

УДК 669.245:669.018:519.2

А. А. ГАНЕЕВ, П. Н. НИКИФОРОВ

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Обсуждается одна из ведущих проблем развития авиакосмической техники — создание новых жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД с монокристаллической структурой. Предлагаемый научный подход позволяет проводить оптимизацию состава сплава на основе использования концепций активного и пассивного эксперимента. Построена математическая модель влияния химического состава на жаропрочность никелевых сплавов. Проверена адекватность полученных моделей по статистическим критериям. *Синтез сплавов; никель; жаропрочность; монокристаллический сплав; активный эксперимент; пассивный эксперимент*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ путей развития авиационного газотурбостроения в России и за рубежом показывает, что основным направлением совершенствования двигателей по тяге, удельному весу и удельному расходу топлива является форсирование рабочего цикла по температуре, при этом ведущие конструкторские коллективы приступили к освоению температур газа перед турбиной $T_T = 1800 \dots 1900$ К. Надёжная работа двигателя в этих условиях возможна только при применении материалов с повышенным уровнем служебных характеристик, сохраняющихся в условиях длительного воздействия высоких температур и напряжений.

В связи с этим повышение жаропрочности литейных никелевых сплавов для деталей ГТД является одной из важнейших проблем в авиа- и ракетостроении.

Исследованиями российских и зарубежных ученых¹ разрешен ряд важнейших теоретических и практических задач по различным проблемам жаропрочности металлов и сплавов. Установлено, что жаропрочность сплавов зависит от прочности межзатомных связей [8], структуры и состояния границ зерен [9]. Основным принципом создания литого сплава, обладающего высокой жаропрочностью, является принцип гетерогенности [4, 6]. Решающая роль в достижении высокой жаропрочности принадлежит характеру взаимодействия сосуществующих фаз. На основе теории упрочнения гетерофазных

сплавов сформулированы направления повышения основной характеристики никелевых жаропрочных сплавов (ЖС) — длительной прочности [4, 5, 7]:

- упрочнение твердых растворов на основе γ - и γ' -фаз;
- повышение термической стабильности гетерофазной системы $\gamma + \gamma'$;
- упрочнение межкристаллитных границ зерен никелевых сплавов;
- сведение к минимуму вероятности образования σ - и μ -фаз в процессе термической обработки и длительной эксплуатации изделий из никелевых ЖС.

Однако выявленные принципы легирования ЖС пока не дают конкретных количественных рекомендаций для выбора составов новых сплавов. В течение длительного времени эмпирический метод проб и ошибок (*Trials and Errors*) остаётся основным при разработке ЖС, однако он требует огромных средств на исходные материалы, дорогостоящее оборудование и проведение большого количества плавов. Эти затраты чаще всего не окупаются результатами поиска. Поэтому разработка, развитие и совершенствование расчетно-экспериментальных методов прогнозирования жаропрочных свойств сплава, опирающихся на возможность использования методов классического металловедения, физики металлов, математического моделирования, относятся к наиболее приоритетным и актуальным научно-техническим проблемам.

¹У. Беттериджа, А. А. Бочвара, Е. Н. Каблова, С. Т. Кишкина, И. И. Корнилова, А. Коттрела, К. А. Осипова, М. В. Приданцева, Р. Е. Шалина, В. В. Ртищева, Ч. Симса, В. Хагеля и др.

В связи с этим возникает необходимость в систематизации, обобщении и анализе многочисленных результатов исследований по проблеме синтеза ЖС и выработке новых подходов к прогнозированию свойств сплава.

1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ КОНЦЕПЦИЙ СИНТЕЗА СПЛАВОВ

В целях реализации системного подхода к оптимизации состава сплавов разработана общая концепция синтеза литейных никелевых ЖС, которая включает два основных направления, отличающихся характеристиками исходной статистической информации: активный эксперимент и пассивный эксперимент.

При использовании активного эксперимента для построения математической модели (ММ) влияния концентраций легирующих элементов (ЛЭ) и иных факторов на свойства ЖС производится анализ плана эксперимента (ПЭ) $X = \{x_k\}$, точки которого $x_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km}\}$ оптимальным образом расположены в факторном пространстве (как правило, симметрично в вершинах либо на рёбрах гиперкуба, построенного в пространстве факторов). На практике не удаётся выдержать значения концентраций ЛЭ в экспериментальных точках равными идеальным расчётным значениям. Причинами отклонений являются различия в режимах плавки ЖС, в качестве и составе исходных шихтовых материалов, в составе материала литейной формы и т. д. В ряде работ [1, 3] расчётные и фактические (определённые при помощи химического анализа) химические составы ЖС, соответствующие точкам ПЭ, отличались не менее чем на 2... 7%. Такие отклонения не повлияли на эффективность применения активного эксперимента для определения составов новых высокожаропрочных сплавов.

Упорядоченное оптимальное расположение экспериментальных точек способствует, при минимальном числе опытов, получению ММ с несмещёнными и несмешанными оценками коэффициентов, с наибольшей точностью аппроксимирующей зависимость жаропрочности сплава от выбранных факторов. Поэтому использование концепции активного эксперимента позволяет значительно сократить количество проводимых экспериментов (по некоторым оценкам, с 500... 1000 до 50... 80 плавов и испытаний образцов [1]) для выявления оптимального состава ЖС. Преимущество методов синтеза сплавов, основанных на концепции активного эксперимента, становится ещё более явным при

необходимости ввода в рассмотрение новых химических элементов в качестве легирующих, а также для подтверждения или опровержения выдвигаемых гипотез о взаимосвязи состава и свойств сплавов.

Основным недостатком активного эксперимента является то, что его использование при создании новых ЖС требует проведения длительных и дорогостоящих экспериментов, использования дефицитных ЛЭ, специальных установок для направленной кристаллизации и т. п. Поэтому в случаях, когда при разработке новых сплавов требуется максимальное сокращение экспериментальной части работы, используется пассивный эксперимент.

Пассивный эксперимент базируется на анализе накопленной статистической информации о составе и свойствах разработанных и применяемых никелевых ЖС, сохранённой в систематизированном и унифицированном виде в базе данных (БД). Статистический материал для проведения анализа может формироваться не только на основе опытов, проводимых самим исследователем, но и на основе литературных данных и т. п. Поэтому использование пассивного эксперимента позволяет почти полностью отказаться от проведения экспериментов, ограничивая экспериментальную часть работы проведением нескольких контрольных опытов.

Основным недостатком пассивного эксперимента является то, что ММ строится на основе анализа всей совокупности имеющейся в распоряжении исследователя информации о жаропрочности никелевых ЖС. При этом оказывается возможным построить единственный ПЭ, экспериментальные точки которого оказываются расположенными в факторном пространстве хаотично. Поэтому при расчетах коэффициенты ММ получают смещёнными и смешанными, что не позволяет полностью использовать содержащуюся в ПЭ информацию.

Тем не менее представляется возможным сохранить все преимущества, предоставляемые как активным, так и пассивным экспериментом. При наличии достаточно большого объёма статистической информации можно выбрать из исходной выборки данных некоторое количество экспериментальных точек, которые бы располагались в факторном пространстве в соответствии с некоторым гипотетическим планом активного эксперимента (либо близко к нему). Тогда обработка этих отобранных точек может производиться аналогично обработке результатов опытов, про-

водимых в соответствии с подобранным гипотетическим ПЭ.

Для этого была модифицирована процедура построения ММ влияния концентраций ЛЭ на жаропрочность сплава, основанная на концепции пассивного эксперимента, с целью использования для расчёта ММ ПЭ, наиболее близкого к оптимальному. С этой целью был произведён выбор легирующего ряда и комплекса. В комплекс должны войти элементы, которые при совместном действии усиливают полезный эффект или подавляют отдельные нежелательные явления в сплаве. Проведен выбор легирующих элементов и их классификация для литейных никелевых ЖС:

- 1) растворные упрочнители — Co, Ir, Rh, Pt, Pd, Cr, W, Mo, Ru, Os, Re, Tc;
- 2) растворно-дисперсионные упрочнители — Al, Ta, Nb, Ti;
- 3) упрочнители границ зерен — Zr, Ce, Y, B, C, Hf, La, Nd, Pr;
- 4) нейтральные элементы — He, Ar, Ne, Kr, Xe, Rn;
- 5) вредные примеси — S, Pb, Bi, Sb, P, Tl, As, Te, Rb, Cs, Fr, Se, Sr, Cd, In, Li, Na, Si, Mn, Fe.

Для определения оптимального состава сплавов из ряда выбранных элементов были использованы: Cr, Co, Mo, W, Re, Ta, Al, Ti, Nb, Hf, B, C.

2. ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ БАЗЫ ДАННЫХ

Проведенные исследования позволили сформулировать основные недостатки структуры представления сведений о жаропрочности сплавов из БД: резкое различие объемов выборок при переходе с одной температуры на другую и группировка сплавов по температурам в зависимости от страны-производителя.

Для преодоления перечисленных недостатков были разработаны метод и компьютерная программа повышения информативности БД, основанные на интерполяции по МНК в нелинейных шкалах вида « $P(T, \tau) - \lg(\sigma)$ », учитывающих особенности поведения изделий из ЖС в условиях, соответствующих условиям эксплуатации и обеспечивающих наибольшую точность интерполяции значений жаропрочности на интервале известных рабочих температур ЖС. В качестве параметра $P(T, \tau)$ системы координат использовались следующие параметры, используемые для описания поведения ЖС в условиях высокотемпературной ползучести:

1) параметр Ларсона–Миллера

$$P_{LM} = T [C + \lg(\tau)];$$

2) параметр Менсона–Хеферда

$$P_{MH} = [\lg(\tau) - \lg(\tau_A)] (T - T_A)^{-1};$$

3) параметр Менсона–Саккопа

$$P_{MS} = \lg(\tau) - BT;$$

4) параметр Голдхофа–Шерби

$$P_{GS} = [\lg(\tau) - \lg(\tau_A)] (T^{-1} - T_A^{-1}),$$

где T — температура испытания; τ — время до разрушения; B, C, T_A и τ_A — некоторые константы материала.

Интерполирующая функция определялась в виде полинома

$$z(x) = \sum_{j=0}^m \beta_j x^j, \quad (1)$$

где β_j — коэффициенты полинома, определяемые решением системы нормальных уравнений; x — параметр $P(T, \tau)$, представляющий собой функцию температуры испытания и времени до разрушения.

$$\sum_{j=0}^m \beta_j \sum_{i=1}^N x_i^l x_i^j = \sum_{i=1}^N Z_i x_i^l, \quad l = 0, \dots, m. \quad (2)$$

Выбор лучшей системы координат для интерполяции определялся точностью интерполирования жаропрочности в данной системе координат, характеризуемой критерием оптимальности:

$$P^* = \text{Arg inf}_j \frac{\sum_{k=2}^{N-1} \left| \frac{Z_k - z_{jk}(x_k)}{Z_k} \right|}{N - 2}, \quad (3)$$

где k — порядковый номер узла интерполяции; N — число узлов интерполяции; Z_k — фактическое значение жаропрочности сплава в k -м узле интерполяции; $z_{jk}(x)$ — интерполирующая функция (1), рассчитанная по выборке с исключённым k -м узлом интерполяции в системе координат « $P_j(T, \tau) - \lg(\sigma)$ ».

В результате проведенного анализа показано, что в соответствии со сформулированным критерием (3) наиболее эффективной

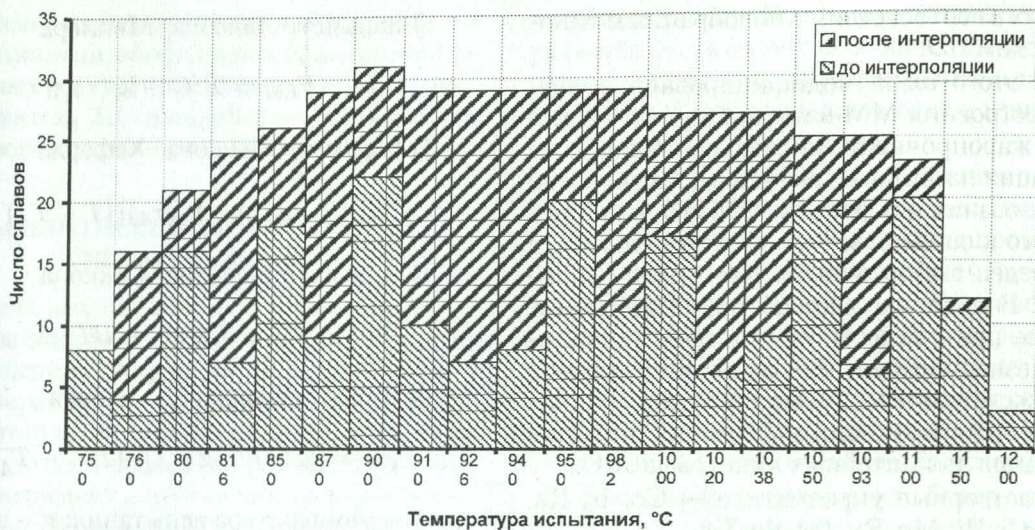


Рис. 1. Сравнение распределения числа сплавов по температурам до и после интерполяции

системой координат для интерполяции жаропрочности никелевых ЖС с направленной и монокристаллической структурой явилась система координат « $P_{MS}(T, \tau) - \lg(\sigma)$ ». Её использование позволило достаточно успешно осуществить «выравнивание» зависимостей и повысить точность интерполяции.

На рис. 1 приведены размеры выборок значений жаропрочности σ_{100} при различных температурах испытания до и после проведения процедуры интерполяции. Интерполяция свойств ЖС позволила преобразовать информацию в БД, интерполировав значения жаропрочности по отсутствующим температурам, что увеличило количество рассматриваемых ЖС в среднем в 2 ... 3 раза (см. рис. 1), а успешный подбор нелинейных шкал повысил точность и эффективность применения процедуры интерполяции. В результате стал возможным одновременный анализ ЖС, полученных из разных первоисточников, жаропрочности которых приведены при различных температурах, снимается проблема, связанная с нежелательным разделением БД на выборки по странам-производителям.

Поскольку эффективность обработки выборок из БД зависит от однородности и незашумленности информации по сплавам, предложена методика проверки однородности и фильтрации информации о составах и свойствах ЖС, выдаваемой ИПС для последующего анализа, основанная как на экспертных оценках границ ξ_{\max} и ξ_{\min} , по которым происходит деление выборки на рабочую и исключаемую, так и на математических оценках этих границ. При использовании математических оценок границ однородности выборок

учитывается, что распределение данных в выборке может иметь произвольное распределение, не обязательно совпадающее с нормальным:

$$\xi_{\max} = \bar{\xi} + \sigma(\xi) \left[k^2 (\sqrt[p_0]{p_0}) + \frac{1}{N} k^2 (p_0) \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\xi_{\min} = \bar{\xi} - \sigma(\xi) \left[k^2 (\sqrt[p_0]{p_0}) + \frac{1}{N} k^2 (p_0) \right]^{\frac{1}{2}},$$
(4)

где ξ — фактор (легирующий элемент), по которому происходит фильтрация; $\sigma(\xi)$ — его среднеквадратическое отклонение; $k(p)$ — критерий Чебышева; p_0 — доверительная вероятность.

Полученная в результате фильтрации однородная и незашумлённая совокупность информации о составах и свойствах никелевых ЖС использовалась для последующего анализа.

3. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ СПЛАВА

Для построения ММ и проектирования состава сплава с более высокими свойствами необходимо оценить вероятность такого результата и содержательность информации из БД. В соответствии с методикой [2] с надёжностью 0,99 было выявлено существование резервов повышения рабочей температуры никелевых ЖС на 35 ... 70° С для 100-часовой длительной прочности в диапазоне напряжений 150 ... 330 МПа.

Были обобщены составы $n = 27$ ЖС, которые использовались для построения ММ влияния состава сплава на его жаропрочность. Для исследования влияния различных ЛЭ на жаропрочность строили набор ПЭ типа 2^{14-10} , каждый из которых включал не менее $N_{\min} = 16$ экспериментальных точек, т. е. для построения одного ПЭ может быть задействовано $N = 16 \dots 27$ точек. Очевидно, что чем большее число экспериментальных точек присутствует в ПЭ и участвует в расчёте ММ, тем более полно используется исходный набор статистической информации.

Общее количество ПЭ, включающих $N \in [N_{\min}; n]$ экспериментальных точек, которые должны быть составлены и проанализированы при полном переборе комбинаций ПЭ и точек, равно

$$\sum_{N=N_{\min}}^n C_n^N = \sum_{N=N_{\min}}^n \frac{n!}{N!(n-N)!} = \sum_{N=16}^{27} \frac{27!}{N!(27-N)!} = 2,97 \cdot 10^7. \quad (5)$$

С вычислительной точки зрения это не представляет значительных трудностей, и поэтому в дальнейшем при поиске наилучшего подобия ПЭ исследовалось всё множество комбинаций ПЭ и экспериментальных точек.

Общее число уникальных комбинаций верхних и нижних уровней 12 факторов в нашем случае достигает $4,3 \cdot 10^{33}$. Очевидно, что полный перебор такого большого количества вариантов ПЭ невозможен, поэтому в нашей работе при расчёте ПЭ генерировали случайные комбинации наборов экспериментальных точек, которые использовались для построения ПЭ.

Для учёта возможной нелинейности зависимости жаропрочности сплава от состава ЖС провели корреляционный анализ, направленный на выявление комбинаций ЛЭ, наиболее коррелированных с необъясняемой ММ вариацией исходных данных. По ре-

зультатам проведённого анализа в рассчитываемую ММ влияния состава никелевого ЖС на его жаропрочность, помимо факторов, характеризующих содержание в сплаве основных ЛЭ, ввели дополнительные факторы $(x_{Re})^2(x_{Ti})^2$ и $(x_{Cr})^2x_{Re}x_{Ti}$, характеризующие взаимодействие между ЛЭ.

Далее строили ПЭ и выбирали среди них наилучший ПЭ. Для этого выполнялись следующие действия:

1) из исходной выборки данных формировалась подвыборка, содержащая $N = 16 \dots 27$ экспериментальных точек;

2) для каждого ЛЭ с точностью Δc_i (равной точности, с которой может быть выдержано либо определено содержание ЛЭ в ЖС) случайным образом генерировалось положение основного уровня c_{i0} в соответствии с условием

$$c_{i0} \in [(c_i)_{\min} + \Delta c_i, (c_i)_{\max} - \Delta c_i], \quad (6)$$

где $(c_i)_{\min}, (c_i)_{\max}$ — нижняя и верхняя границы области определения i -го ЛЭ; Δc_i — минимальная погрешность, с которой может быть выдержано либо определено содержание i -го ЛЭ в сплаве;

3) для каждого ЛЭ случайным образом генерировалась величина интервала варьирования $I(c_i)$ в соответствии с условием

$$I(c_i) \in [\Delta c_i; \inf \{c_{i0} - (c_i)_{\min}; (c_i)_{\max} - c_{i0}\}]; \quad (7)$$

4) для выбранных ЖС, основных уровней и интервалов варьирования факторов рассчитывался ПЭ.

Были рассчитаны $L = 10^9$ вариантов ПЭ, соответствующих различным комбинациям подвыборок и уровней факторов. Затем, исходя из важности концепции D -оптимальности ПЭ, вся совокупность рассчитанных ПЭ сравнивалась по значению D -критерия оптимальности для установления, какая комбинация наиболее близка к оптимальной. В результате были получены значения уровней ЛЭ, обеспечивающих D -оптимальность ПЭ (табл.).

Таблица

Концентрации ЛЭ, соответствующие уровням факторов D -оптимального ПЭ

Уровни факторов	Концентрация ЛЭ, ат. %											
	Cr	Co	Mo	W	Re	Ta	Al	Ti	Nb	Hf	B	C
нижний $(c_i)_{-1}$	15,5	2,3	0,0	1,70	0,33	2,58	7,28	2,1	0,0	0,04	0,00	0,2
основной $(c_i)_0$	16,15	7,0	0,2	1,77	0,72	3,06	7,48	2,8	0,2	0,07	0,03	0,33
верхний $(c_i)_{+1}$	16,8	11,7	0,4	1,84	1,11	3,54	7,68	3,5	0,4	0,10	0,06	0,46

На основе анализа оптимального ПЭ получена ММ влияния факторов, соответствующих концентрациям ЛЭ в сплаве, на его 100-часовую жаропрочность при 1000° С. После проверки значимости коэффициентов ММ и исключения незначимых факторов ММ приняла вид

$$z(\mathbf{X}) = 127,1 - 20,25x_{Cr} - 8,833x_{Mo} - 5,445x_W + 21,81x_{Re} - 6,852x_{Al} - 17,39x_{Ti} + 26,38x_{Nb} - 13,61x_{Hf} - 19,82x_C + 0,6803x_{Re}^2x_{Ti}^2 + 0,07062x_{Cr}^2x_{Re}x_{Ti}, \quad (8)$$

где x_i — кодированные значения концентраций ЛЭ; $x_i = 2(c_i - c_{i0}) / [(c_i)_{\max} - (c_i)_{\min}]$.

4. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

Для определения состава ЖС, соответствующего максимальному отклику ММ (8), воспользовались процедурой градиентного подъёма. Для предотвращения опасности перелегирования и падения фазовой стабильности ЖС контролировали соответствующую ЖС данного состава величину отклонения электронной концентрации от равновесного значения:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n c_i E_i - 0,036 \sum_{i=1}^n c_i M_i - 6,28, \quad (9)$$

где E_i — концентрация валентных электронов i -го ЛЭ; M_i — относительная атомная масса i -го ЛЭ.

Установлено, что ЖС, для которых величина (9) меньше нуля, проявляют склонность

к выделению ТПУ-фаз типа σ , μ и метастабильных карбидов типа Me_6C , а сплавы с $\Delta E > 0$ склонны к выделению η -фаз типа Ni_3Ti и Ni_3Nb .

В качестве начальной точки крутого восхождения приняли точку, соответствующую центру области определения ММ. В качестве критерия остановки приняли условие нулевого отклонения электронной концентрации от равновесного значения. Всего было сделано 7 600 шагов по поверхности отклика в направлении градиента функции отклика. Точке № 100 соответствовало равновесное значение электронной концентрации и значение функции отклика 407,1 МПа. В последующих точках наблюдалось отклонение электронной концентрации от равновесного значения. Таким образом определён состав литейного никелевого ЖС, обладающего максимальной жаропрочностью в условиях, соответствующих условиям работы рабочих лопаток турбин современных ГТД.

В заключение была проведена оценка разработанного ЖС на предмет потенциальной возможности образования топологически плотно упакованных (ТПУ) фаз на основе методики PhaComp. Для этого были построены специальные диаграммы зависимости жаропрочности при исследуемых температурах от электронной плотности сплава и концентраций легирующих элементов. На рис. 2 приведены зависимости 100-часовой жаропрочности от электронной плотности и концентрации углерода. Аналогичные графики построены для всех легирующих элементов сплава при температурах 900, 950, 975, 1000 и 1050° С.

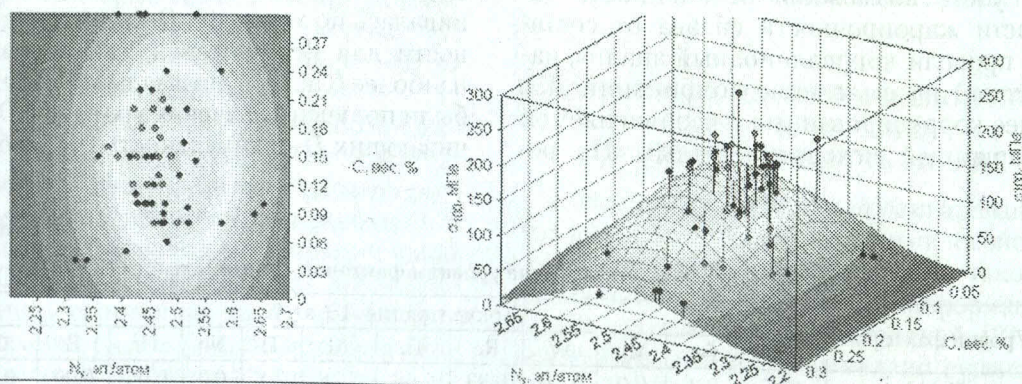


Рис. 2. Зависимость 100-часовой жаропрочности от электронной концентрации никелевого ЖС и концентрации ЛЭ при температуре 1000° С

Исследованиями установлено, что составы нового ЖС соответствуют области максимальной жаропрочности и оптимальной электронной плотности никелевых ЖС при заданных рабочих температурах и не склонны к образованию ТПУ-фаз.

Испытания кратковременной прочности нового ЖС, названного УГАТУ-4, проводились на стандартных гагаринских образцах при температурах 800; 900; 1000; 1100°С. Определялись временное сопротивление σ_B , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и сужение ψ . Для сравнения параллельно исследовались механические свойства серийного сплава ЖС32. Средние показатели механических свойств исследованных сплавов в зависимости от температуры испытания приведены на рис. 3.



Рис. 3. Средние показатели механических свойств исследованных сплавов в зависимости от температуры испытания

Наибольшее значение прочности показывает сплав УГАТУ-4, имеющий наиболее высокую температуру солидуса ($T_S = 1386^\circ\text{C}$). Наименее прочным оказался сплав ЖС32 ($T_S = 1345^\circ\text{C}$).

Пластические свойства этих сплавов близки по значению и с повышением температуры испытания до 1100°С изменяются незначительно. Дальнейшее повышение температуры влечет за собой увеличение пластичности, особенно резкое для сплава ЖС32.

Длительная прочность сплавов УГАТУ-4 и ЖС32 исследовалась при температурах 800; 900; 1000°С. На рис. 4 приведена зависимость логарифма времени до разрушения от напряжения (σ). Прямые, характеризующие средние значения длительной прочности (испытывалось 5 стандартных коротких образцов), имеют слабый наклон к оси абсцисс, что свидетельствует о малом падении данного свойства с течением времени. Отсутствие изменения наклона логарифмической кривой для

длительной прочности свидетельствует об устойчивости структуры металла опытных сплавов при длительном температурном воздействии под нагрузкой.

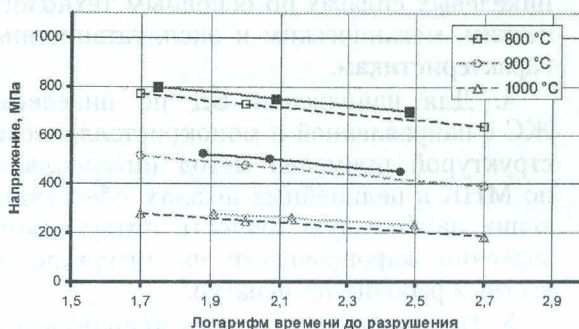


Рис. 4. Зависимость логарифма времени до разрушения от напряжения

При испытаниях на длительную прочность выявилось, что опытный сплав характеризуется достаточно стабильными показателями длительной пластичности. Наибольшая величина длительной пластичности отмечается для сплава УГАТУ-4: $\delta = 21,2 \dots 21,9\%$; $\psi = 29,3 \dots 31,9\%$. Сплав ЖС32 показал в среднем $\delta = 14,7 \dots 15,6\%$, $\psi = 22,7 \dots 24,1\%$.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика проектирования литейных никелевых ЖС для отливок с направленной и монокристаллической структурой, основанная на использовании априорной информации о составах и свойствах известных сплавов, которая позволяет в 4 ... 5 раз сократить сроки создания новых многокомпонентных ЖС, в 40 ... 50 раз снизить трудозатраты, в 10 ... 20 раз сэкономить расход дорогостоящих материалов.

2. На сочетании концепций активного и пассивного эксперимента построены ММ, описывающие влияние концентраций основных ЛЭ на жаропрочность никелевых сплавов с монокристаллической структурой, в рамках которых с определенным успехом преодолеваются основные трудности обработки данных пассивного эксперимента: их частая неопределённость, зашумленность, малая информативность и значительная размерность массива исходных данных.

3. Создана тематическая БД по литейным никелевым ЖС для отливок с направленной и монокристаллической структурой, включающая сведения о составах и свойствах современных никелевых сплавов, в процессе создания которой было осуществлено концептуальное проектирование БД и разработана

нормализованная структура на основе реляционной модели, что позволило реализовать на её основе ИПС с возможностью удалённого доступа из сети Internet, которая предоставляет систематизированные сведения о никелевых сплавах по основным технологическим, механическим и эксплуатационным характеристикам.

4. Для наполнения БД по никелевым ЖС с направленной и монокристаллической структурой применен метод интерполяции по МНК в нелинейных шкалах, обеспечивающих наибольшую точность интерполяции значений жаропрочности на интервале известных рабочих температур.

5. Показана возможность использования статистической информации для проведения анализа влияния ЛЭ на жаропрочность никелевых сплавов и оптимизации их состава математико-статистическими методами, сочетающими преимущества концепций пассивного и активного эксперимента.

6. Произведена проверка эффективности разработанной методики синтеза ЖС для отливок с направленной и монокристаллической структурой путем исследования жаропрочных свойств синтезированного литейного ЖС УГАТУ-4. Данные, полученные в результате анализа проведенных исследований, показали, что УГАТУ-4 обладает более высокими жаропрочными, механическими и литейными свойствами по сравнению с серийным сплавом ЖС32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ганеев А. А.** Повышение жаропрочности литейных никелевых сплавов с использованием методов активного и пассивного экспериментов: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.16.04. Екатеринбург, 2000. 458 с.
2. **Ганеев А. А., Готовцева Е. Р., Попов Д. В.** Автоматизированное проектирование жаропрочных никелевых сплавов для авиационных двигателей // Вестник УГАТУ. 2001. № 1. С. 166–173.

3. **Готовцева Е. Р.** Исследование и разработка жаропрочных никелевых сплавов с использованием методов теории распознавания образов: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.04. Екатеринбург, 1995. 223 с.
4. **Жаропрочность** литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
5. **Каблов Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001. 632 с.
6. **Коттерлл А. Х.** Строение металлов и сплавов / Пер. с англ.; Под ред. М. Л. Берштейна. М.: Металлургиздат, 1959. 159 с.
7. **Монокристаллы** никелевых жаропрочных сплавов / Р. Е. Шалин, И. Л. Светличный, Е. Б. Качанов и др. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
8. **Осинов К. А.** Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов. М.: АН СССР, 1960. 288 с.
9. **Приданцев М. В.** Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. М.: Наука, 1967. 211 с.

ОБ АВТОРАХ

Ганеев Альмир Амирович, проф., зав. каф. машин и технологии литейного производства. Дипл. инж. по металлургии цветн. металлов (УПИ, 1963). Д-р техн. наук по металловед. и литейной произв. (защ. в УрГТУ-УПИ, Екб., 2000). Иссл. в обл. металлургии и синтеза жаропрочных никелевых сплавов.



Никифоров Павел Николаевич, аспирант, ассист. той же каф. Магистр техн. и технол. (УГАТУ, 2001). Готовит дис. по синтезу жаропрочных никелевых сплавов для получения отливок с монокристаллической структурой.

