис. 1б, в).

Аналогичная модель матрицы планирования была построена для изучения влияния химического состава на относительное удлинение.

Погрешность эксперимента составила 0,13 % для доверительной вероятности 0,95. При критическом значении критерия Кохрена $G_{кр} = 0,331$ эту погрешность можно считать вполне допустимой. Значения коэффициентов регрессии были получены следующие: $B_0 = 4,0375$; $B_1 = 0,6125$; $B_2 = -0,0625$; $B_3 = 0,1125$; $B_{12} = -0,7875$; $B_{13} = -0,0125$; $B_{23} = 0,0125$; $B_{123} = -0,0125$.

Анализ значимости полученных коэффициентов с помощью критерия Стьюдента показал, что наиболее значимыми являются коэффициенты B_1 , B_{12} . Уравнение регрессии принимает вид:

$$\delta = 4,0375 + 0,6125x_1 - 0,788x_1x_2 \pm 0,13 \text{ (%)}. \quad (2)$$

Полученное уравнение регрессии показывает, что цирконий увеличивает пластичность, а совместное влияние неодима и циркония ее снижает. Влияние цинка было не значимым.

Микроструктура образцов с повышенным содержанием циркония (рис. 2) отличалась более мелким зерном, что положительно сказывалось на пластичности сплава. При этом, наибольшая пластичность наблюдается при максимальном содержании циркония.

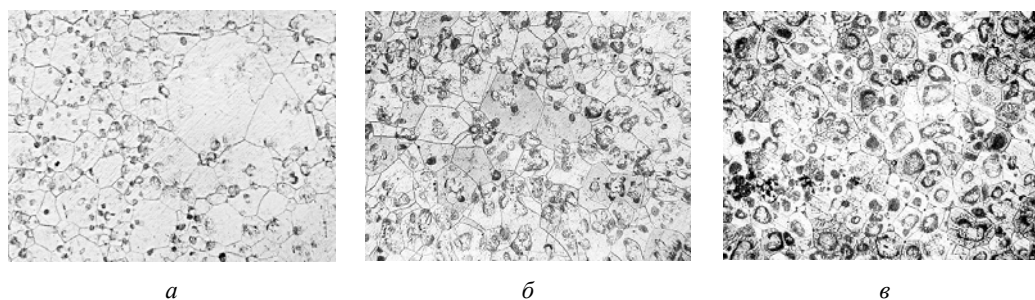


Рис. 1. Микроструктуры образцов из магниевого сплава при разном содержании неодима, $\times 350$:

а – 2,2 % Nd; б – 2,78 % Nd; в – 3,36 % Nd

Таблиця 2 – Матриця планування та результати досліджень по аналізу відносительного удлиннения магниевого сплава

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₃	X ₁₂₃	δ
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2,6
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	5,4
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	4
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	3,7
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	2,8
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	5,6
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	4,3
8	1	1	1	1	1	1	1	3,9
9	0	0	0	0	0	0	0	3,8
10	0	0	0	0	0	0	0	3,4
11	0	0	0	0	0	0	0	3,9

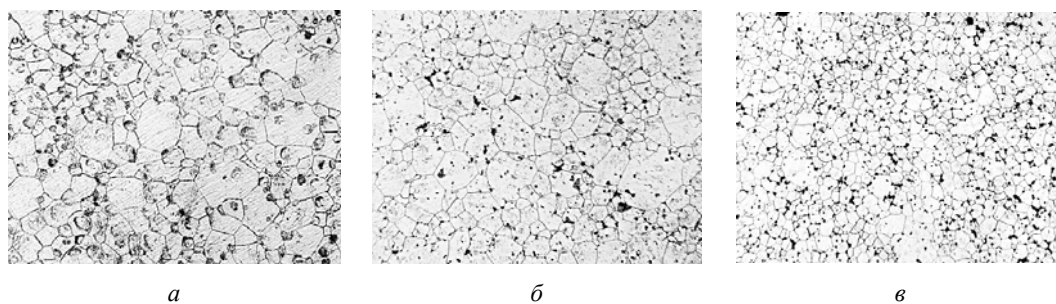


Рис. 2. Микроструктуры образцов из магниевого сплава при разном содержании Zr, × 100
a – 0,4 % Zr; *б* – 0,8 % Zr; *в* – 1,5 % Zr

Учитывая, что исследуемый сплав должен обладать максимальным уровнем механических свойств, проводили оптимизацию его химического состава.

Для получения оптимального комплекса механических свойств была проведена графическая оптимизация влияния легирующих элементов на соответствующие механические характеристики (рис. 3).

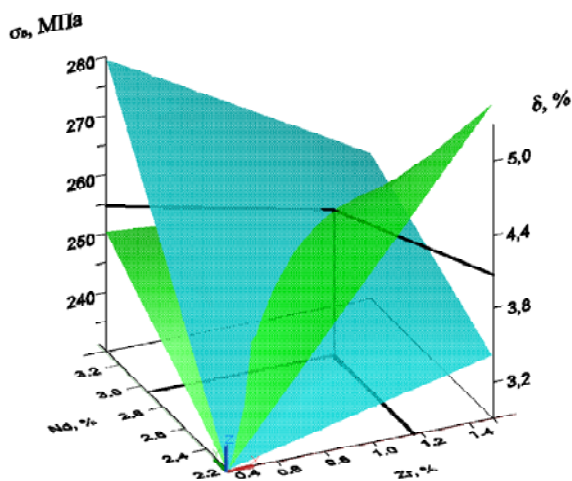


Рис. 3. Графическая оптимизация химического состава сплава системы Mg-Zr-Nd

В результате оптимизации был получен максимальный комплекс механических свойств ($\sigma_B = 255$ МПа; $\delta = 4,0\%$), что соответствует следующему содержанию легирующих элементов: Zr = 1,1–1,2%, Nd = 2,9–3,0%.

Разработанный новый магниевый сплав с повышенным комплексом свойств является перспективным материалом для создания современных авиационных двигателей с высоким уровнем эксплуатационных характеристик.

Выводы

1. Изучено влияние Nd, Zr и Zn на микроструктуру и механические свойства магниевого сплава. Были получены зависимости влияния химического состава на предел прочности (σ_B) и относительное удлинение (δ).

2. Проведена графическая оптимизация результатов эксперимента. Установлено, что содержание исследуемых легирующих элементов (Zr = 1,1–1,2%, Nd = 2,9–3,0%) обеспечивает максимальный комплекс механических характеристик сплава ($\sigma_B = 255$ МПа, $\delta = 4,0\%$).

3. Применение разработанного магниевого сплава повысит эксплуатационную надежность и долговечность деталей авиационных двигателей при одновременном уменьшении их веса.

Список литературы

1. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов / В. В. Антипов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 157–167.
2. Магниевые и литейные алюминиевые сплавы / И. С. Корнышева, Е. Ф. Волкова, Е. С. Гончаренко, И. Ю. Мухина // *Авиационные материалы. Избранные труды 1932-2007. Юбилейный научно-технический сборник*. – М. : ВИАМ, 2007. – 353 с.
3. ГОСТ 2856-79. Сплавы магниевые литейные. Марки / [Действ. От 01.01.81]. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
4. Gill L. Microstructure/property relationships of three Mg-RE-Zn-Zr alloys / L. Gill, G. W. Lorimer, P. Lyon // *Magnesium: Proceedings of the 6th international conference*. – 2005. – С. 421–426.
5. Колтыгин А. В. Анализ возможных фазовых превращений при кристаллизации и их влияние на литую структуру в сплаве МЛ10 / А. В. Колтыгин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 8. – С. 25–28.
6. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит – 2001. – 256 с.

Одержано 29.06.2017

Айкін М.Д., Шаломєєв В.А., Цивірко Е.І., Ключихін В.В. Розробка та оптимізація хімічного складу нового магнієвого сплаву для авіаційного лиття

Вивчено вплив основних легувальних елементів (Zr, Nd, Zn) на механічні властивості нового магнієвого сплаву. Побудована матриця планування експерименту за планом 2³. Проведено оптимізацію хімічного складу сплаву для отримання підвищеного комплексу властивостей.

Ключові слова: *магнієвий сплав, неодим, цирконій, границя розчинності, матриця планування експерименту, графічна оптимізація.*

Aikin M., Shalomeev V., Tsivirko E., Klochikhin V. Development and optimization of chemical composition of the new magnesium alloy for aircraft casting

The influence of the basic alloying elements (Zr, Nd, Zn) on the mechanical properties of the alloy of a new magnesium alloy is studied. The experimental planning matrix is constructed according to the plan 2³. Optimization of the chemical composition of the alloy for obtaining an increased complex of properties was carried out.

Key words: *magnesium alloy, neodymium, zirconium, solubility limit, experimental design matrix, graphical optimization.*
