

А.М. Галушко, С.Н. Леках,  
Г.В. Довнар, Б.М. Немененок,  
В.И. Толах

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СТАРЕНИЯ СПЛАВА АЛ4 С ДОБАВКАМИ ВТОРИЧНЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применение вторичных шихтовых материалов для производства отливок из алюминиевого сплава марки АЛ4 вызывает некоторое изменение его химического состава, в частности, в силумине возрастает содержание железа и меди. Медь и магний – основные элементы, упрочняющие алюминиевые сплавы системы алюминий – кремний в процессе термической обработки /1, 2/. Согласно диаграмм состояния систем Al – Si – Mg, Al – Si – Cu и Al – Si – Mg – Cu в кремниевых силуминах могут образовываться соединения  $Mg_2Si$  и  $CuAl_2$ , а также более сложные фазы типа  $W(Al_xMg_5Si_4Cu_4)$ , которые являются эффективными упрочнителями твердого раствора на основе алюминия /1/. Вместе с тем в алюминиевых сплавах при повышенном содержании железа следует ожидать появления фазы  $Cu_2Al_7Fe$ , обладающей низкой растворимостью в твердом растворе при нагреве сплава под закалку /1, 2/.

Указанные изменения структуры сплавов должны оказывать существенное влияние на процесс искусственного старения, во многом определяющего прочностные и особенно пластические свойства сплавов.

Для установления оптимального режима старения сплава АЛ4 с добавкой 10%-ного вторичного сплава АК9 кокильные стандартные образцы с диаметром рабочей части 12 мм подвергались закалке ( $535^{\circ}C$ , выдержка 3 часа) и искусственному старению при различных температурах ( $160-190^{\circ}C$ ). С увеличением времени выдержки во всем интервале изучаемых температур наблюдается рост твердости и прочности. Полученная закономерность свидетельствует о наличии процесса выделения дисперсных упрочняющих фаз. Однако время выдержки, при котором достигается максимальная прочность и твердость сплава, зависит от температуры старения. Так, при температурах 160, 175 и  $190^{\circ}C$  изотермические выдержки составляют соответственно 14, 9 и 8 часов. Наиболее благоприятное сочетание свойств наблюдается в результате обработки образцов при температуре  $175^{\circ}C$  в течение 8–10 часов. Ускорение режима старения путем повышения температуры процесса до  $190^{\circ}C$  не является эффективным, так как при этом понижаются прочностные

и пластические свойства.

Установлено /1/, что двухступенчатый режим старения обеспечивает создание оптимальной тонкой структуры  $\alpha$ -твердого раствора по сравнению со структурой, образованной при стандартной (175°C в течение 10 часов) термической обработке. Исследования /1/ показали, что предварительный высокотемпературный нагрев до 200–300°C способствует образованию в течение 5–60 мин ЗГП с высокой степенью плотности. Кроме ЗГП, наблюдается возникновение большого количества элементов метастабильной  $\beta'$ -фазы.

В исследованиях ставилась задача по разработке двухступенчатого сокращенного режима старения для термообработки отливок из сплава АЛ4, приготовленного с применением вторичных шихтовых материалов. Решение ее осуществлялось методом математического планирования экспериментов. В качестве независимых переменных факторов, влияющих на свойства сплава, были выбраны:

- $X_1$  – температура предварительного нагрева, °C (  $t$  );
- $X_2$  – продолжительность предварительного нагрева, мин ( $\tau_1$ );
- $X_3$  – продолжительность второй стадии старения при 175°C, час ( $\tau_2$ ).

В качестве параметров оптимизации принимались следующие величины:

- $Y_1$  – предел прочности при растяжении ( $\sigma_B$ , кг/мм<sup>2</sup>);
- $Y_2$  – твердость (НВ, кг/мм<sup>2</sup>);
- $Y_3$  – относительное удлинение ( $\delta$ , %).

Была реализована матрица полного факторного эксперимента плана  $2^3$  (табл. 1).

Таблица 1. Матрица планирования экспериментов по оптимизации режима старения сплава АЛ4 с добавками вторичных шихтовых материалов

Условия проведения экспериментов	Факторы		
	$t$ , °C	$\tau_1$ , мин	$\tau_2$ , час
Основной уровень	215	35	4,5
Интервал варьирования	25	25	2,5
Верхний уровень	240	60	7
Нижний уровень	190	10	2

Из экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 27,6 - 0,6X_1 - 0,2X_3 - 0,6X_1 \cdot X_2 - 0,52X_1 \cdot X_3;$$

$$Y_2 = 84 - 5X_1 + 1,62X_3 + 1,4X_1 \cdot X_2;$$

$$Y_3 = 3,2 + 0,5X_1.$$

Анализ вышеприведенных уравнений показывает, что прочность и твердость статистически зависят от всех трех факторов ступенчатого режима старения. Относительное удлинение определяется в основном температурой предварительного перегрева.

Так как основным параметром оптимизации в изучаемом варианте является предел прочности при растяжении ( $Y_1$ ), восхождение осуществляли по градиенту поверхности отклика данной функции. Результаты крутого восхождения позволили определить оптимальный вариант сокращенного ступенчатого режима старения. В табл. 2 показаны сравнительные характеристики оптимизированного и заводского режимов старения.

Таблица 2. Характеристика оптимизированного и заводского режимов старения

Режим старения	1-я стадия		2-я стадия		Общая продолжительность процесса, час	Механические свойства		
	t, °C	τ, мин	t, °C	τ, час		σ <sub>в</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	НВ, кг/мм <sup>2</sup>	δ, %
Оптимизированный	200	45	175	3	3,75	29,5	92	3,4
Заводской	-	-	175	8-10	8-10	29,8	92	3,0

Сравнение механических свойств отливок из сплава АЛ4, термообработанных по заводскому одноступенчатому и сокращенному двухстадийному режимам старения, показывает, что разработанный режим обеспечивает получение равноценной прочности и твердости отливок и более высокой пластичности при сокращении продолжительности процесса в два раза.

#### Л и т е р а т у р а

1. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М., "Металлургия", 1966. 2. Лейбов Ю.М., Базилевский В.М. Влияние меди и железа на эффективность тер-

мической обработки литейного алюминиевого сплава АД-9В. В сб.: "Металлургия вторичных цветных металлов и сплавов", с. 75-81, М., "Металлургия", 1972.

А.М. Галушко, О.М. Неросли-зский,  
В.С. Очеретяный, Ю.В. Маркаров,  
О.А. Тиханович

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ СПЛАВА АЛ4

В работе сделана попытка оценить взаимосвязь химического состава и механических свойств термообработанного по режиму Т8 сплава АЛ4 при литье в кокиль. Корреляционный и регрессионный статистический анализ 1200 плавок, проведенных за 1972-1973 годы, производился с помощью ЭВМ "Минск-22". Оценивалась связь предела прочности при растяжении ( $\sigma$ , кг/мм<sup>2</sup>), относительного удлинения ( $\delta$ , %) и твердости (НВ, кг/мм<sup>2</sup>) с процентным содержанием в сплаве магния, кремния, марганца, железа и меди.

Уравнение регрессии, описывающее связь механических свойств (Y) и химического состава (X), получено в виде многочлена Маклорена:

$$Y = A + \sum A_i X_i + \sum A_{ij} X_i X_j + \sum A_k X_i^2 + \dots$$

Члены уравнения порядка выше второго были незначимы и отбрасывались. Правдоподобность полученных уравнений проверялась по критерию Пирсона при уровне значимости 0,05. Неизвестные коэффициенты находились методом наименьших квадратов. Затем рассчитывалась стандартная ошибка и коэффициенты частной и множественной корреляции.

Уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma = & 24,05 - 1,06\text{Si} - 16,74\text{Mg} + 28,39\text{Fe} - 8,42\text{Mn} - 9,57\text{Cu} + \\ & + 2,94\text{MgSi} - 0,77\text{SiFe} + 0,54\text{SiMn} + 0,51\text{SiCu} - 18,82\text{MgFe} + \\ & + 17,91\text{MgMn} + 22,88\text{MgCu} - 16,91\text{FeMn} - 3,44\text{FeCu} + \\ & + 9,73\text{MnCu} + 0,06\text{Si}^2 - 5,82\text{Mg}^2 - 7,76\text{Fe}^2 + 7,57\text{Mn}^2 - 3\text{Cu}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta = & 6,17 - 0,02\text{Si} + 8,22\text{Mg} + 6,46\text{Fe} - 21,49\text{Mn} - 18,19\text{Cu} - \\ & - 2,77\text{MgSi} - 0,05\text{SiFe} + 1,27\text{SiMn} + 0,45\text{SiCu} - 5,14\text{MgFe} + \\ & + 1,27\text{MgMn} + 15,03\text{MgCu} + 3,92\text{FeMn} + 6,87\text{FeCu} - \end{aligned}$$