

УДК 669.14.018.44:539.4

Е.Р. Голубовский¹, Н.Г. Бычков¹, А.Ш. Хамидуллин¹, О.А. Базылева²¹ФГУП ЦИАМ им.П.И. Баранова, Россия²ФГУП ВИАМ, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni₃Al ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТАЛЕЙ АГТД*

Представлены результаты экспериментального исследования термической усталости монокристаллов сплава ВКНА-1В на основе интерметаллида Ni₃Al в условиях термоциклов 100↔850 °С, 100↔1050 °С и 100↔1100 °С с контролируемым напряжением в цикле. На основании результатов испытаний цилиндрических монокристаллических образцов с аксиальными кристаллографическими ориентациями <001>, <011> и <111> получены расчетно-экспериментальные зависимости числа циклов до разрушения от размаха термических напряжений в цикле для каждой исследованной кристаллографической ориентации. Установлено, что на базе N = 10³ термоциклов с максимальной температурой цикла 850 и 1050 °С наибольшим сопротивлением термической усталости обладает аксиальная кристаллографическая ориентация <111>, а при 1100 °С на этой базе монокристаллы всех трех ориентаций практически одинаково сопротивляются термической усталости. На базе N = 10⁴ термоциклов при максимальной температуре цикла 850 °С наибольшее сопротивление имеет ориентация <111>, а при температурах 1050 °С и 1100 °С – ориентация <011>.

Ключевые слова: Термическая усталость, монокристаллы, сплав на основе интерметаллида Ni₃Al, кристаллографическая ориентация, термоцикл.

Введение

Одним из перспективных направлений развития никелевых жаропрочных сплавов для литья монокристаллических лопаток и иных деталей высокотемпературных турбин, как отмечается в работах ВИАМ, является разработка сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al – сплавов семейства ВКНА [1,2] с ГЦК-решеткой. Интерметаллидные сплавы обладают меньшей плотностью ($\rho \leq 8000$ кг/м³), более высокой жаростойкостью и жаропрочностью при температурах T ≥ 1000 °С, чем никелевые жаропрочные литейные сплавы семейства ЖС (γ - γ').

Результаты исследований монокристаллов никелевых сплавов свидетельствует о значительной зависимости характеристик упругости и конструкционной прочности от кристаллографической ориентации (КГО). При этом характер этой зависимости не монотонный и может изменяться с температурой и долговечностью [3-5]. Наименее изученными в этом отношении являются характеристики термической усталости, которые в значительной степени зависят от модуля нормальной упругости E^{<hkl>} в кристаллографическом направлении <hkl>. Действительно, уровень термических напряжений при заданной дефор-

мации может определяться соотношением $\sigma_{\text{терм.}} \sim \alpha * E * \Delta T$ (где α – коэффициент термического растяжения – КТР). Однако известные результаты исследования термической усталости не дают однозначного ответа по преимуществу КГО. Так, например, результаты исследования механической и термической усталости монокристаллов сплава ЖС6Ф [3,4] свидетельствуют о том, что сопротивление термической усталости монокристаллов с аксиальной КГО <111> занимает промежуточное значение между КГО <001> и КГО <011>; при этом значения модуля E^{<111>} более чем в два раза превышают модуль E^{<001>} и в 1.3 раза модуль E^{<011>} (необходимо отметить, что для сплавов с ГЦК-решеткой, КТР – изотропен).

В этой связи в настоящей работе была поставлена задача исследования термической усталости монокристаллов интерметаллидного сплава ВКНА-1В в диапазоне температур рабочих лопаток ТВД.

1. Материал, образцы и методика испытаний

В качестве объектов исследования использованы цилиндрические образцы из монокристаллических литых заготовок (~Ø16 мм, L ~200 мм) сплава ВКНА-1В [1,2]. Монокристаллические об-

разцы имели следующие размеры – общая длина образца $L_{обр.} = 70$ мм, диаметр и длина рабочей части соответственно $d = 5$ мм и $l = 36$ мм. Было изготовлено три партии образцов (по 30 шт. в каждой партии). Одна партия образцов имела аксиальную КГО - $\langle 001 \rangle$, вторая партия - $\langle 011 \rangle$ и третья партия - $\langle 111 \rangle$. Отклонение оси образца от указанных КГО не превышало 10° . Значения модулей нормальной упругости для КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ представлены в табл. 1.

Таблица 1
Значения модуля нормальной упругости $E^{<hkl>}$ для КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ в зависимости от температуры T (по данным ВИАМ)

T, °C	Средние значения модуля E для КГО, ГПа		
	$\langle 001 \rangle$	$\langle 011 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
20	126	221	303
800	90	174,5	228,75
900	78,5	157,5	207
1000	70,75	145,5	184,25

Испытания образцов на малоцикловую термоусталость были проведены в соответствии с требованиями стандартов [7-9] по методике Коффина, которая реализована на установках ЦИАМ (тип-П651), показанных на рис. 1. Испытания на термоусталость проводились при «мягком» нагружении (при контролируемом напряжении в цикле) на трех установках с различной толщиной мембран (8...60 мм).

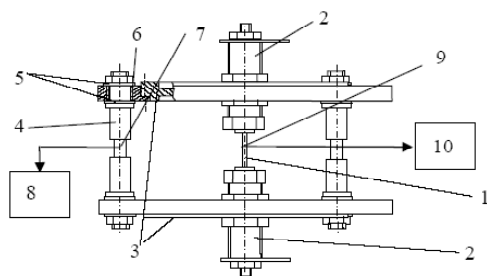


Рис. 1. Схема установки П-651 для испытаний на термоусталость (1 – образец, 2 – захваты, 3 – мембраны изменяемой жесткости, 4 – динамометрические стойки, 5 и 6 – электроизолирующие шайбы и втулки соответственно, 7 и 8 – тензодатчик и регистрирующий прибор соответственно, 9 и 10 – термопара и регистрирующий прибор соответственно)

Образец 1 закреплялся в захватах 2 испытательной машины. Сами захваты жестко крепятся к мембранам 3 изменяемой жесткости. Мембраны связаны между собой динамометрическими стойками 4, изолированными от мембран текстолитовыми шайбами 5 и втулками 6. Показания тензодатчиков 7 динамометров передаются на регистрирующий прибор.

Нагрев образцов осуществлялся прямым пропусканием электрического тока плотностью $J < 30$ А/мм². Испытания образцов проводились по стандартной методике при пилообразном цикле изменения температуры без выдержки на T_{min} и T_{max} (рис. 2).

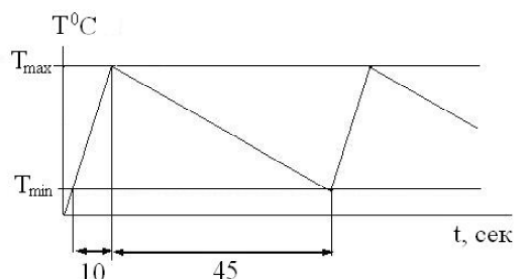


Рис. 2. Изменение температуры в цикле в процессе испытаний

Средняя скорость нагрева образцов $dT/dt \approx 80$ °C/сек. Управление термоциклом осуществлялось с помощью термопары 9 (рис. 1), приваренной к образцу вблизи зоны с максимальной температурой.

Контроль за величиной температуры в зоне T_{max} осуществляется оптическим пирометром фирмы «Mikron» S-770.

Режим термоциклирования отлаживался на технологическом образце (один образец от каждой партии на каждом температурном режиме) при свободном штоке верхнего захвата. После отладки температурного режима шток верхнего захвата закреплялся при достижении температурой на образце среднего значения равного $T_{ср.} = 0,5(T_{max} + T_{min})$. Заданный режим изменения нагрузки (напряжений) достигался через 9-10 термоциклов.

Испытания образцов из сплава ВКНА-1В с аксиальными КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ проводились по температурным режимам $100 \leftrightarrow 850$ °C, $100 \leftrightarrow 1050$ °C и $100 \leftrightarrow 1100$ °C. На каждом температурном режиме испытания проводились для 3-х уровней размаха напряжений в термоцикле по 3 образца для каждого уровня.

Цилиндрические монокристаллические образцы из сплава ВКНА-1В с КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ были испытаны по режимам, представленным в табл. 2. В условиях каждого режима было испытано по три образца с соответствующей аксиальной КГО.

Для построения кривой термоусталости, при заданной аксиальной КГО в условиях одного температурного режима, использовались результаты испытаний 10 образцов (1 технологический + 9 зачетных).

Испытания проводились до момента разрушения (обрыва) образца.

Таблица 2

Режимы испытаний монокристаллических образцов из сплава ВКНА-1В на термоусталость при границах термоцикла 100↔850 °С, 100↔1050 °С и 100↔1100 °С (значения T_{max} , размах напряжений в термоцикле $\Delta\sigma_{терм}$, максимальные растягивающие и сжимающие напряжения в термоцикле соответственно $\sigma_{раст.}$ и $\sigma_{сж.}$)

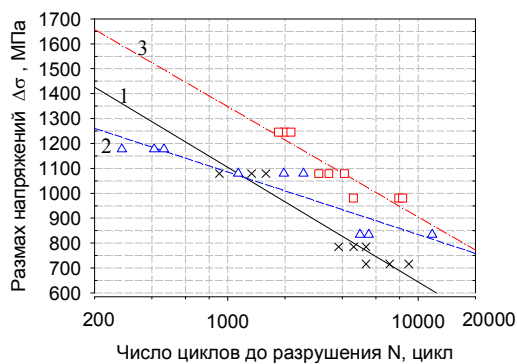
$T_{max},$ °С	КГО, <hkl>	$\Delta\sigma_{терм},$ МПа	$\sigma_{раст.},$ МПа	$\sigma_{сж.},$ МПа
850	<001>	1079	549	530
		785	392	392
		716	373	343
	<011>	1177,2	451,3	784,8
		1079,1	431,6	647,5
		833,9	412,0	421,8
	<111>	1245,9	686,7	559,2
		1079,1	549,4	529,7
		981,0	510,1	470,9
1050	<001>	892,7	441,5	451,3
		588,6	353,2	235,4
		490,5	363,0	127,5
	<011>	833,9	412,0	421,8
		735,8	412,0	323,7
		686,7	343,4	343,4
	<111>	1373,4	882,9	490,5
		981,0	706,3	274,7
		833,9	490,5	343,4
1100	<001>	784,8	382,6	402,2
		637,7	382,6	255,1
		539,6	313,9	225,6
	<011>	784,8	412,0	421,8
		686,7	343,4	343,4
		637,7	294,3	343,4
	<111>	882,9	313,9	569,0
		686,7	343,4	343,4
		588,6	313,9	274,7

2. Полученные результаты и их обсуждение

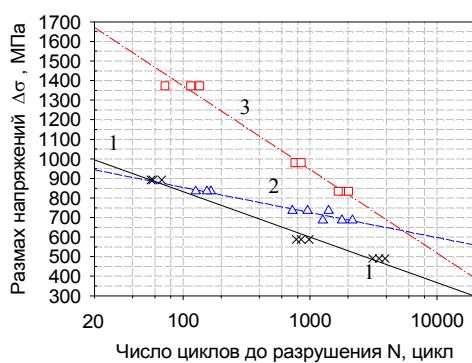
Результаты испытаний каждого образца приведены на рис. 3. Полученные экспериментальные данные были обработаны методом наименьших квадратов по степенной и экспоненциальной зависимостям числа циклов до разрушения N от размаха напряжений в цикле $\Delta\sigma$:

$$N^{<hkl>} = A * (\Delta\sigma^{<hkl>})^{-n} \tag{1}$$

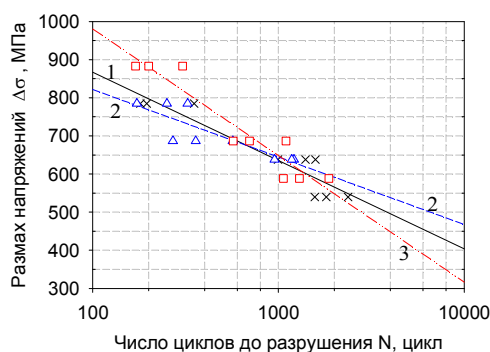
$$N^{<hkl>} = B * \exp(-\beta * \Delta\sigma^{<hkl>}) \tag{2}$$



а



б



в

Рис. 3. Термоциклическая долговечность монокристаллов сплава ВКНА-1В в зависимости от кристаллографической ориентации: а – 100↔850 °С, б – 100↔1050 °С, в – 100↔1100 °С.

Кривые, рассчитанные по уравнению (2) с коэффициентами (табл. 2): 1 – <001>, 2 – <011>, 3 – <111>. (X-<001>, Δ-<011>, □ -<111> – результаты испытаний образцов)

Результаты обработки экспериментальных данных показали, что для всех рассмотренных КГО более высокие значения коэффициента корреляции имеет зависимость (2). Поэтому кривые термоциклической долговечности были построены

ны по уравнению (2) с численными значениями коэффициентов B и β , представленными в табл.3. Кривые термической усталости представлены на рис. 3.

Таблица 3

Численные значения коэффициентов уравнения (2), полученные по результатам испытаний на термическую усталость монокристаллических образцов из сплава ВКНА-1В с аксиальными КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$

Термоцикл	T_{max} , °C	КГО, $\langle hkl \rangle$	$\lg B$	β
100 ↔ 850 °C	850	$\langle 001 \rangle$	5,40	0,005
		$\langle 011 \rangle$	7,33	0,009
		$\langle 111 \rangle$	6,05	0,005
100 ↔ 1050 °C	1050	$\langle 001 \rangle$	5,58	0,010
		$\langle 011 \rangle$	8,67	0,018
		$\langle 111 \rangle$	5,21	0,005
100 ↔ 1100 °C	1100	$\langle 001 \rangle$	5,74	0,010
		$\langle 011 \rangle$	6,65	0,013
		$\langle 111 \rangle$	4,95	0,007

Анализ кривых и результатов испытаний образцов (рис. 3) свидетельствует об удовлетворительном соответствии расчета и эксперимента.

Заключение

Характер кривых термической усталости, полученных при различных значениях максимальной температуры термоцикла, позволяет утверждать о неоднозначной зависимости сопротивления термической усталости как от КГО, так и от числа циклов до разрушения N . Так, на базе $N = 10^3$ термоциклов с максимальной температурой цикла 850 °C и 1050 °C наибольшим сопротивлением термической усталости обладают монокристаллы сплава ВКНА-1В с аксиальной кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$, а при 1100 °C на этой базе монокристаллы всех трех ориентаций практически одинаково сопротивляются термической усталости. На базе $N=10^4$ термоциклов при максимальной температуре цикла 850 °C наибольшее сопротивление имеет ориентация $\langle 111 \rangle$, а при температурах 1050 °C и 1100 °C – ориентация $\langle 011 \rangle$. Сопротивление термической усталости образцов с аксиальной КГО $\langle 011 \rangle$ занимает промежуточное значений для циклической долговечности на базе 10^3 - 10^4 циклов. Полученные результаты свидетельствуют также об отсутствии явной зависимости сопротивления термической усталости от модуля нормальной упругости $E^{\langle hkl \rangle}$.

Перечень ссылок

1. Каблов Е.Н. Жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al . / Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Герасимов В.В., Тимофеева О.Б. -Тр. межд. научно-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение», 25-26 апреля 2006.- М.: ВИАМ, 2006.- С.71-75.

2. Каблов Е.Н. Новая основа для создания литейных высокотемпературных жаропрочных сплавов / Каблов Е.Н., Базылева О.А., Воронцов М.А. - *Материаловедение и термическая обработка металлов*, 2006 г., №8.

3. Дульнев Р.А. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава / Р.А.Дульнев, И.Л.Светлов, Н.Г.Бычков, Т.В.Рыбина, Н.Н.Суханов, Т.А.Гордеева, Е.Н.Доброхвалова, А.И.Епишин, А.И.Кривко, М.П.Назарова - *Проблемы прочности* №11, 1988, С. 3-9.

4. Kablov E.N. Anisotropy of low cycle and thermal fatigue of single-crystal as cast nickel-base superalloy GS6F / Kablov E.N., E.R. Golubovskiy, A.I. Epishin, I.L. Svetlov - В кн. «Proceeding of the Fifth International Conference on Low Cycle Fatigue – LCF-5», Berlin, Germany, September 9-11, 2003, изд. DVM, 2004, Berlin, Germany, P.153-158.

5. Голубовский Е.Р. Влияние кристаллографической ориентации на прочностные характеристики монокристаллов никелевого жаропрочного сплава / Голубовский Е.Р., И.Л.Светлов, А.И.Епишин - *Научные труды МАТИ*. Вып. 8(80), 2005, М., РГТУ-МАТИ им. К.Э.Циолковского, С.22-27.

6. Голубовский Е.Р. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов / Голубовский Е.Р. Светлов И.Л. - *Проблемы прочности*, 2002, №2, С. 5-19.

7. ОСТ 10970-80 «Методика испытаний на термоусталость», М., Госстандарт, 1980 г.

8. ГОСТ 25505-85 «Методы испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении», М., Госстандарт, 1985 г.

9. «Машины и установки для испытаний при термомеханическом малоцикловом нагружении», Методические указания для стран – членов СЭВ, М., Госстандарт, 1988 г.

Поступила в редакцию 01.06.2011

Є.Р. Голубовський, Н.Г. Бичков, А.Ш. Хамідулін, О.А. Базилєва. Експериментальна оцінка кристалографічної анізотропії термічної втоми монокристалів сплаву на основі Ni_3Al для високотемпературних деталей АГТД

Представлено результати експериментального дослідження термічної втоми монокристалів сплаву ВКНА-1В на основі інтерметаліда Ni_3Al в умовах термоциклів $100\leftrightarrow 850$ °С, $100\leftrightarrow 1050$ °С і $100\leftrightarrow 1100$ °С з контрольованим напруженням у циклі. Засновуючись на результатах випробувань циліндричних монокристалічних зразків з аксіальними кристалографічними орієнтаціями $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ і $\langle 111 \rangle$ отримано розрахунково-експериментальні залежності кількості циклів до руйнування від розмаху термічної напружень в циклі для кожної досліджуваної кристалографічної орієнтації. Встановлено, що на базі $N = 10^3$ термоциклів з максимальною температурою циклу 850 і 1050 °С найбільший спротив до термічної втоми має аксіальна кристалографічна орієнтація $\langle 111 \rangle$, а при 1100 °С на цій базі монокристали усіх трьох орієнтацій практично однаково опираються термічній втомі. На базі $N = 10^4$ термоциклів при максимальній температурі циклу 850 °С найбільший спротив має орієнтація $\langle 111 \rangle$, а при температурах 1050 °С і 1100 °С – орієнтація $\langle 011 \rangle$.

Ключові слова: Термічна втома, монокристали, сплав на основі інтерметаліда Ni_3Al , кристалографічна орієнтація, термоцикл.

E.R. Golubovskiy, N.G. Bychkov, A.S. Khamidullin, O.A. Bazyleva. Experimental estimation crystallographic anisotropies of thermal fatigue of single-crystals of the alloy on basis Ni_3Al for high-temperature details of aviation gas turbine engines

Results of an experimental research of thermal fatigue of single crystals of alloy ВКНА-1В (on the basis of intermetallic Ni_3Al) in conditions thermo-cycles $100\leftrightarrow 850$ °С, $100\leftrightarrow 1050$ °С and $100\leftrightarrow 1100$ °С with a controlled stress in a cycle. On the basis of results of tests of cylindrical monocrystals samples with axial crystallographic orientations $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ are received its settlement experimental dependences of number of cycles before destruction from scope of thermal stresses in a cycle for everyone investigated crystallographic orientations. It is established, that on baseline $N = 10^3$ thermo-cycles with the maximum temperature of a cycle 850 and 1050 °С the greatest resistance of thermal fatigue has axial crystallographic orientation $\langle 111 \rangle$, and at 1100 °С on this baseline monocrystals of all three orientations practically equally oppose to thermal fatigue. On baseline $N = 10^4$ thermo-cycles at the maximum temperature of a cycle 850 °С orientation $\langle 111 \rangle$ has the greatest resistance, and at temperatures 1050 °С and 1100 °С – orientation $\langle 011 \rangle$.

Key words: Thermal fatigue, single crystals, alloy on the basis of intermetallic Ni_3Al , crystallographic orientation, thermo-cycle.