

УДК 669.018.44:669.245

И.А. Ходинев¹, С.А. Монин¹**АНИЗОТРОПИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-97-105

Исследована малоцикловая усталость (МЦУ) жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой – ВЖМ7 и ВИН3. Испытания проводились в условиях контроля полной деформации в цикле, одноосное растяжение происходило по синусоидальному закону с частотой 0,5 Гц. Для обоих сплавов испытания проведены для трех кристаллографических ориентаций ([001], [011], [111]) при двух температурах: 500 и 850 °С. Построены линии средних значений логарифма долговечности, определены пределы МЦУ на базе 10^4 циклов. Проанализировано влияние температуры испытаний и кристаллографической ориентации на величину разброса результатов испытаний и на пределы МЦУ сплавов.

Ключевые слова: малоцикловая усталость (МЦУ), направленная кристаллизация, кристаллографическая ориентация (КГО), жаропрочный никелевый сплав, механические характеристики, сплавы ВЖМ7 и ВИН3, интерметаллидный сплав, монокристаллический сплав.

I.A. Hodinev¹, S.A. Monin¹**ANISOTROPY OF LOW CYCLE FATIGUE CHARACTERISTICS
OF SINGLE-CRYSTAL HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS**

The low cycle fatigue of heat-resistant nickel alloys with a single crystal structure VZHM7 and VIN3 was studied. The tests were carried out under conditions of monitoring the complete deformation in the cycle, loading of the type «tension-compression» occurred according to a sinusoidal law with a frequency of 0,5 Hz. For both alloys, tests were carried out for three crystallographic orientations ([001], [011], [111]) at two temperatures: 500 and 850 °C. Regression lines were constructed, the limits of limited endurance were found on the basis of 10^4 cycles. The influence of test temperature and crystallographic orientation on the endurance limit of alloys and RMS is analyzed.

Keywords: low cycle fatigue (LCF), directional crystallization, crystallographic orientation (CGO), high-temperature nickel alloy, mechanical characteristics, alloys VZhM7 and VIN3, intermetallic alloy, single-crystal alloy.

¹Федеральное 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

При производстве газотурбинных двигателей (ГТД) традиционно используются жаропрочные никелевые сплавы, показывающие высокие характеристики прочности в эксплуатационных условиях. Повышение температурной работоспособности монокристаллических лопаток турбин высокого давления в современных ГТД связано с разработкой и внедрением в производство жаропрочных никелевых сплавов [1].

Для жаропрочных никелевых сплавов предел малоциклового усталости (МЦУ) в условиях контроля деформации входит в число наиболее значимых механических характеристик [2–5]. Напряженно-деформированное состояние, возникающее при проведении таких испытаний в результате циклического нагружения, часто является близким к тому, что реализуется в процессе эксплуатации реальных изделий. Длительность испытаний на МЦУ составляет порядка 10^3 – 10^5 циклов нагружения. Результатом обработки экспериментальных данных таких испытаний является определение средних значений предела МЦУ и величины разброса экспериментальных значений. В работах отечественных и зарубежных исследователей [6–11] приводятся результаты испытаний на МЦУ жаропрочных никелевых сплавов.

Кристаллографическая ориентация (КГО) существенно влияет на изменение механических свойств (в том числе характеристик циклической прочности) жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом направленной кристаллизации, в связи с этим исследование сопротивления усталостному разрушению образцов с разной КГО представляет научный интерес.

В данной статье проведено исследование МЦУ монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ7 и ВИН3 при «жестком» цикле нагружения. Контролируемым параметром являлась величина деформации рабочей части образца. В работе определены механические характеристики для трех различных кристаллографических ориентаций сплавов ВЖМ7 и ВИН3: [001], [011], [111]. Испытания проведены при двух эксплуатационных температурах: 500 и 850 °С. Цель работы – исследование влияния температурного и ориентационного факторов на характеристики МЦУ монокристаллических жаропрочных сплавов ВЖМ7 и ВИН3.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4, 12].

Материалы и методы

Монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе никеля ВИН3 относится к сплавам, характеризующимся высокой термической стабильностью структурно-фазового состояния, высокими рабочими температурами, возможностью эксплуатации в агрессивных окислительных средах, при этом обладающий низкой плотностью и невысокой стоимостью относительно современных никелевых жаропрочных сплавов с содержанием большого количества тугоплавких элементов. Сплав ВИН3 имеет систему легирования Ni–Al–Cr–Mo–Ta, являющуюся более экономичной, чем у современных жаропрочных сплавов, легированных рением и рутением. Поиск состава интерметаллидного сплава ВИН3 производился с помощью метода компьютерного конструирования, который является быстроразвивающимся методом подбора состава сплавов с заданными характеристиками [13]. При определении состава сплава необходимым условием было достижение определенного уровня статической прочности: предел прочности при температуре 1200 °С должен быть не менее 200–250 МПа, предел длительной прочности при температуре 1200 °С на базе 100 ч – не менее 60–70 МПа (для кристаллографической ориентации [001]). Расчетным путем установлено, что для достижения этих значений суммарная концентрация компонентов Al, Cr, Mo, W и Ta в γ' -фазе должна быть близка к 24%, а предельная суммарная растворимость в γ' -фазе W, Mo и Ta – близка к 6%.

Полученный в результате компьютерного эксперимента сплав удовлетворял заданным требованиям. В отличие от предыдущих паспортизированных сплавов типа ВКНА, из системы легирования сплава ВИН3 исключен титан и снижено содержание

молибдена и хрома, что повысило начальную температуру плавления. Кроме того, для повышения прочности и фазовой стабильности добавили тантал. Монокристаллические заготовки сплава ВИНЗ имеют дендритно-ячеистую структуру, состоящую из никелевого твердого раствора в качестве матричной γ -фазы и интерметаллидного соединения Ni_3Al в качестве γ' -фазы [14, 15]. Соединение Ni_3Al , являющееся основой интерметаллидных сплавов, имеет плотность $7,25 \text{ г/см}^3$ и упорядоченную структуру, что позволяет повысить весовую эффективность [16].

На рис. 1 представлена микроструктура сплава ВИНЗ с КГО [001] – продемонстрирована дендритно-ячеистая структура и образование эвтектической γ' -фазы вокруг ветвей дендритов второго порядка (а, б), образование дисперсной γ' -фазы вблизи выделений эвтектической γ' -фазы (в, г), микропоры вблизи выделений эвтектической γ' -фазы (д, е), дисперсные выделения γ' -фазы в междендритных участках (ж) и осях дендритов первого порядка (з).

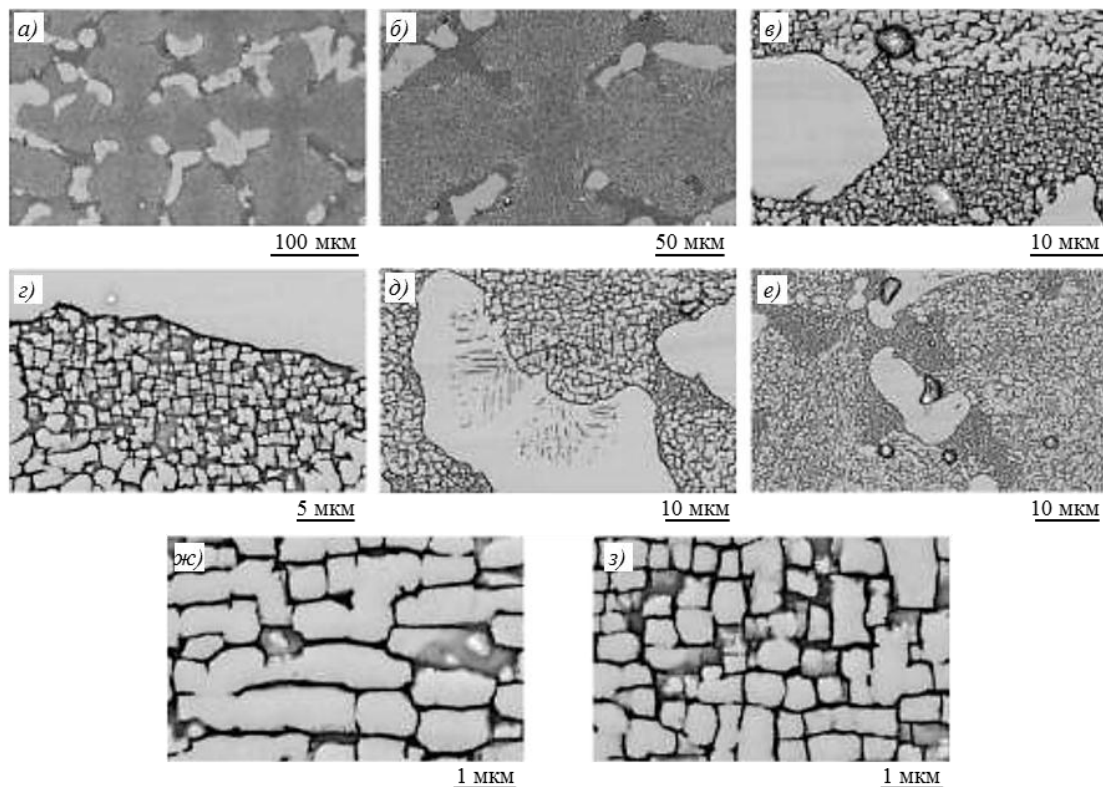


Рис. 1. Микроструктура сплава ВИНЗ с КГО [001]

Жаропрочный никелевый сплав низкой плотности ВЖМ7 с монокристаллической структурой с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности тоже разрабатывался с использованием метода компьютерного моделирования. Для нахождения оптимальной системы легирования использовали следующее условие: суммарное содержание тугоплавких тяжелых металлов (Re, Mo, Ta, W) сведено к минимуму, а содержание легких γ' -образующих металлов (Al, Ti) повышено. Кроме того, из системы легирования исключили Nb, Hf и V. В качестве основных физико-химических характеристик, которые определяли выбор наиболее приоритетных составов разрабатываемого жаропрочного сплава, приняты температура полного растворения γ' -фазы в матричном γ -растворе (солвус γ'), γ/γ' -мисфит (размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз), а также температура плавления неравновесной эвтектики (перитектики) $\gamma+\gamma'$.

Для выплавки жаропрочного сплава ВЖМ7 использовали вакуумную индукционную печь ВИАМ-2002. Выплавку производили по технологии, применяемой для выплавки ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов.

Полученный жаропрочный никелевый сплав ВЖМ7 имел плотность $d=8,371 \text{ г/см}^3$ и, согласно проведенному химическому и газовому анализу, содержал легирующие элементы, % (по массе): 6,2Al, 2,6Re, 4Mo, 3,8Ta, а также Cr, W, Co, Ti, La; примеси, % (по массе): 0,05C, 0,0006S, 0,0009O, 0,0005N. Определили температуры фазовых превращений: полного растворения γ' -фазы – $T_{\text{п.р}}=1290 \text{ }^\circ\text{C}$, плавления неравновесной эвтектики $\gamma+\gamma'$ – $T_{\text{эвт}}=1312 \text{ }^\circ\text{C}$, солидус $T_S=1323 \text{ }^\circ\text{C}$ и ликвидус $T_L=1387 \text{ }^\circ\text{C}$. Выбранный состав монокристаллического жаропрочного сплава низкой плотности можно назвать оптимальным, о чем свидетельствует хорошая сходимость характеристик, полученных расчетным методом, с экспериментальными результатами [14, 17].

На рис. 2 представлена микроструктура сплава ВЖМ7 с КГО [001] после горячего изостатического прессования и термообработки: *а* – размеры, форма, распределение γ' -фазы в матричном γ -растворе; *б* – выделение наночастиц γ' -фазы в прослойках γ -твердого раствора; *в* – частицы γ' -фазы в γ -твердом растворе.

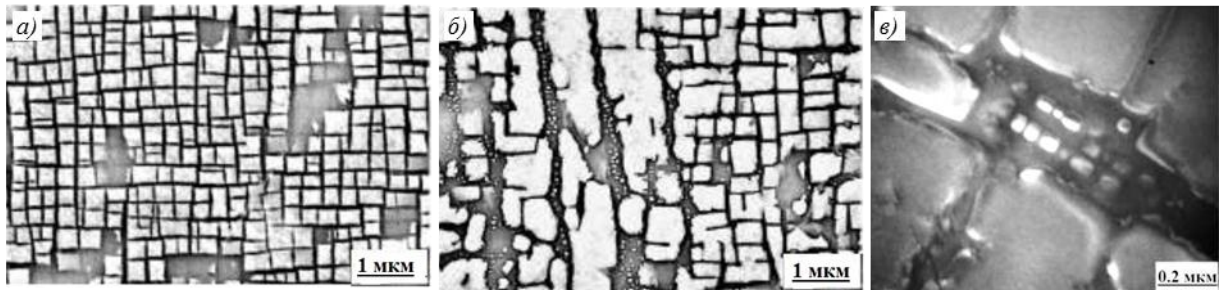


Рис. 2. Микроструктура сплава ВЖМ7 с КГО [001]

На образцах, у которых отсутствуют визуально наблюдаемые большеугловые границы зерен, проводили контроль КГО. Для определения КГО использовали образцы в виде конусов, вырезанные из заготовки сплава с монокристаллической структурой. Плоскость поперечного среза выбирали такой, что определенный угол к продольной оси заготовки образца соответствовал выбранной ориентации. Для определения КГО образцов использовали метод рентгеноструктурного анализа поперечной поверхности конуса, протравленной для выявления дендритной структуры. Рентгеносъемку проводили с использованием дифрактометра и определяли угловое отклонение заданного аксиального кристаллографического угла к продольной оси конуса. Результаты рентгеносъемки регистрировали в виде дифрактограмм отражений от плоскостей [15, 17].

Всего для испытаний на МЦУ сплавов ВИН3 и ВЖМ7 было изготовлено 232 гладких цилиндрических образца (119 образцов из сплава ВИН3, остальные – из сплава ВЖМ7), имеющих длину рабочей части 15 мм и диаметр рабочей части 5 мм (рис. 3).

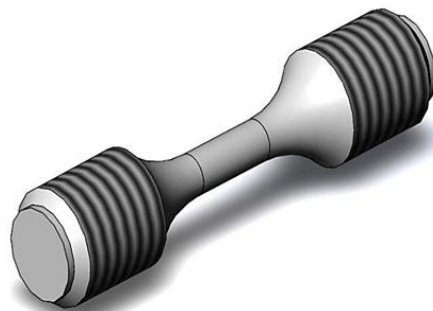


Рис. 3. Образец для испытаний на малоцикловую усталость

При проведении испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения происходит контроль деформации рабочей части образца. Используется схема одноосного растяжения с заданием характеристик нагружения: закон изменения значений деформации, частота, амплитудные значения деформации, коэффициент асимметрии цикла (отношение минимальной деформации в цикле к максимальной).

Для проведения испытаний использовали сервогидравлическое универсальное испытательное оборудование серии LFV-100 фирмы Walter+Bai. Гидравлическое поджатие образцов происходило с применением захватов, изготовленных из жаропрочного никелевого сплава.

Для осуществления контроля полной деформации в цикле использовали высокотемпературный экстензометр с керамическими стержнями. Стержни перед началом испытаний крепятся непосредственно на образец, что позволяет регистрировать изменение длины рабочей части образца на протяжении всего испытания.

Нагрев до эксплуатационной температуры и ее поддержание осуществляли при помощи муфельных печей STE с трехзонным контролем нагрева рабочей камеры. Наличие нескольких зон нагрева положительно влияет на плавность распределения температурного поля. Трехзонная печь имеет определенную конструкцию, позволяющую подводить щупы экстензометра к рабочей части образца при температурных испытаниях [18].

Более подробно ознакомиться с информацией об устройстве оборудования для испытаний на МЦУ можно в посвященных этому оборудованию работах [18, 19].

Для каждой КГО обоих исследуемых сплавов проведено по две серии испытаний – при эксплуатационных температурах 500 и 850 °С. Серия включала испытания партии из 17–21 образца, которые проводились при контроле полной (сумма упругой и пластической) деформации ε в условиях одноосного растяжения с коэффициентом асимметрии $R=0$ и частотой нагружения $f=0,5$ Гц. Нагрузка в цикле изменялась по синусоидальному закону. В качестве задаваемого параметра выбрана амплитуда деформации ε_a , а в качестве критериев завершения испытания – падение напряжения и разрушение образца. Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502–79.

Результаты и обсуждение

После испытаний проведена обработка их результатов. Зависимость числа циклов до завершения испытания от заданной деформации имеет вид

$$N=a \cdot \varepsilon^b, \quad (1)$$

где N – число циклов до разрушения; ε – заданный уровень деформаций; a и b – коэффициенты.

После логарифмирования обеих частей уравнение принимает вид линейной функции:

$$\lg N = \lg a + b \cdot \lg \varepsilon. \quad (2)$$

В результате регрессионного анализа для каждой серии испытаний построена линия средних значений величины $\lg N$, соответствующая пятидесятипроцентной вероятности разрушения (или потери несущей способности) образца. Определены коэффициенты a и b уравнения (2) линии регрессии, среднее квадратическое отклонение (СКО) логарифмов долговечности от линии регрессии и предел МЦУ на базе 10^4 циклов для каждой серии испытаний. Среднее квадратическое отклонение вычисляли как квадратный корень из условной дисперсии [20]. Результаты испытаний приведены в таблице и представлены на рис. 4. Незакрашенными фигурами на рисунках обозначены образцы, прошедшие базу испытаний и снятые с испытаний до разрушения. Эти образцы не учитывались при

построении линии регрессии, т. е. выборки были цензурированы на графиках справа. Предполагалось, что случайная величина $\lg N$ распределена по нормальному закону.

Характеристики малоциклового усталости (МЦУ) образцов жаропрочных никелевых сплавов с различной кристаллографической ориентацией (КГО)

Сплав	КГО	Температура испытания, °С	Количество образцов для испытаний	Коэффициенты линии регрессии		Предел МЦУ: ϵ_a , % (на базе $N=10^4$ цикл)	СКО*
				a	b		
ВЖМ7	[001]	850	21	2,72	-5,09	0,56	0,330
	[011]		17	1,45	-5,42	0,34	0,280
	[111]		20	2,38	-3,29	0,32	0,372
	[001]	500	18	1,85	-10,16	0,61	0,545
	[011]		19	-1,18	-12,32	0,38	0,447
	[111]		18	-0,05	-7,84	0,30	0,681
ВИНЗ	[001]	850	20	2,28	-4,42	0,41	0,298
	[011]		20	0,15	-5,88	0,22	0,294
	[111]		20	0,3	-4,41	0,15	0,235
	[001]	500	21	1,67	-8,34	0,53	0,310
	[011]		19	-1,01	-10,82	0,34	0,367
	[111]		19	-0,06	-6,59	0,24	0,378

* Среднее квадратическое отклонение.

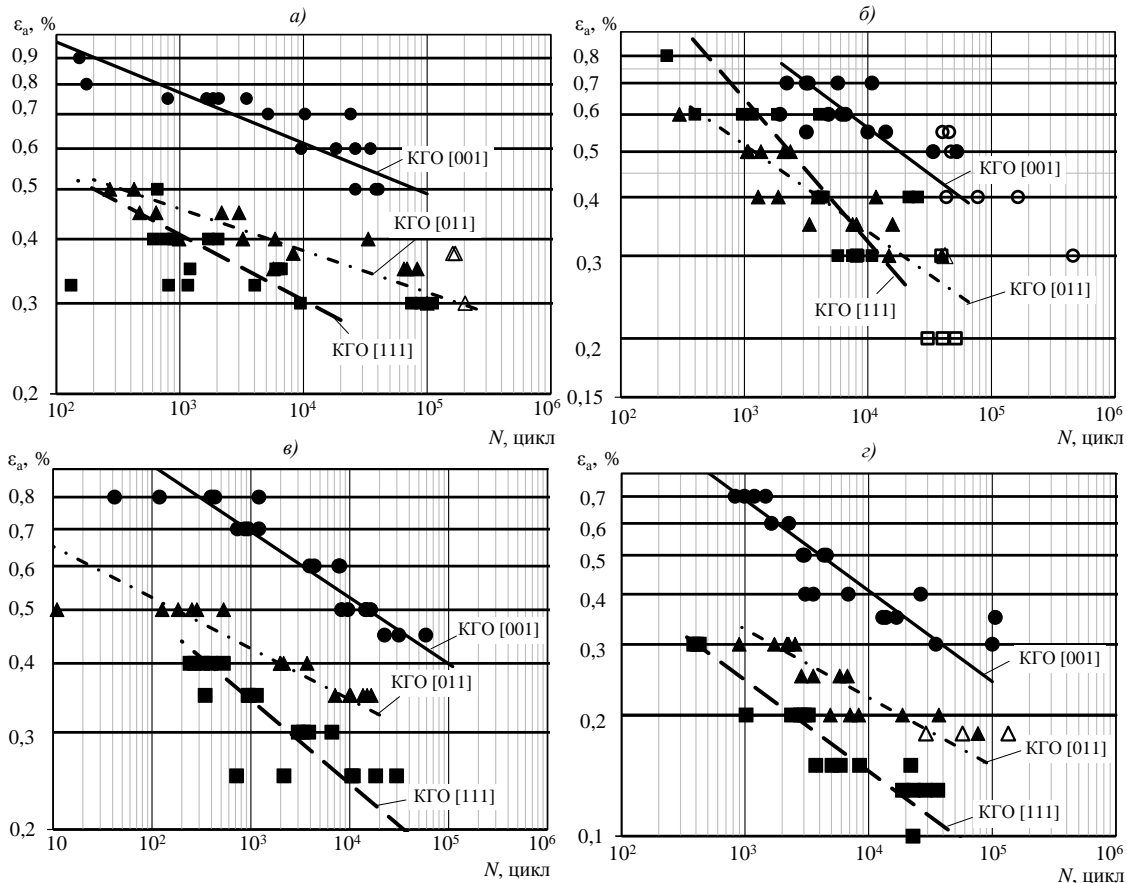


Рис. 4. Кривые усталости для сплавов ВЖМ7 (а, б) и ВИНЗ (в, з) с различной кристаллографической ориентацией (КГО) при температуре испытания 500 (а, в) и 850 °С (б, з)

При анализе влияния температуры испытания на характеристики МЦУ обнаружено, что повышение температуры испытаний с 500 до 850 °С для сплава ВЖМ7 привело к снижению пределов МЦУ на 8% – для КГО [001] и на 12% – для КГО [011],

к повышению предела МЦУ на 7% – для КГО [111]. Для сплава ВИНЗ повышение температуры испытаний с 500 до 850 °С привело к снижению пределов МЦУ на 23% – для КГО [001], на 35% – для КГО [011] и на 37% – для КГО [111]. Анализ СКО показал, что для обоих сплавов температурный уровень 500 °С характеризуется большим разбросом значений относительно среднего, чем температурный уровень 850 °С, и это утверждение справедливо для каждой пары серий испытаний одной и той же КГО одного и того же сплава. Среднее квадратическое отклонение десятичного логарифма количества циклов при температуре 850 °С для сплава ВЖМ7 в среднем меньше на 40%, чем при температуре 500 °С, а для сплава ВИНЗ – при 850 °С СКО в среднем меньше на 20%, чем при 500 °С.

Анализируя зависимость предела МЦУ жаропрочных сплавов от КГО, следует отметить, что наибольшей устойчивостью к малоциклового деформированию обладают сплавы с КГО [001]. Пределы МЦУ сплава ВЖМ7 с КГО [001] значительно превышает пределы МЦУ этого сплава с другими ориентациями – в 1,6–2 раза при температуре 500 °С и в 1,7–1,8 раза при температуре 850 °С. Пределы МЦУ сплава ВИНЗ с КГО [001] значительно превышают пределы МЦУ этого сплава с другими ориентациями: в 1,6–2,2 раза при температуре 500 °С и в 1,9–2,7 раза при температуре 850 °С. Для сплавов ВЖМ7 и ВИНЗ при обоих температурных уровнях наименьшие значения предела МЦУ демонстрируют образцы от равноосной КГО. У сплава ВЖМ7 с КГО [111] предел МЦУ меньше на 3–25%, чем у этого сплава с КГО [011]. У сплава ВИНЗ с КГО [111] предел МЦУ меньше на 42–47%, чем у этого сплава с КГО [011]. Анализ значений СКО показывает, что в данной работе невозможно проследить какую-либо зависимость (связь) между кристаллографической ориентацией сплава и величиной разброса результатов испытаний. Визуализация сопоставления пределов МЦУ для исследуемых сплавов, кристаллографических ориентаций и температур испытаний представлена на рис. 5.

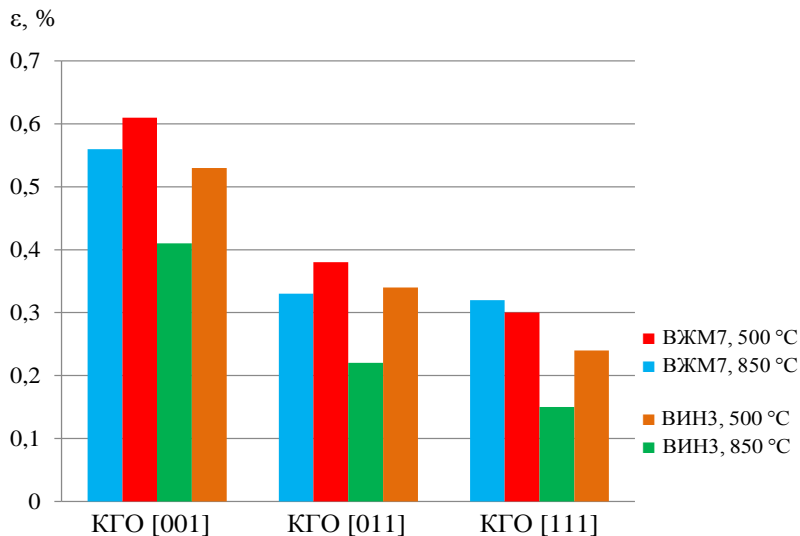


Рис. 5. Сопоставление пределов малоциклового усталости жаропрочных сплавов ВЖМ7 и ВИНЗ с разной кристаллографической ориентацией при температурах испытания 500 и 850 °С

Следует также отметить, что линии средних значений для сплавов ВЖМ7 и ВИНЗ с КГО [011] при обоих исследуемых температурных уровнях имеют наименьший угол наклона к оси циклов. Это означает, что при исследовании больших баз, чем $N=10^4$ циклов, для рассматриваемых выборок значение предела МЦУ для исследуемых в данной работе сплавов с КГО [011] будет приближаться к значению предела МЦУ этих же сплавов с КГО [001].

Заключения

Для сплавов ВЖМ7 и ВИН3 при обоих исследуемых температурных уровнях (500 и 850 °С) наибольшим пределом МЦУ характеризуется КГО [001], а наименьшим – КГО [111]. Для сплава ВЖМ7 с КГО [001] предел МЦУ на базе 10^4 циклов при температуре испытания 500 °С – $\varepsilon_a=0,61\%$, при температуре испытания 850 °С – $\varepsilon_a=0,56\%$. Для сплава ВЖМ3 с КГО [001] предел ограниченной выносливости при температуре испытания 500 °С – $\varepsilon_a=0,53\%$; при температуре испытания 850 °С – $\varepsilon_a=0,41\%$.

Характеристики МЦУ для сплава ВИН3 менее устойчивы к изменению температуры испытания, чем характеристики МЦУ для сплава ВЖМ7. Повышение температуры испытания с 500 до 850 °С вызывает снижение предела МЦУ сплава ВИН3 на базе 10^4 циклов на 23; 35 и 37% для КГО [001], [011] и [111] соответственно. Повышение температуры испытания для сплава ВЖМ7 с 500 до 850 °С вызывает снижение предела МЦУ на базе 10^4 циклов на 8% – для КГО [001], на 12% – для КГО [011], повышение предела МЦУ на 7% – для КГО [111].

Для сплавов ВИН3 и ВЖМ7 с КГО [001], [011], [111] температурный уровень испытаний 500 °С характеризуется значительно (в 1,3–1,7 раза) бóльшим значением величины СКО для полученных экспериментальных данных логарифма долговечности $\lg N$, чем при уровне температуры 850 °С.

Библиографический список

1. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
2. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин // *Тяжелое машиностроение*. 2011. №4. С. 30–33.
3. Горбовец М.А., Базылева О.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Малоцикловая усталость монокристаллического интерметаллидного сплава типа ВКНА в условиях «жесткого» нагружения // *Металлург*. 2014. №8. С. 111–114.
4. 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Reed R.C. *The superalloys: Fundamentals and applications*. Cambridge University Press, 2006. 372 p.
6. Беляев М.С., Горбовец М.А., Шведов В.А. Влияние условий испытаний на малоцикловую усталость и параметры циклического деформирования жаропрочного сплава ВЖ175 // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн*. 2017. №5–6 (28). С. 74–82. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 01.07.2020).
7. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Антонова О.С. Малоцикловая усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 в условиях жесткого нагружения // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. №9. С. 17–24.
8. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. №8. С. 41–48.
9. Wright J.K., Carroll L.J., Simpson J.A. et al. Low cycle fatigue of alloy 617 at 850 °C and 950 °C // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2013. Vol. 135. No. 7. P. 031005 (1–8).
10. Zhong Z., Gu Y., Yuan Y. et al. On the low cycle fatigue behaviour of a Ni-based superalloy containing high Co and Ti contents // *Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. A552. P. 434–443.
11. Gao G., Duan S., Zhang W. A study of high temperature low cycle fatigue life prediction for two superalloys // *Journal of Engineering Research*. 2015. Vol. 3. No. 1. P. 114–126.

12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
13. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Туренко Е.Ю. Интегрированная информационная система для хранения данных по свойствам жаропрочных никелевых сплавов и расчета их механических характеристик // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-86-94.
14. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
16. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
17. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
18. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №9 (69). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
19. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П. и др. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований. М.: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2011. 164 с.
20. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.