

УДК 621.74

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. А. ГАНЕЕВ, Е. Р. ГОТОВЦЕВА, Д. В. ПОПОВ

Факультет авиационно-технологических систем УГАТУ
Тел: (3472) 23 77 55 E-mail: mitlp@ugatu.ac.ru

В статье обсуждается одна из ведущих проблем развития аэрокосмической техники — поиск и создание новых жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД. Предлагаемый научный подход позволяет проводить оптимизацию состава сплава с использованием методов математического аппарата и применением ЭВМ. Построены полиномиальные модели влияния химического состава на жаропрочность никелевых сплавов. Проверена адекватность полученных моделей непараметрическими методами

Автоматизированный синтез сплавов; никель; жаропрочность; метод информационной оценки; метод главных компонент; метод группового учета аргументов; регрессионный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в области реактивного двигателестроения определяется прежде всего повышением рабочих температур газовых турбин. Однако параметры работы турбин ограничиваются характеристиками жаропрочных материалов, применяемых для лопаток. Лопатки изготавливаются в основном из литейных жаропрочных никелевых сплавов. Сложность конфигурации лопаток, в частности, наличие внутренних полостей, делает литье не только экономичным, но и единственным возможным методом их получения. Кроме того, литые сплавы, состав которых не ограничивается условиями хорошей обрабатываемости при пластической деформации, могут иметь более высокую степень легирования, а следовательно, повышенную жаропрочность. В результате достигается их преимущество в жаропрочности примерно на 45–60% по сравнению с деформируемыми сплавами [1].

Наиболее распространенные в отечественной практике авиационного газотурбиностроения лопаточные сплавы ЖС6-К и ЖС6-У имеют предел сточасовой длительной прочности при 1000°С не более 150–180 МПа, а при 1050°С — 80–110 МПа [2,3]. Эти свойства уже не удовлетворяют современным

условиям эксплуатации газотурбинных двигателей в связи с требованиями значительного увеличения ресурса и повышения рабочей температуры.

Для лопаток новых двигателей необходимы жаропрочные материалы, способные работать при температурах 1000°С и выше при одновременном воздействии агрессивной среды и высокой нагрузки [4].

1. ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является синтез новых литейных высокожаропрочных сплавов на никелевой основе для лопаток турбины при удовлетворительном уровне литейных свойств, а также приемлемой стоимости.

Актуальность разработок никелевых сплавов сохраняется, что подтверждается ежегодным появлением новых отечественных и зарубежных сплавов.

Однако прогресс в области синтеза новых сплавов в значительной степени сдерживается отсутствием эффективных методов определения области поиска. Все еще приходится руководствоваться чутьем исследователя в выборе нужных композиций сплавов. Затрачиваются огромные средства на исходные дефицитные материалы, дорогостоящее обо-

дование и проведение большого количества плавов.

Нужны новые эффективные методы предсказания существования материалов с необходимым комплексом свойств. Такой прогноз рационально сузит область поиска, сделав затрату тех же средств во много раз эффективней. В связи с этим использован новый подход к проблеме прогнозирования свойств сплава, опирающийся на возможность использования ЭВМ и применения методов математической статистики и теории распознавания образов (ТРО).

2. ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ БАЗЫ ДАННЫХ

Для решения поставленной проблемы разработана информационно-поисковая система (ИПС) и база данных (БД) по современным отечественным и зарубежным жаропрочным никелевым сплавам со следующими характеристиками:

- база данных содержит сведения по более чем 790 сплавам на основе никеля, опубликованным в различных источниках по состоянию на конец 1999 г. (глубина поиска 40 лет);
- реализованы режимы: поиска данных, удовлетворяющих заданным критериям; корректировки базы данных; обработки данных и выдачи результатов в текстовом и графическом режимах.

Создана как основная (общая) база данных, так и 16 вспомогательных БД по классам жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от типа упрочняющих фаз. Эти классы были выделены из общей БД методом последовательной кластеризации по типу основных упрочняющих фаз.

Проведенное исследование позволило сформулировать основные недостатки структуры представления сведений о жаропрочности сплавов из БД, связанные с большим диапазоном температур и небольшим числом сплавов, для которых известны значения жаропрочности; резким различием объемов выборок при переходе с одной температуры на соседнюю; группировкой сплавов по температурам в зависимости от страны-производителя. Для преодоления перечисленных недостатков были разработаны метод и компьютерная программа повышения информативности базы данных, основанные на автоматическом индивидуальном подборе шкал для нелинейного преобразования, обеспечивающего максимальное спрямление зависимости с учетом характера изменения жаропрочности

от температуры каждого сплава из БД. Для этого решалась задача нахождения варианта $i_{\text{опт}}$ сочетания ряда шкал по рабочей температуре (x) и жаропрочности (y) в соответствии с критерием оптимальности

$$i_{\text{опт}} = \arg \min_i \max_j \frac{\sqrt{\frac{1}{n_{V_{nj}}} \sum_{x \in V_{nj}} (y - Y_{V_{nj}}^i(x))^2}}{\sqrt{\sum_{y \in V_{nj}} y^2}}, \quad (1)$$

где на основе разбиения известных свойств сплава на обучающую V_0 и проверочную V_{Π} выборки и применения кубического сплайна, построенного по выборке V_0 для нахождения относительных квадратичных отклонений интерполированных значений жаропрочности $Y^i(x)$ для температур из V_{Π} от известных (y) при использовании варианта i сочетания шкал.

Преимуществом сплайнов перед обычной интерполяцией (например, многочленами Лагранжа или Ньютона) является, во-первых, их сходимость и, во-вторых, устойчивость процесса вычисления. Для каждого отрезка $[x_i, x_{i+1}]$ изменения x кубическая сплайн-функция записывается в виде

$$Y_i(x) = \frac{1}{6h_i} \left[m_i (x_{i+1} - x)^3 + m_{i+1} (x - x_i)^3 \right] + \frac{1}{h_i} \left[\left(y_i - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) (x_{i+1} - x) + \left(y_{i+1} - \frac{m_{i+1} h_i^2}{6} \right) (x - x_i) \right], \quad (2)$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$, $Y_i(x) = y(x)$, $m_i = Y''(x_i)$ и $i = 1, 2, \dots, n$ (n — число узлов). Для получения значений m_i решается система линейных уравнений при $Y_i(x) = y_i$:

$$h_i m_i + 2(h_i + h_{i+1}) m_{i+1} + h_{i+1} m_{i+2} = 6 \left(\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right), \quad (3)$$

$$m_1 = 0, \quad m_n = 0.$$

На вход программы сплайн-интерполяции подаются пары значений температуры t_i и жаропрочности y_i , а также вектор, состоящий из температур T_j , для которых необходимо возратить интерполированные значения жаропрочностей. После соответствующего нели-

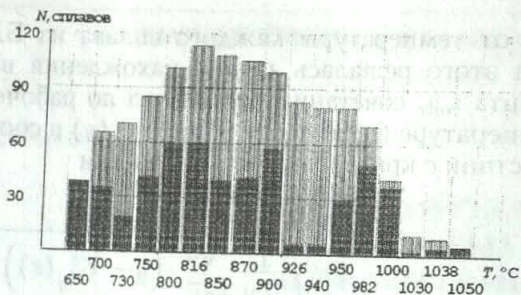


Рис. 1. Распределение числа сплавов по температурам после проведения интерполяции

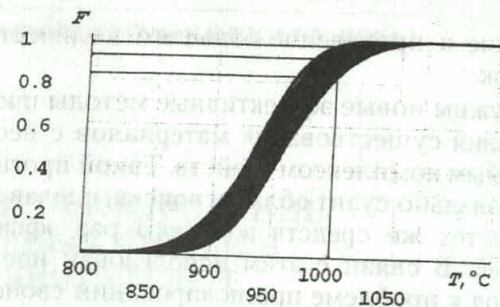


Рис. 2. Построение доверительной области распределения вероятностей рабочей температуры

нейного преобразования $x_i = f(t_i)$ и получения значений m_i производится формирование вектора результатов Y .

Применение описанного метода позволило для большинства сплавов в 2–15 раз повысить точность интерполяции жаропрочности. На диаграмме рис. 1 приведены размеры выборок значений 100-часовых жаропрочностей до (более темные части столбиков) и после проведения процедуры интерполяции, из которой видно, что для большинства температур произошло увеличение размера выборок значений жаропрочности в 2–3 раза.

Методы обработки информации выбирались с учетом их применимости для выборок малого объема с возможным зашумлением.

3. ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОСТИ

Для построения математических моделей и получения в качестве результата состава сплава с более высокими по сравнению с имеющимися свойствами необходимо оценить вероятность получения такого результата, а также содержательность информации из БД. Для оценки резервов повышения жаропрочности сплавов были разработаны математический метод и реализующая его компьютерная программа с применением метода информационной оценки [5], который учитывает специфику БД по жаропрочным никелевым сплавам, связанную с необходимостью обработки малых объемов данных, основан на принципе максимизации энтропии Э. Т. Джейнса и позволяет на конструктивной основе, без выдвижения необоснованных гипотез, получать точечные и интервальные оценки максимального правдоподобия для закона распределения значений рабочей температуры в заданных для них физически оправданных границах.

Оценка резервов повышения жаропрочности никелевых сплавов основывалась на том положении, что наличие большого числа различных факторов, влияющих на количественные значения рабочей температуры, позволяет рассматривать их как значения случайной величины X с некоторым законом распределения. Тогда задача оценки резервов формулировалась как задача нахождения вероятности того, что значения, принимаемые X , будут заключены в промежутке между максимальным значением рабочей температуры x_M в рассматриваемых сплавах и правой границей возможных значений рабочей температуры b по формуле

$$P(x_M < X < b) = 1 - F(x_M) = 1 - \int_a^{x_M} f(x) dx, \quad (4)$$

где a — левая граница возможных значений рабочей температуры; f — плотность распределения значений рабочей температуры, определяемая согласно методу информационной оценки как

$$f(x) = \exp \{-\lambda_0 - \lambda_1 x - \lambda_2 x^2\}. \quad (5)$$

Неизвестные параметры λ_0 , λ_1 и λ_2 находились из системы уравнений правдоподобия, для численного параметрического решения которой применялся эффективный алгоритм [5].

Границы доверительной области для интервальной оценки распределения вероятностей рабочей температуры $[1 - F_{\max}(x_M), 1 - F_{\min}(x_M)]$ определялись как огибающие семейства кривых распределений вероятностей, построенных для выборок, сформированных из случайных чисел, распределенных по закону $F(x)$ [6].

На основе компьютерной программы было осуществлено прогнозирование, показавшее с доверительной вероятностью 0,99 существование резервов повышения рабочей температуры жаропрочных никелевых сплавов на 40–80° С для 100-часовой длительной прочности в диапазоне напряжений 100–300 МПа [6]. На рис. 2 приведено построение доверительной области распределения вероятностей рабочей температуры при напряжении 189 МПа.

Задача прогнозирования свойств и синтеза литейного сплава особенно сложная, и в настоящее время сформулированы лишь пути, на которых ожидается получение необходимой информации. Трудности решения этой задачи весьма значительны и при выделении характеристик, и при их измерении, поэтому в качестве первого этапа математического моделирования жаропрочного сплава решалась проблема выбора факторов, определяющих растворимость легирующих элементов в никеле — металле-основе жаропрочного сплава, и наиболее перспективных компонентов сплава, включенных в математическую модель.

4. ВЫБОР ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для проведения исследований структуры и физико-химических свойств сплавов, а также анализа возможности получения различных твердых растворов была собрана информация о различных микроскопических характеристиках атомов, составляющих сплав. Многие объемные свойства атомов связаны с такими характеристиками, как размеры ионов и атомов металла, взаимное расположение энергетических уровней атома, электронная конфигурация атома, структура элементов, импульс Ферми элемента, энергия ионизации атома, электроотрицательность по Полингу, Маликену и т. д. Кроме того, при математическом моделировании сплавов такие характеристики служат исходными параметрами модели сплава.

Для проведения таких исследований был собран банк данных (БнД), содержащий физические характеристики атомов элементов периодической системы Менделеева на естественном языке, а затем реализована база данных «AtomData» и система управления базой данных (СУБД) «Atom» в среде FoxPro на языке dBase-III.

Основой базы данных «AtomData» является банк данных, содержащий сведения об атомах 90 элементов. БнД содержит 40 полей за-

писей по физическим характеристикам атомов элементов.

«AtomData» — база данных открытого типа, возможно дополнение ее другими характеристиками атомов элементов. С помощью разработанного пакета прикладных программ «Diagrams» анализируются первичные и промежуточные фазы твердого раствора, определяется растворимость всех элементов периодической системы Менделеева с 1 по 90 номер в выбранном металле-основе, делается прогноз для твердых растворов внедрения и замещения, оценивается качество эмпирических параметров.

С помощью указанных программ в качестве легирующих компонентов жаропрочного сплава на никелевой основе были выбраны: Co, Cr, Al, Ti, Mo, Nb, Hf, C, Ta, Ce, V, Zr, Y, которые и были использованы в качестве параметров полиномиальной модели, разрабатываемой на следующем этапе.

5. ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЖАРОПРОЧНОСТИ

Предварительно был произведен выбор критериев оценки качества моделей. Так как в нашей постановке задачи математический анализ проводился по данным пассивного эксперимента, ошибка в модели могла быть не случайной, а оказаться следствием влияния латентных переменных.

Применение метода главных компонент позволило существенным образом упростить процедуру анализа многомерных данных о составах жаропрочных никелевых сплавов, поскольку производимая декорреляция признакового пространства позволяет исключить из рассмотрения многочисленные статистически значимые корреляционные моменты, кроме того, метод позволяет осуществлять процедуру снижения размерности признакового пространства, а также предоставляет исследователю возможность для изучения поведения каждой получаемой главной компоненты независимо от других [7].

При моделировании влияния химического состава на жаропрочность использовали объемную модель, т.е. 14-мерное пространство признаков (тринадцать легирующих элементов и свойство). Объектом в данной задаче служил сплав, отличительным признаком — химический состав сплава, т.е. процентное содержание каждого легирующего элемента, входящего в сплав. Набор химических элементов был принят за вектор признаков. То-

гда каждый сплав можно представить в пространстве признаков отдельной точкой.

С целью выделения компактной группы сплавов с высокими свойствами в пространстве признаков были применены различные методы кластерного анализа. Для жаропрочных никелевых сплавов меньший процент ошибок при классификации дал метод сфер теории распознавания образов. Этим методом был выделен сравнительно однородный класс сплавов с высокой жаропрочностью. Далее работали только с ним.

Для решения задачи построения полиномиальной зависимости жаропрочности никелевого сплава от его химического состава были использованы различные методы и получены математические модели:

1) Шаговый регрессионный метод в пакете Statgraphics [8]:

$$y = 13,896 + 0,253X_4 + 0,536X_6 + 0,432X_7 + 4,146X_{10}, \quad (6)$$

где SE — среднеквадратическая ошибка на выборке $C = 7.511e+02$, а относительная ошибка $S/y = 32,6\%$ (y — среднее арифметическое значение выходного параметра — жаропрочности).

2) Метод группового учета аргументов (МГУА), разработанный в Киевском институте кибернетики [9].

Был рассмотрен ряд вариантов задачи с различными протекциями и запретами, а также критериями и максимальной сложностью. Из полученных моделей наилучшие результаты по прогнозированию дала математическая модель № 3:

$$Y = 1,3945e - 01X_1 + 3,2635e - 02X_1X_9 + 5,0880e - 02X_3X_5 + 1,6182e - 02X_2X_3 - 1,3198e - 02X_8 + 4,1868e - 03X_3X_4 - 8,4067X_9 + 6,7149X_7. \quad (7)$$

Значение критерия равно $1,69474e+02$; $X_1 = C$; $X_2 = Cr$; $X_3 = Ni$; $X_4 = Co$; $X_5 = Mo$; $X_6 = W$; $X_7 = Ti$; $X_8 = Al$; $X_9 = B$.

Значимость коэффициентов модели № 3:

$$a1 = 0.21(-); \quad a2 = 0.15(-); \quad a3 = 0.13(-); \\ a4 = 0.24(-); \quad a5 = 0.14(-); \quad a6 = 0.00(-); \\ a7 = 0.44(-); \quad a8 = 0.00(-).$$

Критическое значение — 1.52; S — среднеквадратическая ошибка на выборке $C = 190,8219$; относительная ошибка

$S/y = 25,6\%$ (y — среднее арифметическое значение выходного параметра — жаропрочности).

3) Метод аппроксимации функции многочленом второй степени [10].

Были получены полиномиальные модели аппроксимацией многочленами 1-, 2-, 3-й степени. Модель второго порядка оказалась наиболее точной из полученных, так как у нее меньше ошибка, нормированная по теоретической оценке, и ошибка по разности левой и правой частей. Данную модель удалось улучшить, исключив из обучающей выборки выбросы за пределы 3σ .

Свободный член $A_0 = 0,1352$. Коэффициенты при первых степенях:

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
0,277	-0,215	0,154	-0,040	0,194
X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
0,438	1,359	0,008	0,845	0,017
X_{11}	X_{12}	X_{13}		
-0,148	0,257	-0,214		

Коэффициенты при парных взаимодействиях приведены в таблице.

Ошибка, нормированная по теоретической оценке, в программе равна 0,05792; ошибка по разности левой и правой части уравнений равна 0,04336.

Коэффициенты модели в виде полинома 2-й степени являются значимыми, так как проводилась нормировка данных с целью приведения данных к единой шкале:

$$T_i = \frac{X_i - X_{\text{сред.}}}{X_{\text{макс.}} - X_{\text{мин.}}}; \quad T_i < 1,$$

где T_i — нормированное значение исходного параметра X_i , деленное на интервал его изменений и сдвинутое на среднее значение. Поэтому коэффициенты многочлена при 1-й и 2-й степени дают относительный вклад соответствующих слагаемых в нормированное значение функции

$$Y = \frac{Y - Y_{\text{сред.}}}{Y_{\text{макс.}} - Y_{\text{мин.}}}.$$

Проверка адекватности перечисленных моделей осуществлялась по коэффициенту детерминации, коэффициенту множественной корреляции, по критерию Фишера, критерию Бокса и Веса, а также оценивалась экспертами-литейщиками по субъективным критериям.

Таблица

Коэффициенты при парных взаимодействиях

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
X_1	-0,05	-0,39	0,11	-0,37	-0,18	0,13	-0,39	0,29	0,74	-0,11	-0,06	0,19	-0,19
X_2		-0,05	-0,27	0,26	0,23	0,08	-0,05	-0,20	-0,58	-0,16	0,49	-0,22	0,01
X_3			-0,40	-0,25	-0,15	0,35	0,65	0,20	-0,60	-0,07	0,03	-0,20	-0,18
X_4				-0,22	0,18	-0,21	-0,28	-0,49	-0,37	0,30	0,19	-0,13	0,45
X_5					-0,28	0,49	0,06	0,20	0,08	-0,18	-0,13	-0,09	0,19
X_6						-0,35	-0,16	-0,10	0,36	0,13	0,00	-0,2	-0,04
X_7							-0,36	0,27	0,31	0,02	0,13	0,08	-0,25
X_8								0,50	-1,10	-0,09	-0,39	-0,09	0,07
X_9									-0,68	-0,21	-0,81	0,58	0,03
X_{10}										0,12	-0,01	-0,52	0,02
X_{11}											0,17	0,02	0,10
X_{12}												-0,38	0,08
X_{13}													-0,14

Наиболее адекватной для жаропрочных никелевых сплавов оказалась модель, полученная методом аппроксимации функции многочленом 2-й степени.

Коэффициент детерминации для этой модели $R = 0,8$. Коэффициент множественной корреляции $R = 0,894$, значимый по критерию Фишера. По критерию Бокса и Веца отклонение истинного значения от его среднего значения не менее чем в три раза больше рассеяния предсказанного значения.

После выбора адекватной математической модели, задача синтеза нового состава жаропрочного сплава сводилась к отысканию экстремума целевой функции. В качестве экстремума отыскивался $\max f(x)$, так как целью являлся синтез химического состава сплава с высокой жаропрочностью. Для нахождения максимума использовался метод градиентного подъема в физически оправданном направлении.

В качестве точки начального приближения выбрали точку X_0 с координатами: $C = X_1 = 0,15$; $Cr = X_2 = 10$; $Ni = X_3$ — рассчитывается в программе по остатку; $Co = X_4 = 9$; $Mo = X_5 = 4$; $W = X_6 = 7$; $Ti = X_7 = 2$; $Al = X_8 = 5,3$; $Nb = X_9 = 1$; $Ta = X_{10} = 2$; $V = X_{11} = 0,001$; $Zr = X_{12} = 0,001$; $Se = X_{13} = 0,001$.

Концентрации компонентов сплава заданы в долях от 100%.

Общих правил выбора точки X_0 нет. В каждом конкретном случае эксперт-литейщик задает координаты точки X_0 , используя информацию об области расположения искомой точки максимума.

Задается шаг AL. Шаг выбирается для каждого химического элемента индивидуально с учетом порога его чувствительности:

AL1 = 0,001; AL2 = 0,5; AL3 = 1; AL4 = 0,5; AL5 = 0,1; AL6 = 1,0; AL7 = 0,1; AL8 = 0,5; AL9 = 0,1; AL10 = 1,0; AL11 = 0,00015; AL12 = 0,001; AL13 = 0,00015.

Задаются выбранные ограничения по концентрации легирующих элементов.

6. СПЛАВ УГАТУ-1

Вычисления по программе позволили получить оптимизированный химический состав нового жаропрочного никелевого сплава УГАТУ-1 для авиационных двигателей.

Впервые исследованы механические и литейные свойства, фазовый состав и структура синтезированного сплава. Определены: температура солидуса, температура ликвидуса, практическая и условно-истинная жидкотекучесть, суммарная ширина трещин, относительная величина линейной усадки, объем усадочных раковин и газоусадочная пористость.

Проведенные значения механических свойств (кроме σ_B) и жаропрочности сплава УГАТУ-1 показали, что они превосходят соответствующие характеристики, испытанного в равных условиях промышленного сплава ЖС6-У.

Сплав УГАТУ-1 в сравнении со сплавом ЖС6-У обладает большей технологичностью и по комплексу литейных свойств (интервалу кристаллизации, жидкотекучести, усадочной раковины, склонности к поражению трещинами и к пленообразованию). Пониженное со-

держание титана, высокая трещиностойкость и жидкотекучесть сплава УГАТУ-1 позволяют получить из него отливки лопаток более высокого качества, чем из сплава ЖС6-У при равных технологических условиях изготовления.

Химический состав рекомендуемого сплава УГАТУ-1 позволяет отказаться от термической обработки литых лопаток. Структура и приведенный уровень свойств этого сплава обеспечиваются при их охлаждении после заливки.

Результаты исследований металла лопаток, отлитых из сплава УГАТУ-1 в заводских условиях, показали целесообразность изготовления лопаток для газовых турбин по методу выплавляемых моделей. Разработана технология литья деталей авиадвигателей в оболочковые формы на основе электрокорунда и дистенсилиманита.

Данные, полученные в результате анализа проведенных исследований, показали, что новый сплав обладает более высокими механическими, жаропрочными и литейными свойствами по сравнению с базовым сплавом ЖС6-У и может быть рекомендован к промышленному внедрению.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны концепция и методика синтеза жаропрочных материалов с использованием пассивного эксперимента, основанные на накопленной информации о составе и свойствах применяемых жаропрочных никелевых сплавов, сохраненной в систематизированном и унифицированном виде в базе данных реляционного типа.

2. Анализ математических методов моделирования показал, что для решения проблемы синтеза жаропрочных многокомпонентных сплавов наиболее эффективно применение методов теории распознавания образов, поскольку определение химического состава сплава по заданному свойству связано с математической обработкой больших объемов информации. Точную математическую модель изучаемого объекта — сплава невозможно реализовать с помощью существующих вычислительных средств, поэтому решение задачи осуществляется на базе собранного эмпирического материала эвристическими методами.

3. Разработаны методика и компьютерная программа повышения информативности базы данных с автоматическим индивидуальным подбором шкал для нелинейного преоб-

разования, обеспечивающего максимальное спрямление зависимости с учетом характера изменения жаропрочности от температуры у каждого сплава из базы данных, что позволило для большинства сплавов в 2–15 раз повысить точность интерполяции жаропрочности, а также увеличить информативность выборок сплавов из базы данных в среднем в 2–3 раза.

4. Разработаны математический метод и реализующая его компьютерная программа для оценки резервов повышения жаропрочности сплавов с применением метода информационной оценки, который учитывает специфику базы данных по жаропрочным никелевым сплавам, связанную с необходимостью обработки малых объемов данных, основан на принципе максимизации энтропии Э. Т. Джейнса и позволяет на конструктивной основе, без выдвижения необоснованных гипотез, получать интервальные оценки максимального правдоподобия для закона распределения значений рабочей температуры в заданных для них физически оправданных границах.

5. Разработана база данных по физическим характеристикам атомов легирующих элементов и пакет прикладных программ, в котором используются законы физического металловедения, позволяющие анализировать первичные и промежуточные фазы твердого раствора, делать прогноз и анализировать качество эмпирических параметров, входящих в расчет различных физико-химических свойств сплавов.

6. Сформирован новый подход к моделированию слабо формализованной задачи синтеза высокожаропрочного сплава. Развита методика автоматизации процессов классификации и принятия решений, где с определенным успехом преодолевается основная трудность обработки такого рода данных: их частая неопределенность и значительная размерность массива исходных данных.

7. Разработана комплексная методика синтеза жаропрочных никелевых сплавов на ЭВМ. С помощью указанной методики разработан новый многокомпонентный высокожаропрочный сплав УГАТУ-1. В производственных условиях проведены плавки сплава УГАТУ-1.

На основании изложенного сплав УГАТУ-1 может быть рекомендован для производства особо ответственных лопаток турбин авиационных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жаропрочные сплавы для газовых турбин:** Матер. междунар. конф. / Под ред. Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др. М.: Металлургия, 1981. 480 с.
2. **Шалин Р. Е., Булыгин И. П., Голубовски Е. Р.** Жаропрочность сплавов газотурбинных двигателей. М.: Металлургия, 1981. 81 с.
3. **Химушин Ф. Ф.** Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969. 672 с.
4. **Суперсплавы II:** Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
5. **Альпов Ю. Е., Зайнашев Н. К.** Современные методы статистической оценки качества промышленных изделий по результатам малого числа испытаний // Статистические методы оценки и прогнозирования качества и надежности промышленных изделий. Л.: ЛДНТП, 1982. С. 5–12.
6. **Ганеев А. А., Альпов Ю. Е., Попов Д. В.** Методика поиска резервов повышения рабочей температуры жаропрочных никелевых сплавов // Совершенствование литейных процессов: Матер. междунар. конф. Екатеринбург: УГТУ, 1999. С. 196–206.
7. **Альпов Ю. Е., Ганеев А. А., Попов Д. В.** О построении модели нелинейной регрессии в условиях неопределенности и малого числа наблюдений // Моделирование, вычисления, проектирование в условиях неопределенности – 2000: Матер. междунар. науч. конф. Уфа: УГАТУ, 2000. С. 470–474.
8. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. М.: Финансы и статистика, 1987. Т. 2. 351 с.
9. **Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техніка, 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник, 1984. 223 с.
10. **Ганеев А. А., Готовцева Е. Р.** Разработка новых жаропрочных сплавов на основе никеля // Новые материалы и технологии в машиностроении и приборостроении: Матер. конф. Пенза: ПГТУ, Приволжский Дом знаний, 1996. С. 51–57.

ОБ АВТОРАХ

Ганеев Альмир Амирович, профессор кафедры машин и технологии литейного производства УГАТУ. Дипл. инженер по металлургии цветных металлов (УПИ, 1963). Д-р техн. наук по металлотоведению и литейному производству (защ. в УрГТУ-УПИ, Екб., 2000). Исследования в области металлотоведения и синтеза жаропрочных никелевых сплавов.



Готовцева Елена Рудольфовна, доцент той же кафедры. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1987). Канд. техн. наук по литейному производству (УГАТУ, 1995). Исследования в области синтеза жаропрочных сплавов.



Попов Денис Владимирович, ст. преп. кафедры вычислительной математики и кибернетики УГАТУ. Дипл. инж. по программному обеспечению (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по системам автоматизации проектирования (УГАТУ, 2000). Исследования в области синтеза сплавов с применением ЭВМ.

