

УДК 669.245

Н.В. Петрушин<sup>1</sup>, Е.С. Елютин<sup>1</sup>

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-16-31

*Рассмотрена связь между длительной прочностью и структурно-фазовыми и физико-химическими параметрами литейных поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Предлагается регрессионная модель для прогнозирования долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа рассмотренного класса сплавов. Модель учитывает количество  $\gamma'$ -фазы, температуры  $\gamma'$ -солвус и солидус, периоды кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз,  $\gamma/\gamma'$ -мисфит и атомную массу сплава. Достоверность прогнозирования долговечности подтверждается сравнением с экспериментальными результатами по длительной прочности при температурах 1000, 1050 и 1100 °С ряда промышленных и опытных литейных жаропрочных никелевых сплавов.*

**Ключевые слова:** литейные жаропрочные никелевые сплавы, долговечность при испытании на длительную прочность, количество  $\gamma'$ -фазы, температуры  $\gamma'$ -солвус и солидус, период кристаллической решетки,  $\gamma/\gamma'$ -мисфит.

N.V. Petrushin<sup>1</sup>, E.S. Elyutin<sup>1</sup>

## MODEL FOR PREDICTION OF HIGH TEMPERATURE DURABILITY OF CASTABLE NICKEL-BASE SUPERALLOYS

*The relationship between the long-term strength and the structural-phase and physico-chemical parameters of castable polycrystalline nickel-based superalloys is considered. A regression model for prediction of the durability at a temperature of 1100 °C and a stress of 80 MPa of the considered class of alloys is proposed. The model takes into account the amount of the  $\gamma'$ -phase, the  $\gamma'$ -solvus and solidus temperatures,  $\gamma/\gamma'$ -misfit, the lattice spacing of the  $\gamma$ - and  $\gamma'$ -phases, and the atomic mass of the alloy. The reliability of the durability prediction is confirmed by comparison with the experimental results on the long-term strength at temperatures 1000, 1050 and 1100 °C of a number of industrial and experimental castable polycrystalline nickel-based superalloys.*

**Keywords:** castable nickel-base superalloys, durability in the long-term strength test, amount  $\gamma'$ -phase,  $\gamma'$ -solvus temperature, solidus temperature, lattice spacing,  $\gamma/\gamma'$ -misfit.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Одним из важнейших факторов развития конкурентоспособных авиационных газотурбинных двигателей является применение высокоэффективных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) для производства лопаток газовых турбин [1–5]. В процессе разработки новых композиций ЖНС возникает проблема прогнозирования зависимости свойств и структурно-фазового состояния материала от химического состава. В настоящее время для ее решения широко используются методы компьютерных

расчетов и моделирования [6–13]. Эти методы основаны на использовании регрессионных уравнений (моделей) типа «состав–свойство», полученных путем статистической обработки результатов испытаний и исследований множества промышленных и экспериментальных ЖНС. Следует отметить, что прогнозирование длительной прочности по моделям типа «состав–свойство» дает ограниченное понимание механизмов изменения данной характеристики в зависимости от химического состава ЖНС [14–16].

Повышения высокотемпературной длительной прочности ЖНС достигают упрочнением твердого раствора на основе никеля ( $\gamma$ -фаза) дисперсными частицами  $\gamma'$ -фазы с высокой объемной долей. Важными параметрами гетерофазной  $\gamma/\gamma'$ -микроструктуры ЖНС, определяющими их термическую стабильность [17], помимо объемной доли  $\gamma'$ -фазы являются следующие физико-химические свойства и структурно-фазовые характеристики: температура  $\gamma'$ -солвус ( $T_{\text{Solv}}$ ) (температура полного растворения  $\gamma'$ -фазы в матричном  $\gamma$ -твердом растворе), температура солидус ( $T_S$ ), периоды кристаллических решеток  $\gamma$ -твердого раствора ( $a_\gamma$ ) и находящейся с ним в равновесии  $\gamma'$ -фазы ( $a_{\gamma'}$ ) и их размерное несоответствие ( $\delta$  –  $\gamma/\gamma'$ -мисфит). Температура  $\gamma'$ -солвус определяет температурную растворимость  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -твердом растворе ЖНС и, следовательно, термическую стабильность  $\gamma/\gamma'$ -микроструктуры при высоких температурах. Проведенные исследования показали, что ЖНС с более высоким значением температуры  $T_{\text{Solv}}$  имеет большую долговечность при высоких температурах [18–21].

Из известной корреляции между энергией активации ползучести (энергией активации самодиффузии) и температурой плавления металлов [22, 23] следует, что в сплаве с более высокой температурой солидус, при прочих равных условиях, гомологическая температура  $T_{\text{Гом}} = T/T_S$  и, следовательно, диффузионная подвижность атомов, характеризуемая коэффициентом диффузии  $D$  ( $D = D_0 \exp(-A/T_{\text{Гом}})$ , где  $A = \text{const}$ ), а соответственно, и скорость ползучести будут меньше.

В соответствии с механизмами упрочнения твердых растворов степень концентрационного твердорастворного упрочнения фаз находится в тесной корреляции с величинами периодов кристаллических решеток фаз, а  $\gamma/\gamma'$ -мисфит определяет эффективность дисперсионного упрочнения ЖНС [9, 23, 24]. Экспериментальные исследования показывают, что ЖНС, имеющие повышенные значения  $a_\gamma$  и  $a_{\gamma'}$  и положительный ( $a_\gamma > a_{\gamma'}$ ) мисфит  $\delta$  (в данном случае  $\delta = (a_\gamma - a_{\gamma'})/a_{\gamma'}$ ) при комнатной температуре, оказываются наиболее жаропрочными [25–29]. При повышенных температурах у большинства промышленных ЖНС параметр  $\delta$  сохраняет положительное значение, повышаясь по абсолютной величине из-за более сильной температурной зависимости  $a_\gamma$  [30–32].

Для прогнозирования характеристик длительной прочности ЖНС перспективно использование регрессионных уравнений, в которых переменными факторами являются структурно-фазовые, физико-химические и другие параметры ЖНС и их фазовых составляющих [7, 33–36]. Так, в работе [33] предложено рассчитывать пределы длительной прочности  $\sigma_{100}$  и  $\sigma_{1000}$  при температуре 800 °С для ЖНС с изотропной структурой по регрессионным уравнениям, учитывающим количество  $\gamma'$ -фазы при температуре 800 °С, температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы и солидус, периоды кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз,  $\gamma/\gamma'$ -мисфит, энергию дефекта упаковки и модуль сдвига  $\gamma$ -фазы, энергию антифазных границ и долю выделений эвтектической  $\gamma'$ -фазы. Однако ввиду отсутствия надежных экспериментальных и расчетных данных по некоторым из указанных структурных характеристик ЖНС практическое использование модели, приведенной в работе [33], затруднено. Кроме того, невысокая температура, при которой оценивается длительная прочность по этой модели, не позволяет использовать ее для сплавов, предназначенных для высокотемпературного применения.

В работе [34] предложены модели для расчета характеристик высокотемпературной длительной прочности ЖНС с использованием данных по концентрациям легирующих элементов в  $\gamma'$ -фазе и ее объемной доле в сплаве:

$$\log \tau = 1,426 - 0,110Y_{Cr} + 0,164Y_W + 0,102Y_{Ta} + 0,092Y_{Mo} + 0,095F; \quad (1)$$

$$\sigma_{100} = 13,32 - 0,435Y_{Al} - 0,238Y_{Cr} + 0,994Y_W + 0,762Y_{Mo} + 0,1236F, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время до разрушения (долговечность), ч, при температуре 1000 °С и напряжении 118 МПа;  $Y_i$  – концентрация  $i$ -го элемента (Cr, W, Ta, Mo, Al) в  $\gamma'$ -фазе, % (атомн.);  $F$  – количество  $\gamma'$ -фазы в сплаве, % (объемн.);  $\sigma_{100}$  – предел 100-часовой длительной прочности, кгс/мм<sup>2</sup>, при температуре 982 °С.

По модели из работы [35] расчет высокотемпературной долговечности ЖНС может быть осуществлен, если известны химический состав и количество  $\gamma'$ -фазы, а также размерное несоответствие периодов кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит) рассчитываемого сплава:

$$\log \tau = 3,0 - 0,059Y_{Co} - 0,161Y_{Cr} + 0,027Y_{Mo} + 0,254Y_W + 0,087Y_{Ti} + 0,289Y_{Nb} + 0,420Y_{Ta} - 0,012F - 3,098\delta, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время до разрушения (долговечность), ч, при температуре 1040 °С и напряжении 137 МПа;  $Y_i$  – концентрация  $i$ -го элемента (Co, Cr, W, Ta, Mo, Ti, Nb) в  $\gamma'$ -фазе, % (атомн.);  $F$  – количество  $\gamma'$ -фазы в сплаве, % (объемн.);  $\delta$  – мисфит, % ( $\delta = 2(a_{\gamma'} - a_{\gamma})/(a_{\gamma'} + a_{\gamma})$ , где  $a_{\gamma'}$  – период решетки  $\gamma'$ -фазы;  $a_{\gamma}$  – период решетки  $\gamma$ -фазы).

Сопоставление значений долговечности известных промышленных и опытных ЖНС, рассчитанных по моделям (1)–(3), с ранжировкой этих сплавов по их экспериментальным значениям длительной прочности  $\sigma_{100}$  при температурах 1050 и 1100 °С показало отсутствие корреляции между ними. Причинами такого рассогласования могут быть не учтенное в моделях (1)–(3) влияние других фазовых параметров, характеризующих гетерофазную  $\gamma/\gamma'$ -микроструктуру, таких как температуры  $\gamma'$ -солвус и солидус, а также неточность определения химического состава  $\gamma'$ -фазы в рассчитываемых ЖНС.

Цель данной работы – разработка регрессионной модели для прогнозирования высокотемпературной долговечности литейных поликристаллических ЖНС с равноосной структурой в зависимости от структурно-фазовых характеристик и физико-химических свойств.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 3. «Компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [37].

### Материалы и методы

Объектами исследования являлись экспериментальные литейные ЖНС с поликристаллической равноосной структурой типа ЖС6Ф с переменным содержанием легирующих элементов Cr, Co, Nb, Hf, Zr и W [18]. Следует отметить, что среди известных литейных жаропрочных сплавов, из которых изготавливают поликристаллические лопатки газовых турбин, сплав ЖС6Ф обладает наиболее высокими характеристиками жаропрочности [38].

Концентрации переменных легирующих элементов в сплавах задавали в соответствии с планом дробного факторного эксперимента типа  $2^{n-1} + 1$  с генерирующим соотношением  $x_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$  (где  $x_i$  и  $n$  – соответственно кодовые концентрации и количество переменных легирующих элементов) [39]. В плане эксперимента концентрации

переменных легирующих элементов Cr ( $x_1$ ), Co ( $x_2$ ), Nb ( $x_3$ ), Hf ( $x_4$ ), Zr ( $x_5$ ), W ( $x_6$ ) варьировались в следующих пределах, % (по массе): 2,0 и 7,0 – для Cr; 7,0 и 11,0 – для Co; 0,5 и 1,2 – для Nb; 0,8 и 1,2 – для Hf; 0,3 и 1,0 – для Zr; 8,0 и 12,0 – для W. Содержание других легирующих элементов в сплавах оставалось постоянным и таким же, как в сплаве ЖС6Ф [40].

В табл. 1 представлена матрица плана эксперимента с расчетным содержанием в кодах переменных легирующих элементов [18]. Перевод натуральных значений концентраций элементов в коды осуществлялся по формуле

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (4)$$

где  $\tilde{x}_i$  – код соответствующего переменного легирующего элемента;  $x_i$  – фактическая концентрация элемента в опыте, % (по массе);  $x_{0i}$  – содержание  $i$ -го элемента на среднем уровне;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования  $i$ -го элемента.

Экспериментальные исследования сплавов выполняли на литых образцах (с диаметром 16 мм и длиной 70 мм) с поликристаллической равноосной структурой, которые получали по серийной технологии литья ЖНС [41].

Испытания образцов (с длиной рабочей части 25 мм и диаметром 5 мм) экспериментальных сплавов на длительную прочность проводили при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа с определением времени до разрушения (долговечности) –  $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$  (по ГОСТ 10145–81). В табл. 1 приведены полученные экспериментальные значения долговечности литых поликристаллических образцов сплавов типа ЖС6Ф (усредненные по трем образцам каждого сплава), а также дисперсия воспроизводимости средних значений долговечности образцов этих сплавов для всех опытов плана эксперимента [18].

В качестве структурно-фазовых и физико-химических параметров (факторы жаропрочности) литейных ЖНС в данной работе выбраны следующие:

- температура  $\gamma'$ -солвус ( $T_{\text{Solv}}$ );
- температура солидус ( $T_S$ );
- объемная доля  $\gamma'$ -фазы при температуре 1100 °С ( $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ );
- период общей  $\gamma/\gamma'$  гранецентрированной кубической (ГЦК) решетки ЖНС при температуре 20 °С ( $a_{\gamma/\gamma'}$ );
- $\gamma/\gamma'$ -мисфит при температуре 20 °С ( $\delta^{20^\circ}$ );
- атомная масса ЖНС ( $A_{\text{спл}}$ ).

Температуры  $\gamma'$ -солвус и солидус сплавов определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке ВДТА-8М (образцы диаметром 7 мм и длиной 7 мм нагревали с постоянной скоростью 20 °С/мин в атмосфере гелия).

Объемную долю  $\gamma'$ -фазы ( $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ ) в сплавах при температуре 1100 °С рассчитывали по формуле [42]:

$$F_{\gamma'}(T) = F_{\gamma'}^{20^\circ} \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{\text{Solv}} - T_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $F_{\gamma'}^{20^\circ}$  – объемная доля  $\gamma'$ -фазы в сплавах при комнатной температуре, которую рассчитывали методом компьютерного конструирования ЖНС [10];  $T_0$  – температура начала растворения  $\gamma'$ -фазы, равная для литейных ЖНС приблизительно 850 °С [43]. Согласно работам [43, 44] при температурах <850 °С содержание  $\gamma'$ -фазы в литейных ЖНС постоянно и составляет  $F_{\gamma'}^{20^\circ}$ .

Матрица плана  $2^{n-1} + 1$  и долговечность экспериментальных поликристаллических сплавов типа ЖС6Ф с переменным содержанием легирующих элементов Cr, Co, Nb, Hf, Zr и W

Условный номер сплава	Матрица плана в кодах $\tilde{x}_i$ соответствующего легирующего элемента						Долговечность при испытании на длительную прочность $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$ , ч
	$\tilde{x}_1$ (Cr)	$\tilde{x}_2$ (Co)	$\tilde{x}_3$ (Nb)	$\tilde{x}_4$ (Hf)	$\tilde{x}_5$ (Zr)	$\tilde{x}_6$ (W)	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	15,5
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	138,0
3	-1	+1	-1	-1	-1	+1	42,0
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1	20,8
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1	152,8
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	44,2
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1	15,5
8	+1	+1	+1	-1	-1	+1	83,5
9	-1	-1	-1	+1	-1	+1	95,3
10	+1	-1	-1	+1	-1	-1	28,5
11	-1	+1	-1	+1	-1	-1	12,7
12	+1	+1	-1	+1	-1	+1	53,0
13	-1	-1	+1	+1	-1	-1	26,0
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1	168,1
15	-1	+1	+1	+1	-1	+1	79,0
16	+1	+1	+1	+1	-1	-1	15,5
17	-1	-1	-1	-1	+1	+1	67,3
18	+1	-1	-1	-1	+1	-1	36,6
19	-1	+1	-1	-1	+1	-1	7,7
20	+1	+1	-1	-1	+1	+1	49,3
21	-1	-1	+1	-1	+1	-1	30,0
22	+1	-1	+1	-1	+1	+1	123,1
23	-1	+1	+1	-1	+1	+1	107,0
24	+1	+1	+1	-1	+1	-1	23,0
25	-1	-1	-1	+1	+1	-1	26,0
26	+1	-1	-1	+1	+1	+1	135,0
27	-1	+1	-1	+1	+1	+1	35,8
28	+1	+1	-1	+1	+1	-1	25,9
29	-1	-1	+1	+1	+1	+1	160,0
30	+1	-1	+1	+1	+1	-1	44,4
31	-1	+1	+1	+1	+1	-1	14,8
32	+1	+1	+1	+1	+1	+1	83,5
33	0	0	0	0	0,65	0	60,2
Дисперсия воспроизводимости $\bar{s}$							25,5
Примечание. $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$ – долговечность при испытании на длительную прочность при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа; приведены средние значения долговечности по результатам испытаний трех образцов каждого сплава.							

Определение периодов кристаллических решеток  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз в сплавах с 1–24 (табл. 1) проводили *in situ* на монолитных образцах при температуре 20 °С методом рентгеноструктурного анализа [45, 46]. Для остальных сплавов (25–33) периоды решеток фаз рассчитывали с помощью компьютерной программы, представленной в работе [47].

Период общей  $\gamma/\gamma'$  ГЦК кристаллической решетки сплавов  $a_{\gamma/\gamma'}$  рассчитывали как  $a_{\gamma/\gamma'} = (a_\gamma + a_{\gamma'})/2$ . Размерное несоответствие ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит) периодов кристаллических решеток фаз  $\delta^{20^\circ}$  – по формуле [25]:

$$\delta = (a_\gamma - a_{\gamma'})/a_\gamma, \quad (6)$$

где  $a_\gamma, a_{\gamma'}$  – периоды решеток соответственно  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз.

Атомную массу сплава  $A_{\text{спл}}$  рассчитывали как

$$A_{\text{спл}} = \sum_{i=1}^n A_i C_i,$$

где  $A_i$  – атомная масса  $i$ -го химического элемента сплава;  $C_i$  – атомная концентрация  $i$ -го химического элемента в сплаве;  $n$  – количество химических элементов, включая основу сплава.

Следует отметить, что параметр  $A_{\text{спл}}$  напрямую определяет плотность ЖНС –  $d = 0,144A_{\text{спл}}$  [10].

Для установления корреляционных зависимостей долговечности от структурно-фазовых и физико-химических параметров полученные экспериментальные данные проанализировали методами корреляционного и регрессионного анализов [48, 49]. При этом в качестве функции отклика выбрали логарифм значений долговечности  $y_i \equiv \log \tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ} = f(X_i)$ , где  $X_i$ :  $T_{\text{Solv}}$ ,  $T_S$ ,  $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ ,  $\delta^{20^\circ}$ ,  $A_{\text{спл}}$ ,  $a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$ . Функцию отклика  $y_i \equiv \log \tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$ , отвечающую за долговечность сплавов в зависимости от совокупности переменных структурно-фазовых и физико-химических параметров, описывали регрессионным уравнением (моделью) вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i, \quad (7)$$

где  $b_0, b_i$  – коэффициенты регрессии;  $X_i$  – значение  $i$ -го переменного структурного и физико-химического фактора (параметра) сплава.

### Результаты и обсуждение

Результаты определения структурно-фазовых и физико-химических параметров экспериментальных сплавов типа ЖС6Ф с переменным содержанием Cr, Co, Nb, Hf, Zr и W представлены в табл. 2.

При определении температур  $\gamma'$ -солвус и солидус, объемной доли  $\gamma'$ -фаз, периодов кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз и атомной массы сплавов параллельные опыты ставили не во всех точках плана эксперимента (табл. 1), а выборочно: в 10 точках плана указанные параметры определяли при исследовании двух образцов каждого сплава. Как показали эксперименты, в этом случае максимальный разброс значений параметров  $T_{\text{Solv}}$ ,  $T_S$ ,  $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ ,  $a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$  и  $A_{\text{спл}}$  не превышал соответственно 12 °С; 10 °С; 1,3 %; 0,0007 нм и 0,958 а. е. м.

**Структурно-фазовые и физико-химические параметры  
экспериментальных поликристаллических сплавов типа ЖС6Ф  
с переменным содержанием легирующих элементов Cr, Co, Nb, Hf, Zr и W**

Условный номер сплава	$T_{\text{Solv}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{S}}, ^\circ\text{C}$	$F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ , % (объемн.)	$A_{\text{спл}}$ , а. е. м.	$\delta^{20^\circ}$ , %	$a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$ , нм
1	1220	1269	25,8	58,161	-0,469	0,35738
2	1266	1307	35,3	59,383	0,072	0,35857
3	1259	1274	32,1	59,782	-0,175	0,35791
4	1210	1266	29,1	57,799	-0,021	0,35813
5	1283	1285	34,4	59,931	-0,014	0,35841
6	1235	1298	28,5	57,938	-0,056	0,35824
7	1220	1259	24,8	58,318	-0,400	0,35768
8	1233	1293	31,3	59,547	0,172	0,35889
9	1265	1270	33,1	59,367	-0,250	0,35791
10	1222	1261	31,6	57,944	-0,200	0,35794
11	1225	1252	25,7	58,325	-0,420	0,35728
12	1223	1294	30,3	59,553	-0,012	0,35861
13	1245	1253	28,2	58,466	-0,450	0,35703
14	1257	1291	36,0	59,701	0,261	0,35903
15	1260	1270	31,8	60,104	-0,127	0,35851
16	1208	1284	30,9	58,101	-0,280	0,35754
17	1267	1285	34,4	59,925	-0,273	0,35788
18	1225	1276	32,2	57,933	-0,050	0,35811
19	1210	1263	23,7	58,314	-0,378	0,35756
20	1220	1300	31,1	59,542	-0,021	0,35854
21	1248	1265	28,9	58,455	-0,485	0,35752
22	1245	1299	35,0	59,689	0,078	0,35872
23	1275	1280	33,1	60,093	-0,150	0,35824
24	1215	1261	31,6	58,089	0	0,35814
25	1248	1258	30,1	58,461	-0,486	0,35762
26	1256	1299	34,7	59,695	0,050	0,35879
27	1260	1265	31,8	60,099	-0,150	0,35834
28	1220	1255	31,5	58,096	-0,017	0,35847
29	1278	1290	35,3	60,249	0,012	0,35848
30	1225	1290	32,4	58,236	-0,102	0,35844
31	1240	1250	27,3	58,621	-0,420	0,35792
32	1255	1284	31,2	59,861	0,163	0,35913
33	1244	1286	33,5	58,999	-0,134	0,35824

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные данные, показывающие отдельно зависимость долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа  $\log t_{\sigma=80\text{МПа}}^{1100^\circ} = f(X_i)$  (где  $X_i$ :  $T_{\text{Solv}}$ ,  $T_{\text{S}}$ ,  $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ ,  $\delta^{20^\circ}$ ,  $A_{\text{спл}}$ ,  $a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$ ) литейных поликристаллических ЖНС от структурно-фазовых и физико-химических параметров этих сплавов.

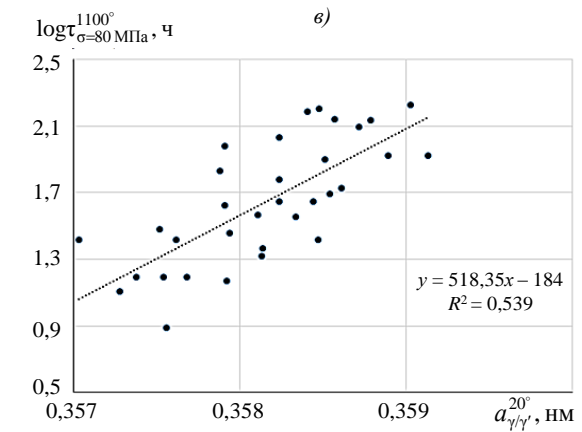
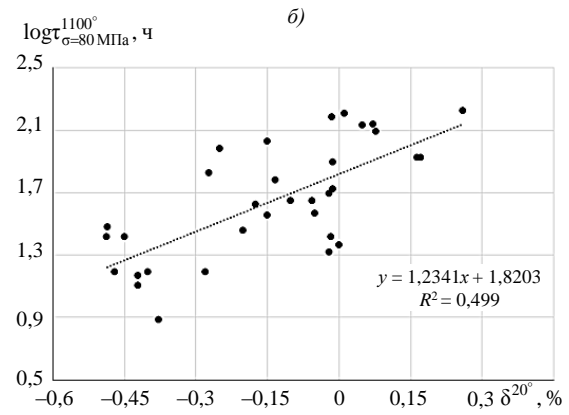
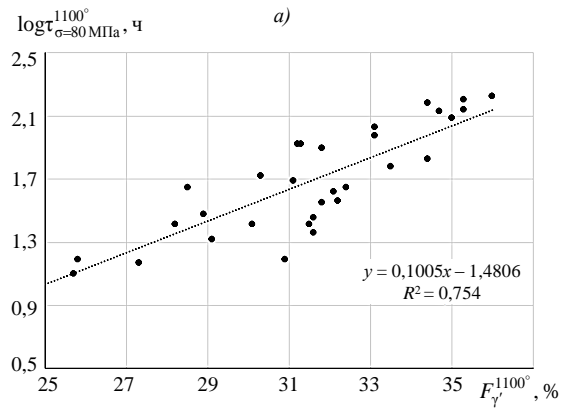


Рис. 1. Зависимость долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа от количества  $\gamma'$ -фазы при температуре 1100 °С (а);  $\gamma/\gamma'$ -мисфита при температуре 20 °С (б); периода общей  $\gamma/\gamma'$  ГЦК кристаллической решетки (в)

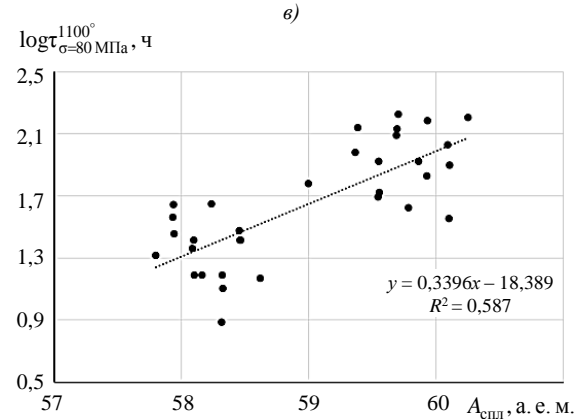
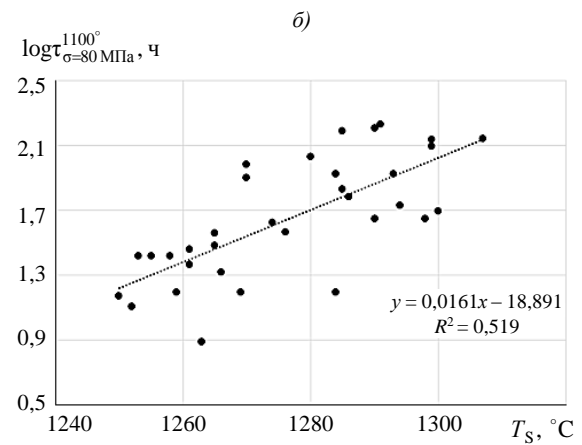
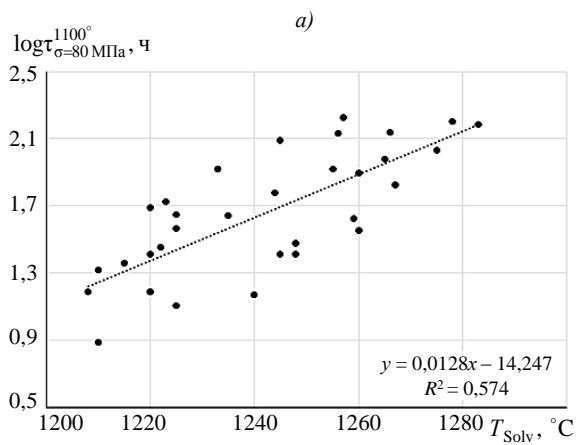


Рис. 2. Зависимость долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа от температур  $\gamma'$ -солвус (а) и солидус (б), а также от атомной массы сплава (в)



измерения отдельных структурных и физико-химических параметров  $X_i$ , в расчетах использовали нормированные переменные  $Z_i$ :

$$Z_i = X_i / \bar{S}_i \text{ для } i = 1 \dots k, \quad (9)$$

где  $\bar{S}_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}{n-1}$  – среднее квадратическое отклонение, характеризующее отклонение отдельного значения параметра  $X_i$  от среднего значения  $\bar{X}_i$  в выборке.

В этом случае модель линейной регрессии (7) в нормированных переменных  $Z_i$  имеет вид

$$y \equiv \log \tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ} = p_0 + \sum_{i=1}^n p_i Z_i, \quad (10)$$

где  $p_0, p_i$  – коэффициенты регрессии;  $Z_i$  – нормированные (безразмерные) переменные параметры соответственно для  $T_{\text{Solv}}, T_S, F_{\gamma'}^{1100^\circ}, \delta^{20^\circ}, A_{\text{цпл}}, a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$ , которые задаются соотношениями

$$Z_1 = \frac{T_{\text{Solv}}}{\bar{S}_1}, Z_2 = \frac{T_S}{\bar{S}_2}, Z_3 = \frac{F_{\gamma'}^{1100^\circ}}{\bar{S}_3}, Z_4 = \frac{\delta^{20^\circ}}{\bar{S}_4}, Z_5 = \frac{A_{\text{цпл}}}{\bar{S}_5}, Z_6 = \frac{a_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}}{\bar{S}_6}. \quad (11)$$

В соотношениях (11) средние квадратические отклонения  $\bar{S}_i$ , рассчитанные по результатам статистической обработки экспериментальных данных, имеют следующие значения:  $\bar{S}_1 = 22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\bar{S}_2 = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\bar{S}_3 = 3,16 \text{ \%}$ ;  $\bar{S}_4 = 0,209 \text{ \%}$ ;  $\bar{S}_5 = 0,826 \text{ а. е. м.}$ ;  $\bar{S}_6 = 0,00052 \text{ нм}$ .

Методом регрессионного анализа определили численные значения коэффициентов регрессии  $p_0$  и  $p_i$  уравнения (10). Полученная регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$\log \tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ} = -23,51 + 0,157Z_1 + 0,074Z_2 + 0,092Z_3 + 0,098Z_4 + 0,026Z_5 + 0,011Z_6, R^2 = 0,941, \quad (12)$$

где переменные  $Z_1$ – $Z_6$  – безразмерные параметры, задаваемые соотношениями (11).

Достоверность регрессионной модели (12), предложенной для прогнозирования долговечности при температуре  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  и напряжении  $80 \text{ МПа}$ , подтверждается высоким значением коэффициента корреляции ( $R = 0,97$ ) между расчетными и экспериментальными данными по долговечности, приведенными на рис. 3. Установлено, что среднее квадратическое отклонение экспериментальных значений долговечности  $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$  от рассчитанных по модели (12) составляет приблизительно  $\pm 12 \text{ ч}$ .

В качестве примера практического применения разработанной регрессионной модели (12) рассчитали долговечность  $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$  некоторых промышленных и опытных ЖНС с поликристаллической равноосной структурой. Химический состав и длительная прочность этих сплавов приведены в табл. 3 и 4 соответственно [40, 41, 50–53].

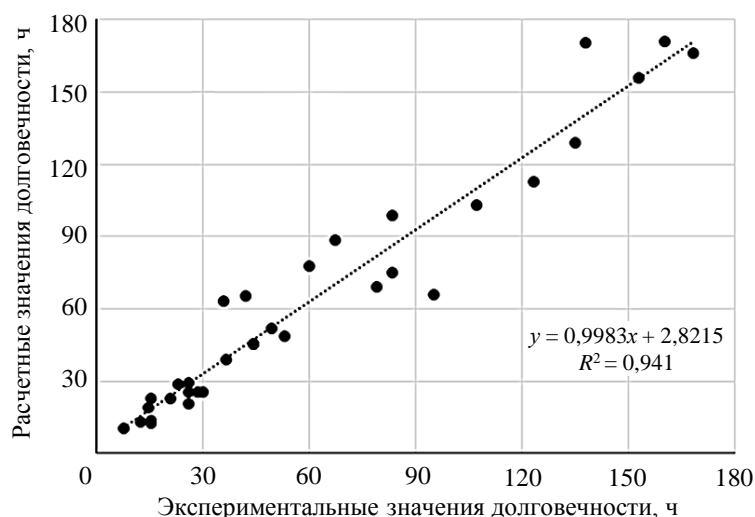


Рис. 3. Корреляция между расчетными и экспериментальными данными по долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов

Таблица 3

Химический состав литейных жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, % (по массе)								
	С	Cr	Ti	Mo	W	Nb	Al	Co	Другие
ВЖЛ12У	0,17	9,5	4,5	3,1	1,4	0,75	5,3	14,0	0,7 V
ВЖЛ12Э	0,15	9,5	4,5	3,1	1,4	0,75	5,3	9,0	0,7 V
ЖС6К	0,16	10,7	2,8	4,0	5,0	–	5,5	4,5	–
ЖС6У	0,17	8,8	2,4	1,8	10,3	1,0	5,6	9,8	–
ЖС6УМ	0,16	8,6	2,3	1,5	9,8	1,0	5,3	9,5	–
ЖС6Ф	0,15	5,5	1,1	1,0	12,0	1,6	5,5	9,5	1,0 V; 1,2 Hf
ВЖЛ20	0,08	9,5	4,5	3,5	1,4	0,8	5,3	6,5	0,3 V
ВЖЛ21	0,13	8,3	3,5	3,8	2,8	–	5,4	9,8	2,5 Ta
ВЖЛ22	0,12	4,5	1,3	3,2	6,8	–	5,6	8,5	4,6 Ta; 2 Re

Расчет долговечности  $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$  промышленных и опытных ЖНС проводили с использованием структурно-фазовых и физико-химических параметров сплавов, которые в данной работе определяли по методу, представленному в работах [10, 47]. Полученные расчетные значения параметров этих сплавов представлены в табл. 4. Для сравнения приведены экспериментальные данные по длительной прочности ( $\sigma_{100}^{1000^\circ}$ ,  $\sigma_{100}^{1050^\circ}$  и  $\sigma_{100}^{1100^\circ}$ ) этих же сплавов. Рассчитанные значения долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа промышленных и опытных ЖНС достаточно хорошо коррелируют с данными по пределам длительной прочности этих сплавов при температурах 1000, 1050 и 1100 °С.

Таблица 4

Структурно-фазовые характеристики промышленных и опытных литейных жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	$T_{\text{Soliv}}$ , °C	$T_s$ , °C	$F_{\gamma'}^{1100^\circ}$ , %	$\delta^{20^\circ}$ , %	$A_{\text{смп}}$ , а. е. м.	$\alpha_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ}$ , нм	$\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$ , ч	МПа	
								$\sigma_{100}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1050^\circ}$
ВЖЛ12У	1229	1273	36,4	0,16	55,001	0,35865	43,1	140	—
ВЖЛ12Э	1240	1275	37,5	0,08	55,027	0,35846	51,6	140	—
ЖС6К	1230	1257	30,1	0,49	56,388	0,3587	37,9	155	90
ЖС6У	1234	1276	34,1	0,22	58,246	0,35892	56,6	165	100
ЖС6УМ	1242	1274	34,2	0,16	58,238	0,35856	58,4	170	110
ЖС6Ф	1248	1292	34,8	0,08	59,818	0,35897	85,6	175	120
ВЖЛ20	1246	1281	36,9	0,15	55,281	0,35821	63,3	—	—
ВЖЛ21	1253	1284	38,6	0,16	56,673	0,3581	91,2	180	120
ВЖЛ22	1282	1298	42,5	0,15	60,197	0,35891	293,2	205	—

Примечание.  $T_{\text{Soliv}}$  – температура полного растворения  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -твердом растворе ( $\gamma'$ -солвус);  $T_s$  – температура солидус;  $F_{\gamma'}^{1100^\circ}$  – объемная доля  $\gamma'$ -фазы в сплаве при температуре 1100 °C;  $\delta^{20^\circ} = (\alpha_\gamma - \alpha_{\gamma'})/\alpha_\gamma - \gamma/\gamma'$ -мисфит при температуре 20 °C;  $A_{\text{смп}}$  – атомная масса сплава;  $\alpha_{\gamma/\gamma'}^{20^\circ} = (\alpha_\gamma + \alpha_{\gamma'})/2$  – период общей  $\gamma/\gamma'$  ГЦК решетке сплава при температуре 20 °C;  $\tau_{\sigma=80 \text{ МПа}}^{1100^\circ}$  – время до разрушения (долговечность) при температуре 1100 °C и напряжении 80 МПа;  $\sigma_{100}^{1000^\circ}$ ,  $\sigma_{100}^{1050^\circ}$  и  $\sigma_{100}^{1100^\circ}$  – пределы длительной прочности на базе 100 ч при температурах 1000, 1050 и 1100 °C соответственно.

**Заключения**

Представлены результаты экспериментов и расчетов по определению долговечности (времени до разрушения) при испытании на длительную прочность при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа, температур полного растворения  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -твердом растворе ( $\gamma'$ -солвус) и солидус, объемной доли  $\gamma'$ -фазы при температуре 1100 °С,  $\gamma/\gamma'$ -мисфита при температуре 20 °С, периода общей  $\gamma/\gamma'$  ГЦК решетки при температуре 20 °С и атомной массы экспериментальных литейных ЖНС с поликристаллической равноосной структурой с переменным содержанием легирующих элементов Cr, Co, W, Hf и Zr.

Предложена регрессионная модель для прогнозирования долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа литейных ЖНС с поликристаллической равноосной структурой. Модель позволяет прогнозировать долговечность разрабатываемого сплава, исходя из данных по температурам полного растворения  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -твердом растворе ( $\gamma'$ -солвус) и солидус, объемной доле  $\gamma'$ -фазы в сплаве при температуре 1100 °С,  $\gamma/\gamma'$ -мисфиту (при температуре 20 °С), периоду общей  $\gamma/\gamma'$  ГЦК решетки сплава при температуре 20 °С и атомной массе сплава.

Предложенная модель проверена путем прогнозирования долговечности при температуре 1100 °С и напряжении 80 МПа известных промышленных и опытных литейных ЖНС с поликристаллической равноосной структурой – ВЖЛ12У, ВЖЛ12Э, ЖС6К, ЖС6У, ЖС6УМ, ЖС6Ф, ВЖЛ20, ВЖЛ21 и ВЖЛ22. Установлено, что рассчитанные значения долговечности при температуре 1100 °С указанных сплавов достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными по пределам длительной прочности сплавов на базе 100 ч при температурах 1000, 1050 и 1100 °С.

**Библиографический список**

1. Иноземцев А.А., Коряковцев А.С., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Роль материалов и защитных покрытий в обеспечении надежности и экономичности ГТД // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение» (Москва, 25–26 апр. 2006 г.). М.: ВИАМ, 2006. С. 84–87.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Pollock T.M. Alloy design for aircraft engines // Nature Materials. 2016. Vol. 15. P. 809–815.
4. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
5. Бондаренко Ю.Н. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Ohno T., Watanabe R., Tanaka K. Development of a nickel-base single crystal superalloy containing molybdenum by an alloy designing method // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 1988. Vol. 74. Is. 11. P. 133–140. DOI: 10.2355/tetsutohagane1955.74.11\_2193.
7. Harada H., Ohno K., Yamagata T. et al. Phase calculation and its use in alloy design program for nickel-base superalloys // Superalloys 1988. Pennsylvania: The Metallurgical Society, 1988. P. 733–741.
8. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
9. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. Cambridge: United Kingdom at University Press, 2006. 372 p.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 1. С. 3–21.

11. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2017. 854 с.
12. Yokokawa T., Harada H., Kawagishi K., Kobayashi T., Yuyama M., Takata Y. Advanced alloy design program and improvement of sixth-generation Ni-base single crystal superalloy TMS-238 // *Superalloys 2020*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2020. P. 122–130.
13. Mills K.C., Youssef Y.M., Li Z., Su Y. Calculation of thermophysical properties of Ni-based superalloys // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 5. P. 623–632.
14. Collins H.E., Quigg R.J., Drenshfield R.L. Development of a nickel-base superalloy using statistically designed experiments // *Transactions of American Society for Metals*. 1968. Vol. 61. P. 711–721.
15. Ртищев В.В. Расчетные методы прогнозирования фазового состава, структурных характеристик и пределов длительной прочности по химическому составу жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. М.: Наука, 1984. С. 144–150.
16. Петрушин Н.В., Висик Е.М., Елютин Е.С. Усовершенствование состава и структуры литейного жаропрочного никелевого сплава с малой плотностью. Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-3-15.
17. Бокштейн С.З., Гинзбург С.С., Кишкин С.Т. и др. Авторадиография поверхностей раздела и структурная стабильность сплавов. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
18. Петрушин Н.В., Логунов А.В., Кишкин С.Т. и др. Исследование закономерностей изменения физико-механических свойств и структурной стабильности никелевых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы*. М.: ОНТИ ВИАМ, 1983. Вып.: Теплофизические исследования жаропрочных сплавов и теплозащитных покрытий. С. 17–30.
19. Логунов А.В., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А., Должанский Ю.М. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1981. № 6. С. 16–20.
20. Кишкин С.Т., Логунов А.В., Петрушин Н.В., Глезер Г.М., Кулешова Е.А., Морозова С.Г. Научные основы легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 1987. Вып.: Методы исследования конструкционных материалов. С. 6–18.
21. Caron P. High  $\gamma'$  solvus new generation nickel-based superalloys for single crystal turbine blade applications // *Superalloys 2000*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 737–746.
22. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. М.: Металлургия, 1974. 280 с.
23. Физическое металловедение: в 3 т. / под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена; пер. с англ. М.: Металлургия, 1987. Т. 3: Физико-химические свойства металлов и сплавов. 663 с.
24. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2 кн. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; пер. с англ. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с.
25. Петрушин Н.В., Игнатова И.А., Логунов А.В., Самойлов А.И., Разумовский И.М. Исследование влияния размерного несоответствия параметров кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз на характеристики жаропрочности дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов // *Известия АН СССР. Металлы*. 1981. № 6. С. 153–159.
26. Бокштейн С.З., Игнатова И.А., Болберова Е.В., Кишкин С.Т., Разумовский И.М. Влияние несоответствия параметров решеток фаз на диффузионную проницаемость межфазных границ // *Физика металлов и металловедение*. 1985. Т. 59. Вып. 5. С. 936–942.
27. Светлов И.Л., Олдаковский И.В., Петрушин Н.В., Игнатова И.А. Концентрационная зависимость периодов решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз никелевых жаропрочных сплавов // *Металлы*. 1991. № 6. С. 150–157.
28. Zhang J.X., Murakumo T., Harada H., Koizumi Y. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138 // *Scripta Materialia*. 2003. Vol. 48. P. 287–293.

29. Koizumi Y., Kobayashi T., Yokokawa T., Zhang J., Osawa M., Harada H., Aoki Y., Arai M. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys // *Superalloys 2004*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 35–43.
30. Игнатова И.А., Петрушин Н.В., Самойлов А.И., Логунов А.В., Козлова В.С. Высокотемпературное исследование структурных факторов жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов // *Авиационные материалы*. М.: ОНТИ ВИАМ, 1983. Вып.: Теплофизические исследования жаропрочных сплавов и теплозащитных покрытий. С. 39–46.
31. Biermann H., Strehler V., Mughrabi H. High temperature measurement of lattice parameters and internal stresses of a creep-deformed monocrystalline nickel-base superalloy // *Metallurgical and Material Transaction*. 1996. Vol. 27. P. 1003–1014.
32. Heckl A., Neumeier S., Göken M., Singer R.F. The effect of Re and Ru on  $\gamma/\gamma'$  microstructure,  $\gamma$ -solid solution strengthening and creep strength in nickel-base superalloys // *Materials Science and Engineering A*. 2011. Vol. A528. No. 9. P. 3435–3444.
33. Ртищев В.В. Методы прогнозирования структурных характеристик и свойств жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1994. № 9. С. 13–20.
34. Yamagata T., Harada H., Nakazawa S., Yamasaki M. Effect of Ta/W ratio in  $\gamma'$  phase on creep strength of nickel-base single crystal superalloys // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1986. Vol. 26. Is. 7. P. 638–642.
35. Harada H., Yamagata T., Yokokawa T. et al. Computer analysis on microstructure and property of nickel-base single crystal superalloys // *Proceedings of the Fifth International Conference held at University College (Swansea, 28 March – 2 April, 1993)*. Swansea: The Institute of Metals, 1993. P. 255–264.
36. Yokokawa T., Harada H., Mory Y. et al. Design of next generation Ni-base single crystal superalloys containing Ir: towards 1150 °C temperature capability // *Superalloys 2016*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2016. P. 123–130.
37. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-1-3-33.
38. Шпунт К.Я., Сидоров В.В. Высокожаропрочный литейный сплав на никелевой основе марки ЖС6Ф // *Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники*. М.: Наука, 1978. С. 31–35.
39. Задгенидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 390 с.
40. Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы // *Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные материалы*. С. 519–552.
41. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия / под ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
42. Способ определения относительного объемного содержания упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в сплавах: а.с. № 687965 СССР; заявл. 16.05.77; опубл. 15.03.92.
43. Link T., Epishin A., Paulisch M., May T. Topography of semicoherent  $\gamma/\gamma'$ -interfaces in superalloys: Investigation of the formation mechanism // *Materials Science Engineering A*. 2011. Vol. A528. No. 19–20. P. 6225–6234.
44. Петрушин Н.В., Логунов А.В., Ковалев А.И. Температурные интервалы растворения упрочняющих интерметаллидных фаз в жаропрочных сплавах для ГТД // *Авиационные материалы*. М.: ОНТИ ВИАМ, 1983. Вып.: Теплофизические исследования жаропрочных сплавов и теплозащитных покрытий. С. 30–35.
45. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Определение мисфита во фрагментированных монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // *Труды ВИАМ*. 2013. № 5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2020).

46. Аргинбаева Э.Г., Назаркин Р.М., Шестаков А.В., Карачевцев Ф.Н. Исследование влияния термической обработки на структурно-фазовые параметры интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 8–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-8-13.
47. Расчет параметров жаропрочных никелевых сплавов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019661855: заявл. 28.08.19; опубл. 10.09.19.
48. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 232 с.
49. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
50. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2148100 Рос. Федерации; заявл. 18.01.99; опубл. 27.04.00.
51. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2153020 Рос. Федерации; заявл. 27.05.99; опубл. 20.07.00.
52. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2434069 Рос. Федерации; заявл. 05.10.10; опубл. 20.11.11.
53. Литейный жаропрочный сплав на никелевой основе и изделие, выполненное из него: пат. 2530932 Рос. Федерации; заявл. 29.10.13; опубл. 20.10.14.