

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕВЫХ СПЛАВОВ

А. И. Мезенцева¹, А. А. Ганеев¹, Е. Ф. Шайхутдинова²

Уфимский государственный авиационный университет¹,

г. Уфа, Россия

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А. Н. Туполева – КАИ²,

г. Казань, Россия

В настоящее время использование алюминиевых поршневых сплавов обусловлено преимуществами данных сплавов по сравнению с другими. Например, алюминиевые поршневые сплавы примерно в 2,6 раза легче чугуна, обладают в 3 – 4 раза большей теплопроводностью и хорошими антифрикционными свойствами. Благодаря этому вес изготовленных из алюминиевых поршневых сплавов поршней, как минимум на 30 % легче чугунных, хотя стенки поршней по соображениям прочности толще. Также эксплуатационные характеристики алюминиевых поршней обеспечивают увеличение мощностных и экономических показателей двигателей.

Однако в настоящее время основными недостатками алюминиевых поршневых сплавов являются большой коэффициент линейного расширения, значительное уменьшение механической прочности при нагреве (нагрев до температуры 300 °С снижает их прочность на 50 – 55 %) и сравнительно малая износостойкость.

Таким образом, развитие двигателей нового поколения зависит от создания новых алюминиевых жаропрочных поршневых сплавов, применение которых улучшит эксплуатационные и технологические свойства поршневых двигателей. На основании этого на первый план выходит проблема разработки сплавов с заданными свойствами, которая может быть решена только на основе сочетания методов классического металловедения, физики металлов, математических методов анализа и синтеза [3].

В работах [4, 5] рассмотрены подходы к проектированию с помощью концепции синтеза сплавов, которая включает два основных направления – активное планирование эксперимента и использование данных пассивного эксперимента. Достоинством данных подходов проектирования сплавов является использование достижений информатики и вычислительной техники, а также методов пассивного эксперимента, которые позволяют

сократить срок проектирования и уменьшить материальные затраты.

Для проектирования жаропрочных алюминиевых сплавов на основе концепции синтеза сплавов были решены следующие задачи:

1. Разработана база данных, содержащая информацию о составах, механических и жаропрочных свойствах литейных алюминиевых поршневых сплавов, и информационно-поисковая система к базе данных [6]. Разработка базы данных производилась на основе собранного на естественном языке банка данных по отечественным и зарубежным жаропрочным сплавам по июнь 2013 г. Разработанная база данных учитывает специфику материалов, применяемых в машиностроении. Реализация базы данных необходима для проведения статистических исследований с целью построения математической модели сплава.

2. Разработан метод восстановления недостающей информации в базе данных о свойствах литейных алюминиевых поршневых сплавов.

3. Определение диапазонов концентраций легирующих элементов, обеспечивающих максимум жаропрочности литейных алюминиевых поршневых сплавов на основе обобщения статистической информации из базы данных.

Таким образом, для построения математических моделей влияния составов литейных алюминиевых поршневых сплавов на их жаропрочность и для программной реализации алгоритмов расчета с использованием метода искусственных нейронных сетей необходима оценка влияния легирующих элементов и примесей на жаропрочность сплава. Это связано с тем, что задача проектирования жаропрочных сплавов сводится к нахождению оптимального состава сплава по максимуму функции жаропрочности для рабочих температур с учетом ограничений на концентрации элементов, составляющих сплав.

Все легирующие элементы, входящие в

состав литейных алюминиевых сплавов, можно разделить на три группы: основные легирующие элементы, малые добавки и примеси (таблица 1). Одни и те же элементы могут относиться к разным группам в зависимости от сплава, а также в зависимости от

соотношения между элементами могут образовываться различные фазы [7 – 9].

Классификация легирующих элементов и примесей по их влиянию на фазовый состав и структуру в промышленных алюминиевых сплавах.

Таблица 1 – Классификация легирующих элементов и примесей по их влиянию на фазовый состав и структуру в промышленных алюминиевых сплавах

Элементы структуры	Легирующие элементы и примеси
Твердорастворное легирование (Al) и образование фаз – упрочнителей	Cu, Mg, Si, Zn, Li, Mn
Образование нерастворимых (при отжиге) эвтектических фаз	Fe, Ni, Mn, Mg, Si, Cu, Be
Образование первичных кристаллов	Fe, Ni, Mn, Si, Zr, Cr, Ti
Образование дисперсоидов при отжиге	Mn, Zr, Cr, Ti, Sc, (Si, Cu)
Микродобавки, мало влияющие на фазовый состав	Be, Cd, Sr, Na, Ti, B

Основными легирующими элементами в промышленных алюминиевых сплавах являются кремний, магний, медь, цинк, реже марганец, железо и никель. В сплавах специального назначения (1420, 1440, 1450 и др.) основным легирующим компонентом является литий. Все перечисленные элементы обладают ограниченной растворимостью в алюминии в твердом состоянии. И структура многокомпонентных алюминиевых сплавов содержит сложные эвтектики. Количество эвтектики определяет литейные свойства алюминиевых сплавов. С повышением температуры плавления эвтектики ее вклад в жаропрочность сплава увеличивается. Ввиду того что эвтектика кристаллизуется в последнюю очередь, она окружает зерна первичного твердого раствора, образуя между ними эвтектические прослойки.

Таким образом, анализ собранной базы данных по алюминиевым сплавам, а также работ [7 – 9] показал, что в качестве основных легирующих элементов в подавляющем большинстве промышленных алюминиевых сплавов используют всего четыре металла – магний, медь, цинк и полупроводник кремний, что объясняется их значительной растворимостью в алюминии в твердом состоянии, и они определяют главные особенности структуры и свойств сплавов [8, 9]. Все остальные легирующие элементы растворяются в алюминии в меньших количествах (десятые – тысячные доли ат. %).

Содержание основных элементов согласно собранной базе данных колеблется в следующих пределах: магний – 0,2 – 13 %; медь – от 0,003 до 48 %; цинк – 0,0001 – 8 %; кремний – 0,01 – 25 %. Содержание марганца колеблется от 0,003 до 2 %. Марганец явля-

ется универсальной малой добавкой, основной целью его введения является дополнительное упрочнение сплавов. Титан, цирконий, хром и ванадий тоже относятся к универсальным малым добавкам.

Железо и никель, содержание которых колеблется от 0,06 до 2,8 %, а также церий (0,04 – 0,5 %) образуют эвтектику со стороны алюминия, вызывают образование избыточных фаз кристаллизационного происхождения, которые снижают пластичность и коррозионную стойкость. В нашем случае определяющим свойством сплавов является жаропрочность, то их введение необходимо и обосновано, так как алюминиды никеля, железа и церия являются тугоплавкими.

Особое действие оказывает добавка бериллия, который содержится в алюминиевых сплавах в пределах от 0,0001 до 0,4 %. Ввод бериллия способствует увеличению антикоррозийных свойств, а также значительной мере может нейтрализовать вредное влияние примеси железа на пластичность и вязкость разрушения.

Наиболее эффективными малыми добавками, способными существенно повысить прочностные свойства алюминиевых сплавов (в первую очередь на базе систем Al—Cu, Al—Si—Cu—Mg) за счет влияния на процесс старения, являются кадмий и серебро [7, 8]. Содержание кадмия в сплавах от 0,005 до 0,07 % приводит к изменению фазового состава продуктов старения и их диспергированию, повышая прочностные свойства сплавов системы Al-Cu после закалки и старения.

В последние годы в качестве добавки упрочнителя алюминиевых сплавов различных систем, в первую очередь магниевых,

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕВЫХ СПЛАВОВ

стал использоваться скандий. Скандий, несмотря на малое количество (0,003 – 0,5 %), более корректно считать основным легирующим элементом, так как он может вносить очень значительный вклад в упрочнение, соизмеримый с вкладом, например нескольких процентов магния. Среди других малых добавок следует отметить натрий, стронций, ванадий, титан, хром, бор и т. п.

На основании выше сказанного, для построения зависимости величины жаропрочности от концентраций легирующих элементов использованы методы регрессионного анализа.

Факторы, влияющие на жаропрочность сплава, рассматриваются как случайные величины, поскольку вероятность того, что жаропрочность соответствует заданной комбинации факторов, составляет $10^{-58} \dots 10^{-60}$.

В общем случае, мы не можем судить о том, какой вид должно иметь уравнение регрессии. Поэтому решено было использовать метод всех возможных регрессий, заключающийся в полном переборе наиболее применимых к описанию природных и техногенных процессов классов уравнений. В нашей работе использовался перебор следующих классов математических зависимостей:

– полиномиальные функции вида

$$z(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^m \beta_{ij} \cdot x_i^k \cdot \ln^l(x_i), \quad (1)$$

где k, l – позиция сплава в базе данных в исследуемой выборке из базы данных, $k, l = -5, \dots, 5$;

– рациональные функции вида

$$z(x_1, x_2) = \frac{z_1(x_1, x_2)}{z_2(x_1, x_2)} \quad (2)$$

где z_1, z_2 – полиномиальные функции;

– нелинейные гауссовы функции вида и т. д.

Общее число функций, выбранных для рассмотрения, составило порядка 64 000. Для проведения регрессионного анализа использовался пакет MS Office Excel, а также в данном пакете строили графики зависимости для аналитического сравнения обработанных результатов в другом пакете анализа.

Аналогичные графики влияния легирующих элементов на жаропрочность алюминиевых сплавов были построены для других элементов: Si, Zn, Cr, Be и т. д.

Использование различных программных пакетов для обработки статистических данных по свойствам сплавов для оценки влияния легирующих элементов на жаропрочность позволило исключить влияние на полученные результаты систематической ошибки того или

иного метода и повысить их достоверность.

На основании предложенной методики математического моделирования по его результатам были построены специальные диаграммы зависимости жаропрочности при исследуемых температурах от электронной плотности сплава и концентраций легирующих элементов. После проведения ранжирования уравнения регрессии оказалось, что для большинства легирующих элементов наиболее адекватными являются уравнения, принадлежащие к подмножеству нелинейных гауссовых функций.

После нахождения математической модели влияния концентраций легирующих элементов на жаропрочность сплавов на основании информации из массива исходных данных, с помощью достижений информатики и техники (нейросетевые технологии, программы моделирования и прогнозирования) определяем состав, которому отвечает максимальное прогнозируемое значение жаропрочности, что осуществляется с помощью метода поиска максимума эмпирической функции, определяемой найденной моделью.

Список литературы:

1. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. Под общей редакцией академика РАН И. Н. Фридляндера. – К.: "КОМИНТЕХ", 2005. – 365 с.
2. Золоторевский В. С. Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. / Золоторевский В. С. — М.: Металлургия, 1981. 192 с.
3. Ганеев А. А., Шайхутдинова Е. Ф., Кулаков Б. А., Мезенцева А. И. Теоретические основы автоматизированного проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2012. № 15 (274). – С. 41-45.
4. Ганеев А. А. Автоматизированная система построения математической модели для синтеза литейных жаропрочных сплавов // А. А. Ганеев, Д. В. Попов, П. В. Аликин, П. Н. Никифоров. Литейщик России. – №6. – 2009. – С.22-24.
5. Ганеев А. А. Математическое моделирование влияния легирующих элементов на жаропрочность никелевых сплавов с монокристаллической структурой // Ганеев А. А., Нургаянова О. С., Павлинич С. П. – Вестник УГАТУ. – №1 (17). – Т. 8 – 2006. – С. 91-96.