

УДК 539.3

И. Х. БАДАМШИН

## МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Приведена модель и последовательность расчета деформации установившейся ползучести жаропрочных сплавов, основанная на механизме перемещения дислокаций. Рабочая лопатка газовой турбины; жаропрочный сплав; монокристалл; поликристалл; ползучесть

В расчетах на прочность рабочих лопаток газовых турбин с большим ресурсом важной составляющей является деформация ползучести. Тогда деформация, определяющая напряженно-деформированное состояние лопатки, выражается как суммарная деформация  $\varepsilon_{\Sigma}$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_t + \varepsilon^0,$$

где  $\varepsilon_{\text{упр}}$  – относительная упругая деформация;  $\varepsilon_t$  – относительная термическая деформация;  $\varepsilon^0$  – относительная деформация ползучести.

Для применения известной [1] формулы скорости деформации ползучести  $\xi$  по модели Нортон  $\dot{\xi} = k\sigma^n$  необходимо знать экспериментальные значения коэффициентов  $k$ ,  $n$ , информация по которым ограничена [1, 2]. Возникает задача определения характеристик ползучести в условиях ограниченных экспериментальных данных.

Задача решается созданием математической модели расчета характеристик ползучести, основанной на перемещении краевых дислокаций. Такая модель позволяет получить диаграмму установившейся ползучести для конкретного материала в зависимости от температуры и напряжения.

Рассматривается деформация на I участке и на II участке установившейся ползучести (рис. 1). В этом случае для определения величины деформации ползучести необходимо знать скорость перемещения дислокации.

Вначале рассматривается движение одной краевой дислокации в бездефектном монокристалле. Начальная скорость перемещения дислокации в нанобъеме  $v_0$  определяется по формуле (патент RU 2267112, автор И. Х. Бадамшин)

$$v_0 = \frac{0,5a_0}{\sqrt{M \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 x^2}}} = \frac{e}{\sqrt{5\pi\varepsilon_0 a_0 M}}, \quad (1)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд, равный по модулю заряду электрона;  $\pi = 3,14$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/нм<sup>2</sup> – электрическая постоянная;  $a_0$  – период кристаллической решетки;  $M = F_{\text{внеш}} / F_{\text{кул}}^1$ ,  $F_{\text{внеш}}$  – внешняя сила,  $F_{\text{кул}}^1$  – кулоновская сила взаимодействия двух зарядов.

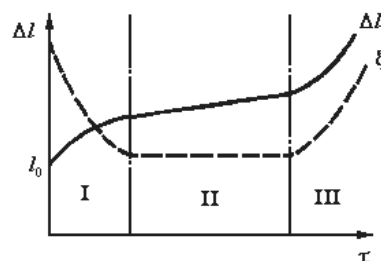


Рис. 1. Типичный вид кривой ползучести  $\Delta l(\tau)$  и скорости ползучести  $\xi(\tau)$ : I – стадия неустановившейся ползучести; II – стадия установившейся ползучести; III – стадия разрушения

Зная скорость перемещения дислокации в нанобъеме, рассчитываем деформацию в монокристалле.

Скорость деформации ползучести технических монокристаллов, имеющих плотность дислокаций до  $10^3$  см<sup>-2</sup>, определяется по формуле Орована

$$\xi = \rho_d b v, \quad (2)$$

где  $\xi$  – скорость деформации ползучести;  $\rho_d$  – плотность дислокаций;  $b$  – вектор Бюргерса (параметр, характеризующий геометрическое искажение кристаллической решетки вследствие появления краевой дислокации);  $v$  – скорость движения дислокации (в частном случае  $v = v_0$ ).

Эта же формула (2) используется для расчета скорости деформации ползучести поликристаллов. В этом случае расчет ведется при следующих допущениях.

1. Рассматривается участок установившейся ползучести.

2. Механизм ползучести определяется перемещением краевой дислокации.

3. Изменение плотности дислокаций (межзеренное и внутризеренное для поликристаллов) учитывается формулой Орована.

4. Влияние температуры на скорость деформации учитывается через изменение периода кристаллической решетки  $a_0$ .

5. Влияние напряжения на скорость деформации учитывается через изменение коэффициента  $M$  в формуле (1).

Определение скорости перемещения краевой дислокации  $v$  по длине нанообъема под действием заданной внешней нагрузки дает возможность оценить величину и скорость деформации установившейся ползучести. Расчетная модель корректируется по ограниченному экспериментальным данным (например, одна точка) и в дальнейшем используется для определения характеристик ползучести при различных температурах и напряжениях внутри заданного интервала.

Последовательность расчета деформации ползучести следующая.

1. Рассчитывается начальная скорость перемещения дислокации по формуле (1).

2. По экспериментальным значениям скорости деформации  $\xi$  (при данных температуре и напряжении) определяется средняя плотность дислокаций  $\rho_d$  по формуле (2)

$$\rho_d = \xi / (a_0 v).$$

3. По экспериментальным значениям напряжения определяются неизвестные коэффициенты  $\alpha$  и  $k$  по формуле из источника [3]

$$\sigma = \alpha a_0 G \rho_d^k, \quad (3)$$

т. е. вид зависимости плотности дислокаций от напряжения.

4. Расчетные значения плотности дислокаций подставляются в формулу Орована, тем самым определяется зависимость скорости деформации  $\xi$  от напряжения при данной температуре  $\xi = f(\sigma)$ .

5. Влияние температуры на скорость деформации  $\xi$  определяется через изменение периода кристаллической решетки  $\Delta a_0$  по формуле (патент RU 2271534, автор Бадамшин И. Х.)

$$\Delta a_0 = 0,5 \left( \frac{e^2}{\frac{e^2}{a_0} - c'_v \Delta T 2\pi \epsilon_0} - a_0 \right),$$

где  $c'_v$  – теплоемкость атома при постоянном объеме;  $\Delta T$  – изменение температуры. Затем величина  $a_0 + \Delta a_0$  подставляется в формулу Орована.

6. Деформация на I участке и II участке установившейся ползучести  $\epsilon$  определяется по формуле

$$\epsilon = \xi \tau^\mu \exp^{\xi \tau},$$

где  $\tau$  – длительность испытаний на ползучесть;  $\mu = 0,3$ .

### Характеристики ползучести поликристаллических жаропрочных сплавов

В качестве примера результаты расчета для сплава на никелевой основе приведены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение $\sigma$ , МПа	Скорость ползучести 1/ч при $t = 800^\circ\text{C}$ , $\delta = 1\%$		Погрешность, %
	расчетная	экспериментальная	
350	$3,93 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	1,8
400	$8,91 \cdot 10^{-5}$	$8,00 \cdot 10^{-5}$	11,5
450	$19,83 \cdot 10^{-5}$	$22,00 \cdot 10^{-5}$	9,8

Скорость деформации ползучести в зависимости от напряжения  $\sigma$  при  $800^\circ\text{C}$  приведена на рис. 2.

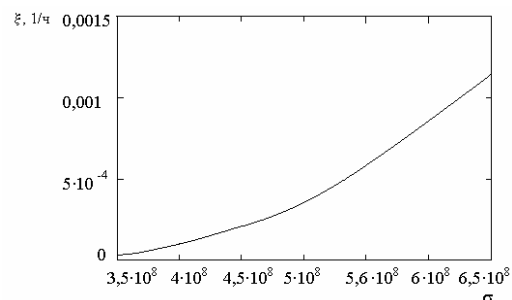


Рис. 2. Скорость деформации ползучести в зависимости от напряжения  $\sigma$  при  $800^\circ\text{C}$

Скорость деформации ползучести в зависимости от температуры при  $\sigma = 400$  МПа (рис. 3).

Аналогично рассчитываются характеристики ползучести для других значений напряжений и температуры. Тем самым восполняется недостающая экспериментальная справочная информация.

Полученные результаты используются в дальнейшем в качестве исходных данных в расчете лопатки методом конечных элементов.

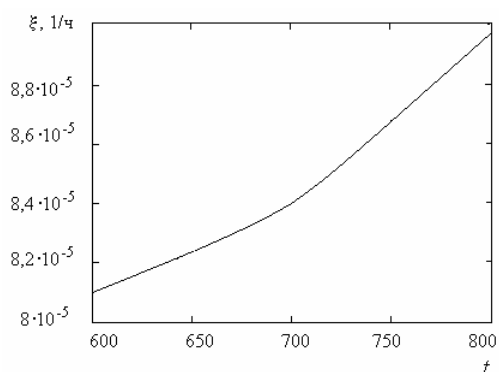


Рис. 3. Скорость деформации ползучести в зависимости от температуры при  $\sigma = 400$  МПа

### Характеристики ползучести монокристаллических жаропрочных сплавов

Исходными данными для модели является диаграмма ползучести ЖС32-ВНК-моно при  $1000^{\circ}\text{C}$  [2]. В результате расчетов получены зависимости скорости деформации ползучести от напряжения (рис. 4) и температуры (рис. 5).

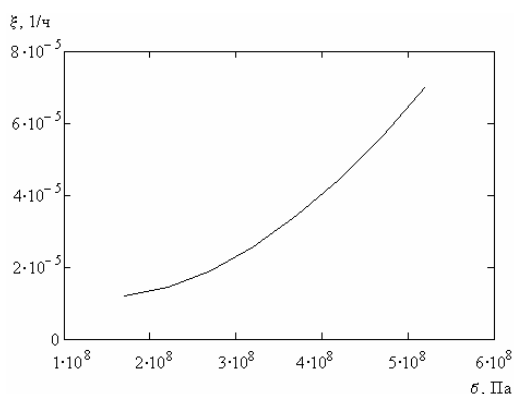


Рис. 4. Расчетная зависимость скорости деформации от напряжения при  $1000^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Напряжение $\sigma$ , МПа	Деформация ползучести % за 500 ч при $t = 1000^{\circ}\text{C}$ , [001]		Погрешность, %
	расчетная	экспериментальная	
170	0,78	0,60	30
220	0,94	1,20	22
350	2,10	2,00	5

Из табл. 2 видно, что расчетная модель ползучести удовлетворительно скорректирована по экспериментальным данным. Так, при напряжении 170 МПа и  $t = 1000^{\circ}\text{C}$  расчетная деформация ползучести за 500 ч составляет 0,78%, а экспериментальная – 0,60%.

Проведен сравнительный анализ расчетных характеристик ползучести с экспериментальными данными для сплава ЖС32-ВНК-моно (рис. 6, табл. 2). По расчетной модели определяется необходимая величина деформации ползучести в зависимости от напряжения или температуры в ограниченной экспериментальными данными области длительности испытаний.

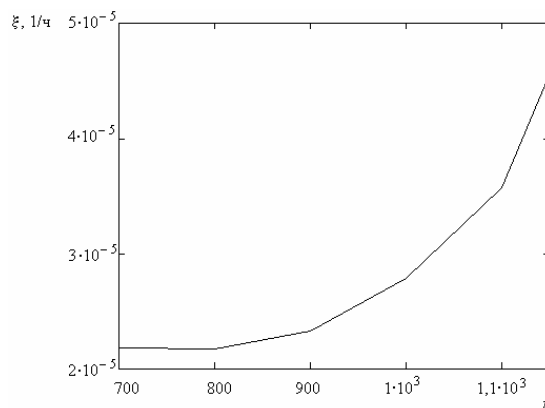


Рис. 5. Расчетная зависимость скорости деформации от температуры при  $\sigma = 170$  МПа

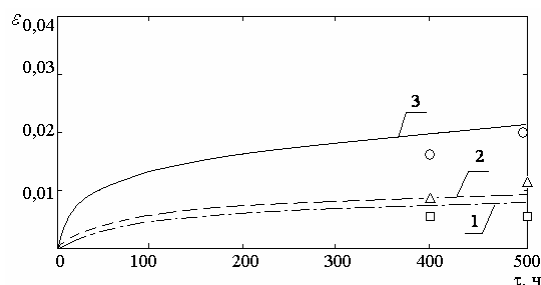


Рис. 6. Расчетная деформация ползучести (I и II стадии) ЖС32-ВНК-моно [001], при  $1000^{\circ}\text{C}$ : 1 –  $\sigma = 170$  МПа; 2 –  $\sigma = 220$  МПа; 3 –  $\sigma = 350$  МПа. Экспериментальные данные обозначены точками для 500 ч и 400 ч

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1964. 672 с.
2. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
3. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов: Учеб. пособие. М.: Металлургия, 1986. 312 с.

### ОБ АВТОРЕ



**Бадамшин Ильдар Хайдарович**, дипл. инж. по авиац. двиг. (УАИ, 1979). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и уст. (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. испытаний и прочности ГТД.