

УДК 669.14.018.44:539.4

Е.Р. ГОЛУБОВСКИЙ¹, И.Л. СВЕТЛОВ², К.К. ХВАЦКИЙ²¹ *ФГУП Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), Россия*² *ФГУП Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ), Россия*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ АКСИАЛЬНОЙ И АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния аксиальной кристаллографической ориентации на характеристики упругости, кратковременной и длительной прочности монокристаллов сплава ЖС32. Показано, что изменение азимутальной ориентации в кристаллографической плоскости {001} не оказывает влияния на длительную прочность монокристаллов с аксиальной ориентацией <001>. Показано, что этот результат отличается от значимого влияния азимутальной ориентации на циклическую трещиностойкость монокристаллов сплава ЖС6Ф.

монокристаллы никелевых сплавов, аксиальная и азимутальная кристаллографическая ориентация, анизотропия, кратковременная и длительная прочность, трещина усталости

Введение и постановка задачи

Расчёт напряжённо-деформированного состояния при ресурсном проектировании литых монокристаллических охлаждаемых лопаток авиационных газотурбинных двигателей и промышленных газовых турбин основан на прочностных характеристиках материала детали. Значения этих характеристик в монокристаллах литейных высокожаропрочных никелевых сплавов с ГЦК-решёткой, которые применяются для изготовления монокристаллических лопаток методом направленной кристаллизации, существенно зависят от кристаллографической ориентации (КГО), вдоль которой приложена внешняя нагрузка (аксиальная КГО). Кроме того, на уровень прочностных и деформационных характеристик может оказывать влияние азимутальная КГО – т.е. направление, которое лежит в плоскости, перпендикулярной аксиальной КГО, и в которой происходит образование и развитие микро- и макротрещин или накапливается деформация.

В настоящей работе поставлена задача экспериментального исследования и анализа влияния акси-

альной КГО на характеристики упругости (модуль Юнга – E), кратковременной (КрП) и длительной прочности (ДП), а также влияния азимутальной КГО на ДП и скорость развития трещины усталости (СРТУ), полученных на монокристаллических образцах из никелевых жаропрочных сплавов в диапазоне температур 20 – 1100°C.

Материал, образцы и методика испытаний

Образцы для испытаний из сплава ЖС32-моно были изготовлены из монокристаллических отливок в виде цилиндрических заготовок или пластин (в литом состоянии), полученных методом направленной кристаллизации по технологии УВНК [1]. Монокристаллы литого сплава ЖС32-моно имеют дендритно-ячеистую структуру. Междендритное расстояние между осями дендритов первого порядка составляет ~400 мкм. Частицы упрочняющей γ' -фазы (Ni_3Al) в осях дендритов имеют относительно регулярную кубоидную форму по сравнению с более крупными выделениями неправильной морфологии в межосном пространстве. Такая морфологи-

* © Е.Р. Голубовский, И.Л. Светлов, К.К. Хвацкий. Экспериментальных исследований (проект 02-01-00257).

ческая и размерная неоднородность является следствием ликвации легирующих элементов в процессе направленной кристаллизации.

Монокристаллические образцы имели аксиальную КГО <001>, <011> или <111>; отклонение от этих ориентаций не превышало 10°. Образцы и методика испытаний удовлетворяли требованиям соответствующих стандартов [2, 3]. Для оценки влияния аксиальной КГО на модуль Юнга были использованы цилиндрические образцы с рабочей частью $l = 100$ мм, $d = 8$ мм; для испытаний на КрП (273, 1073, 1173, 1273К) и ДП (1173, 1273, 1373К) – цилиндрические образцы $l = 5d$ ($d = 5$ мм). Для оценки влияния азимутальной КГО использованы образцы с аксиальной КГО <001> и азимутальными КГО <001> и <011>: для испытаний на ДП (1273, 1373К) – плоские образцы с рабочей частью $20 \times 8 \times 1$ мм (аксиальная КГО параллельна стороне $l = 20$ мм, а азимутальная КГО параллельна стороне $l = 8$ мм); для оценки СРТУ (273К) – СТ-образцы из сплава ЖС6Ф – $45 \times 42 \times 2$ мм [4].

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены средние значения (по результатам испытаний 3-х образцов) модуля Е и характеристик КрП в зависимости от аксиальной КГО и температуры.

Таблица 1
Модули упругости Е и характеристики КрП сплава ЖС32-моно

T, К	КГО <hkl>	E, ГПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
293	<001>	112	1005	1315	9
	<011>	174	820	–	–
	<111>	272	1330	1650	11
1073	<001>	97	1045	1310	7
	<011>	161	815	–	–
	<111>	247	1145	1295	10
1173	<001>	82	865	1035	13
	<011>	144	795	–	–
	<111>	222	990	1025	17
1273	<001>	76	620	755	14,5
	<011>	121	535	–	–
	<111>	214	650	735	11

Как следует из табл. 1, значения Е (<111>) превышают модуль Е (<001>) более чем в два раза, а

модуль Е (<011>) занимает промежуточное положение.

Приведенные результаты свидетельствуют о кристаллографической анизотропии характеристик КрП в интервале рабочих температур. При этом максимальные значения предела текучести $\sigma_{0.2}$ имеют образцы с аксиальной КГО <111>, минимальные – <011>, а образцы с аксиальной КГО <001> имеют промежуточные значения. Наибольшие значения имеет предел прочности σ_B с КГО <111> при комнатной температуре, а при более высоких температурах (рис. 1, в) влияние аксиальной КГО не проявляется.

Характеристики длительной прочности для различных аксиальных КГО были получены с использованием уравнения [5]:

$$\tau_p = \xi T^m \sigma^{-n} \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где τ_p – время до разрушения, час; T – температура, К; σ – напряжение, МПа; $R = 8,31$ Дж/моль – универсальная газовая постоянная; ξ , m , n , U_0 и γ – коэффициенты, численные значения которых определяется по результатам испытаний на ДП [5].

Таблица 2
Коэффициенты уравнения (1)

T ₁ -T ₂ , К	Аксиальная КГО, <hkl>	m	n	lnξ	U ₀ *,	γ*
1173-1273	Цилиндрические образцы					
	<001>	2	4	-34,9	508,6	34,3
	<011>	0	0	-49,3	631,6	241,6
	<111>	2	5	-26,3	472,1	2,2
1273-1373	<001>	2	4	-31,6	476,0	45,7
	<011>	0	2	-33,6	560,9	163,8
	<111>	2	4	-32,5	486,1	33,9
	Плоские образцы. Аксиальная КГО <001> с азимутальной КГО <011>					
	<001>	2	3	-27,0	355,0	42,1

* U_0 – [кДж/моль], γ – [Дж/моль.МПа]

Для оценки влияния аксиальной КГО на уровень характеристик ДП использован параметр – коэффициент кристаллографической анизотропии ДП [6]:

$$K_{\tau}^{<hkl>} = \sigma_{\tau}^{<hkl>} / \sigma_{\tau}^{<001>}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\tau}^{<hkl>}$, $\sigma_{\tau}^{<001>}$ – пределы длительной прочности для аксиальных КГО $<hkl>$ и $<001>$ соответственно.

В табл. 2 представлены численные значения коэффициентов уравнения (1), а на рис. 1 показаны кривые ДП, рассчитанные по уравнению (1) с этими значениями коэффициентов, и результаты испытаний цилиндрических образцов с различными аксиальными ориентациями.

Полученные данные свидетельствуют о том, что

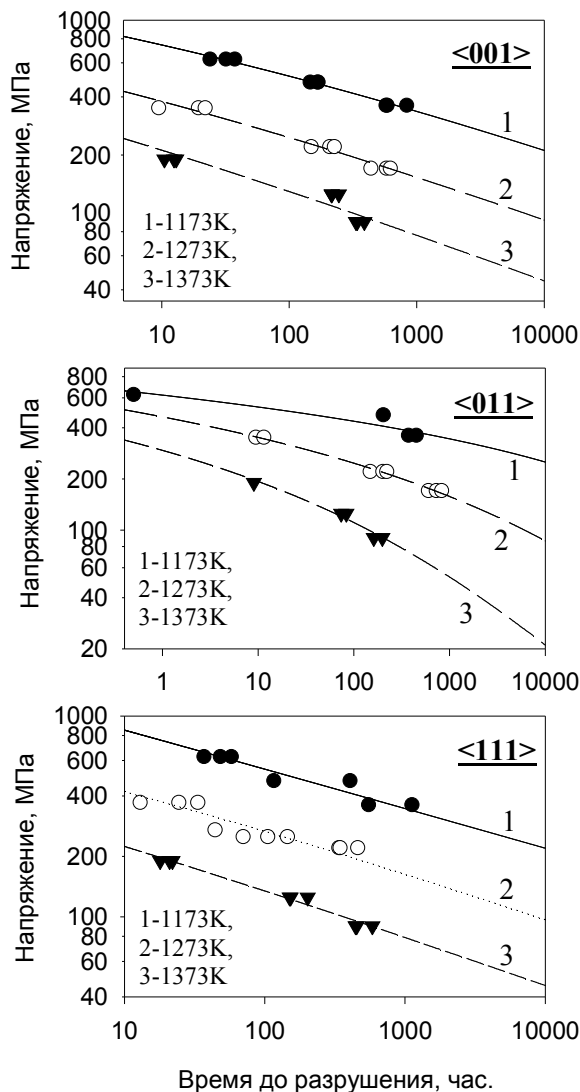


Рис. 1. Сплав ЖС32-моно. ДП в зависимости от аксиальной КГО в интервале температур 1173...1373K

в монокристаллических отливках из сплава ЖС32-моно имеет место значительная аксиальная кристал-

лографическая анизотропия характеристик ДП. Изменение этой анизотропии с долговечностью и температурой показан на графике изменения параметра $K_{\tau}^{<hkl>}$ (рис. 2).

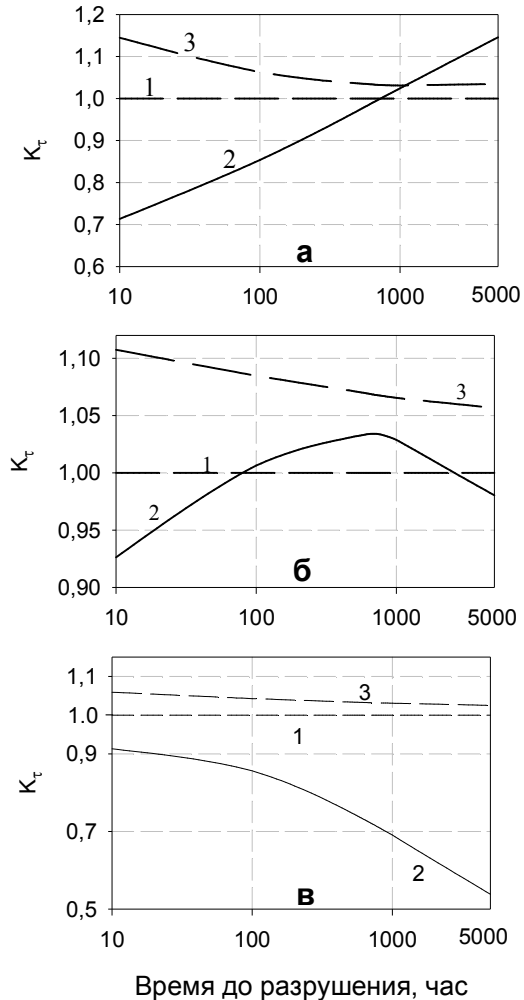


Рис. 2. Сплав ЖС32-моно. Зависимость коэффициента аксиальной анизотропии ДП от долговечности при температурах 1173 (а), 1273 (б) и 1373K (в) (1 - $K^{<001>}$, 2 - $K^{<011>}$, 3 - $K^{<111>}$)

Необходимо отметить, что характер изменения величины $K_{\tau}^{<hkl>}$ для сплава ЖС32-моно в исследованном диапазоне долговечностей является частью общих закономерностей, полученных для сплавов CMSX-4 и ЖС36-моно [7]. Эти закономерности обусловлены различными механизмами и темпом формирования и деградации «рафт-структуры» частиц упрочняющей γ' -фазы [7, 8].

В табл. 2 представлены численные значения коэффициентов уравнения (1) для плоских образцов с аксиальной КГО $\langle 001 \rangle$ и с азимутальной КГО $\langle 011 \rangle$. С использованием этих значений по уравнению (1) рассчитаны кривые ДП плоских образцов с КГО $\langle 001 \rangle + \langle 011 \rangle$ (рис. 3).

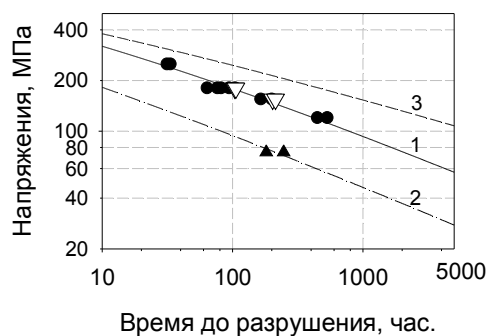


Рис. 3. ЖС32-моно. Кривые ДП.
1, 2 - плоские образцы с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$ и азимутальной ориентацией $\langle 011 \rangle$ (1-1273К, 2-1373К), тёмные точки-результаты испытаний.
3 - цилиндрические образцы с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$ (1273К).
Светлые треугольники -результаты испытаний плоских образцов с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$ и азимутальной ориентацией $\langle 001 \rangle$

На рис. 3 показаны также результаты испытаний при температурах 1273 и 1373 К плоских образцов с КГО $\langle 001 \rangle + \langle 011 \rangle$ и плоских образцов с аксиальной КГО $\langle 001 \rangle$ и азимутальной КГО $\langle 011 \rangle$ (КГО $\langle 001 \rangle + \langle 011 \rangle$). Для сравнения на рис. 3 показана кривая ДП для цилиндрических образцов с аксиальной КГО $\langle 001 \rangle$. Из результатов, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что азимутальная ориентация не оказывает влияния на ДП в интервале температур 1273 – 1373 К. Кроме этого, необходимо отметить, что на ДП в этом интервале температур значительное влияние оказывает масштабный фактор (отношение поверхности к единице объёма рабочей части образца) – ДП плоских образцов снижается на 25 – 40% (в зависимости от долговечности) по сравнению с ДП цилиндрических образцов.

Экспериментальные данные ($T = 273$ К), полученные при оценке СРТУ (малоцикловое нагруже-

ние – отнулевой цикл) на СТ-образцах в зависимости от аксиальной КГО показало [9], что наименьшие значения скорости развития трещины dl/dN имеют образцы с аксиальной ориентацией $\langle 111 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$ до значений $\Delta K \sim 160 \text{ MPa}\sqrt{m}$, а при увеличении величины ΔK ($\Delta K > 160 \text{ MPa}\sqrt{m}$) скорости для ориентаций $\langle 111 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ сближаются.

Азимутальная КГО в отличие от ДП (рис. 4) оказывает заметное влияние на СРТУ.

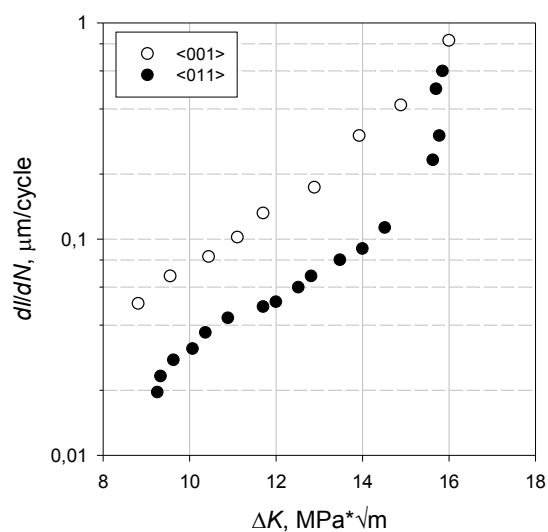


Рис. 4. Сплав ЖС6Ф-моно
Зависимость СРТУ от азимутальной КГО

Так при одинаковой продольной ориентации $\langle 001 \rangle$ изменение азимутальной ориентации с $\langle 011 \rangle$ на $\langle 001 \rangle$ приводит к существенному увеличению скорости роста трещины dl/dN .

Заключение

В результате анализа экспериментальных данных установлена значительная аксиальная кристаллографическая анизотропия характеристик упругости, КрП и ДП монокристаллов сплава ЖС32-моно. Необходимо отметить, что уровень, характер и закономерности изменения этой анизотропии не являются величинами постоянными, а изменяются с температурой и долговечностью.

Установлено, что в диапазоне температур 1273 – 1373 К на уровень ДП монокристаллов сплава

ЖС32-моно оказывает значимое влияние масштабный фактор.

Показано, что в диапазоне температур 1273 – 1373 К азимутальная кристаллографическая ориентация не оказывает влияния на ДП монокристаллов сплава ЖС32-моно с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$. Однако, при этом следует отметить, азимутальная кристаллографическая ориентация значимо влияет на характеристики циклической трещиностойкости (СРТУ) сплава ЖС6Ф.

Представляется необходимым проведение изучения влияния азимутальной кристаллографической ориентации на циклические характеристики (малоцикловую и многоцикловую усталость, термическую усталость и скорость развития трещины усталости) монокристаллов сплавов семейства ЖС, которые используются для применения в современных и перспективных авиационных ГТД.

Литература

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. ГОСТ Р 1497 «Металлы. Метод испытаний на растяжение», ГОСТ Р 9651 «Металлы. Метод испытаний на растяжение при повышенных температурах».
3. ГОСТ Р 10145 «Металлы. Метод испытаний на длительную прочность».
4. Дроздовский Б.А., Епишин А.И., Светлов И.Л. и др. Исследование циклической трещиностойкости монокристалльных образцов никелевого сплава // Проблемы разрушения металлов и фрактография. – М.: ДНТП «Знание», 1989. – С. 43 – 50.
5. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 464 с.
6. Голубовский Е.Р., Толораия В.Н., Хвацкий К.К., Светлов И.Л. и др. // К вопросу о влиянии кристаллографической ориентации на длительную прочность и ползучесть никелевого сплава. Сообщение 1 // Проблемы прочности. – 1987. – № 9. – С. 11 – 17.
7. Голубовский Е.Р. Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Проблемы прочности. – 2002. – № 2. – С. 5 – 19.
8. Epishin A., Kablov E., Golubovskiy E., Svetlov I., Link T., Brückner U., Portella P. Rupture life time prediction and deformation mechanisms during creep of single-crystal nickel-base superalloys // Creep in Structures. Proc. of the IUTAM Symposium held in Nagoya, Japan, 3 – 7 April 2000. – Kluwer academic publishers: Dordrecht/Boston/London. – 2000. – P. 231 – 240.
9. Голубовский Е.Р., Епишин А.И., Светлов И.Л. Анизотропия характеристик статической и циклической прочности монокристаллов литого никелевого жаропрочного сплава // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 143 – 147.

Поступила в редакцию 1.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Мамонов, Российский государственный технический университет «МАТИ им. К.Э. Циолковского», Москва.