

УДК 620.178.35:669.018.44

М.А. Горбовец¹, И.А. Ходинев¹, В.А. Каранов¹, В.Д. Юшин¹

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАГРУЖЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104

Как известно, в отечественной и мировой практике исторически сложилось так, что при исследованиях и паспортизации сплавов испытания на многоцикловую усталость проводили по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением». В настоящее время большинство исследователей во всем мире отдает предпочтение испытаниям на многоцикловую усталость по схеме нагружения «растяжение–сжатие».

Данная работа посвящена оценке влияния вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У, ЭИ698 и жаропрочного титанового сплава VT8M-1.

Ключевые слова: титановые сплавы, никелевые сплавы, многоцикловая усталость, растяжение–сжатие, изгиб с вращением, пределы выносливости.

М.А. Gorbovets¹, I.A. Khodinev¹, V.A. Karanov¹, V.D. Yushin¹

INFLUENCE OF THE TYPE OF LOADING ON HIGH-CYCLE FATIGUE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS

As is known, in domestic and world practice it has historically developed that in research and certification of alloys, high-cycle fatigue tests are carried out according to the «pure bending with rotation» loading conditions. Nowadays most scientist around the world give preference to high-cycle fatigue tests according to the «tension–compression» loading conditions.

This article is about to assess the influence of the type of loading on high-cycle fatigue of nickel heat-resistant alloys GS6U, EI698 and heat-resistant titanium alloy VT8M-1.

Keywords: titanium alloys, nickel alloys, high-cycle fatigue, tension-compression, pure bending with rotation, fatigue limits.

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

Во всем мире в течение достаточно длительного времени наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли жаропрочных титановых и никелевых сплавов в конструкциях авиационной техники всех типов и назначений [1–3].

Благодаря сочетанию технологических и эксплуатационных характеристик жаропрочные титановые и никелевые сплавы нашли широкое применение при изготовлении деталей авиационных газотурбинных двигателей [4]. Известно, что надежность и ресурс ГТД определяются в основном элементами «горячей» части (рабочими и сопловыми лопатками, дисками турбин), которые испытывают статические, циклические, повторно-статические нагрузки, а также подвержены негативному влиянию процессов

газовой коррозии [5]. Для расчета ресурса газотурбинного двигателя необходимо для каждого материала иметь набор характеристик прочности, в том числе и характеристики многоциклового усталости (МнЦУ) [6, 7].

ФГУП «ВИАМ» является лидером по разработке и внедрению широкого перечня жаропрочных сплавов – накоплена большая база данных по испытаниям различных жаропрочных сплавов на МнЦУ. Ввиду технической простоты такие испытания проводятся по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением».

Исследуемые схемы нагружения (одноосное «растяжение–сжатие» и «чистый изгиб с вращением») подразумевают различные напряженно-деформируемые состояния. Так, при схеме нагружения «чистый изгиб с вращением» концентрация максимальных напряжений находится на поверхностной части поперечного сечения рабочей части образца, а при схеме нагружения «растяжение–сжатие» максимальные напряжения распределены равномерно по всей площади поперечного сечения образца. Считается, что при испытаниях по схеме нагружения «растяжение–сжатие» материал находится в наиболее напряженных условиях, что в большей степени позволяет оценить способность материала к сопротивлению МнЦУ. Поэтому в настоящее время мировые стандарты требуют использовать в расчетах результаты испытаний по схеме нагружения «растяжение–сжатие» [8].

Для того чтобы накопленная в отечественной практике база данных испытаний на МнЦУ, полученная при испытаниях по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением», имела практическое применение в современных методах оценки способности материала к сопротивлению МнЦУ, необходима комплексная оценка влияния вида нагружения на МнЦУ различных жаропрочных сплавов. Для решения этой задачи проведены сравнительные испытания на МнЦУ трех различных типов сплавов, применяемых в конструкциях современных ГТД, как в условиях одноосного «растяжения–сжатия», так и в условиях «чистого изгиба с вращением».

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») [9].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны широко известные и применяемые в конструкциях современных ГТД жаропрочные никелевые сплавы ЖС6У, ЭИ698 и жаропрочный титановый сплав ВТ8М-1.

Сплав ЖС6У применяется для изготовления рабочих лопаток турбин ГТД, работающих при температурах до 1050°C, и относится к группе литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе [10–13]. Сплав ЭИ698 применяется для дисков турбин и компрессора, а также других деталей ГТД, работающих при температурах до 750°C, относится к группе деформируемых жаропрочных сплавов на никелевой основе. Сплав ВТ8М-1 предназначен для изготовления лопаток компрессора, крепежа и других деталей, работающих в общеклиматических условиях длительно до температуры 400°C и до 1000 ч при температуре 450°C, относится к группе деформируемых жаропрочных сплавов на титановой основе [14, 15].

Испытания на МнЦУ проведены в соответствии с ГОСТ 25.502–79 и стандартом ФГУП «ВИАМ» СТП 1.595-17-347–2000 «Метод испытания на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов для ГТД».

Испытания на МнЦУ по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением» проводили на односекционных испытательных машинах МВИ611-М (рис. 1, а). Машина МВИ611-М по принципу испытаний относится к типу усталостных машин, осуществ-

ляющих постоянно заданной программы испытаний в течение всего времени испытания. При этом изменение напряжений в испытываемом образце происходит по симметричному циклу. По способу и характеру возбуждения сил, деформирующих образец, машина относится к типу испытательных машин с рычажной системой нагружения при соотношении плеч рычага 1:14,4. Испытываемый образец, закрепленный в шпиндельных бабках, нагружается и при вращении реализуется схема нагружения «чистый изгиб с вращением».

Для испытаний на МнЦУ по схеме нагружения «растяжение–сжатие» использовали универсальную сервогидравлическую испытательную машину фирмы Walter+Bai AG LFV 100-НН (рис. 1, б) с цифровой управляющей системой. При проведении сравнительных испытаний со схемой нагружения «чистый изгиб с вращением», испытания на «растяжение–сжатие» необходимо также проводить при симметричном нагружении, когда амплитуда прикладываемой нагрузки при растяжении образца равна амплитуде прикладываемой нагрузки при сжатии. Суммарная погрешность нагружения составляла не более 1%. Высокая точность нагружения обеспечивается встроенной системой управления.



Рис. 1. Односекционные испытательные машины МВИ611-М (а) и испытательная машина LFV 100-НН фирмы Walter+Bai AG (б)

Основной сложностью проведения испытаний по схеме одноосного «растяжения–сжатия» является переход через ноль нагрузки в процессе циклирования. В современных испытательных машинах (в том числе и в испытательной машине LFV 100-НН) для обеспечения реализации точности прикладываемой осевой нагрузки при испытаниях на МнЦУ применяются захваты с регулируемым гидравлическим поджатием для исключения люфта резьбовой части образца в оснастке при переходе нагрузки через ноль. Перед каждым испытанием также проводилась регулировка соосности в соответствии с требованиями стандарта ASTM E1012 «Практика для проверки силовой рамы и выравнивания образцов при прикладываемой осевой растягивающей или сжимающей силы».

Испытания проводили на двух видах стандартных гладких цилиндрических образцов с рабочей частью переменного сечения. Условия изготовления и качество поверхности образцов соответствовали требованиям ГОСТ 25.502–79, рабочая часть образцов относится к типу I. Чертежи образцов приведены на рис. 2.

Точность измерения сечения рабочей части образца должна быть не менее 0,01 мм. При проведении данной работы для измерения диаметра образцов, а также для контроля качества поверхности использовали микроскоп Olympus STM6.

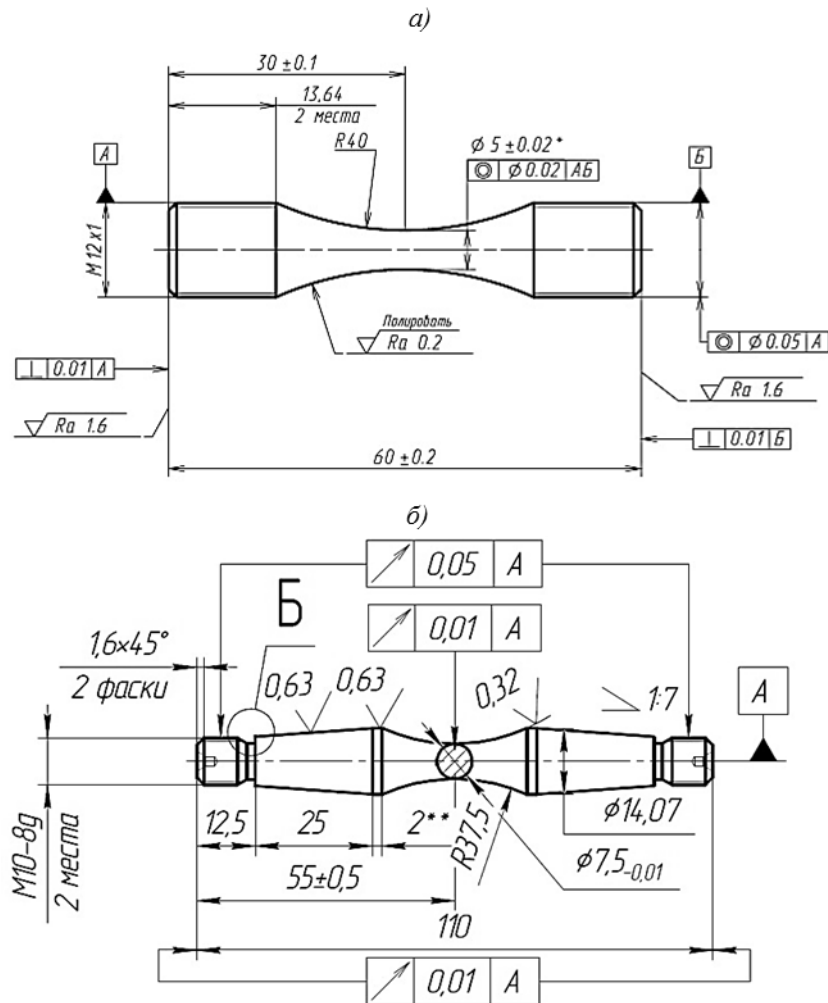


Рис. 2. Гладкий цилиндрический образец с рабочей частью переменного сечения для испытаний по схемам нагружения «растяжение–сжатие» (а) и «чистый изгиб с вращением» (б)

Режимы испытаний на МнЦУ жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У, ЭИ698 и жаропрочного титанового сплава ВТ8М-1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы испытаний на МнЦУ при частоте 50 Гц

Сплав	Температура испытания, °С	Схема нагружения	R_σ	Цикл нагружения	База испытаний, цикл
ЖС6У	20 и 950	Растяжение–сжатие, чистый изгиб с вращением	-1	Синусоидальный	10^5 – 10^7
ЭИ698	20 и 650				
ВТ8М-1	20 и 450				

Результаты и обсуждение

Проведены испытания на МнЦУ образцов из жаропрочных сплавов ЖС6У, ЭИ698 и ВТ8М-1. Для наглядного сопоставления результатов усталостных испытаний, полученных в условиях «растяжение–сжатие» и при «чистом изгибе с вращением», построены кривые усталости и представлены совместно на рис. 3–5.

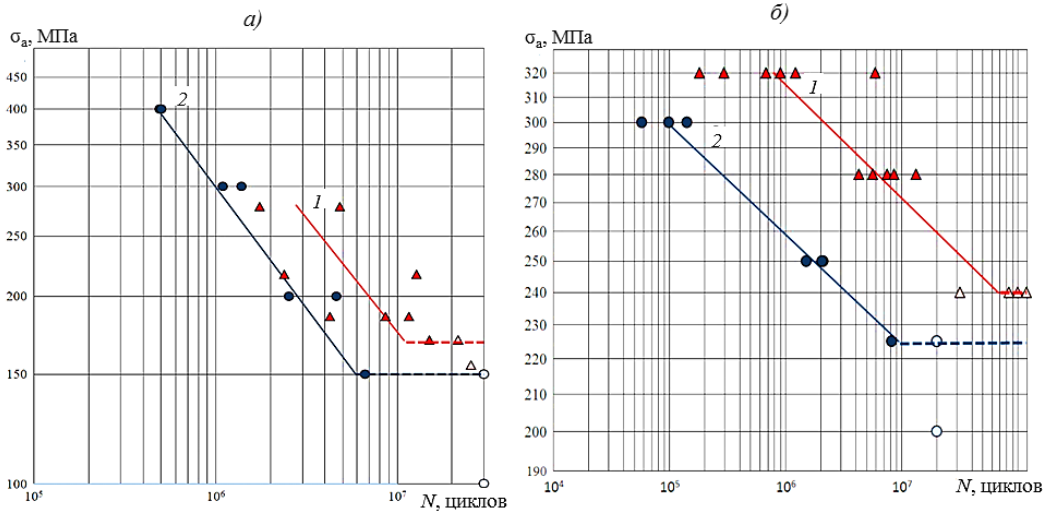


Рис. 3. Кривые МнЦУ жаропрочного никелевого сплава ЖС6У при нагружении по схемам «чистый изгиб с вращением» (1) и «растяжение–сжатие» (2) при температурах 20 (а) и 950°C (б); \circ , Δ – образец снят без разрушения; \bullet , \blacktriangle – образец разрушен в рабочей части

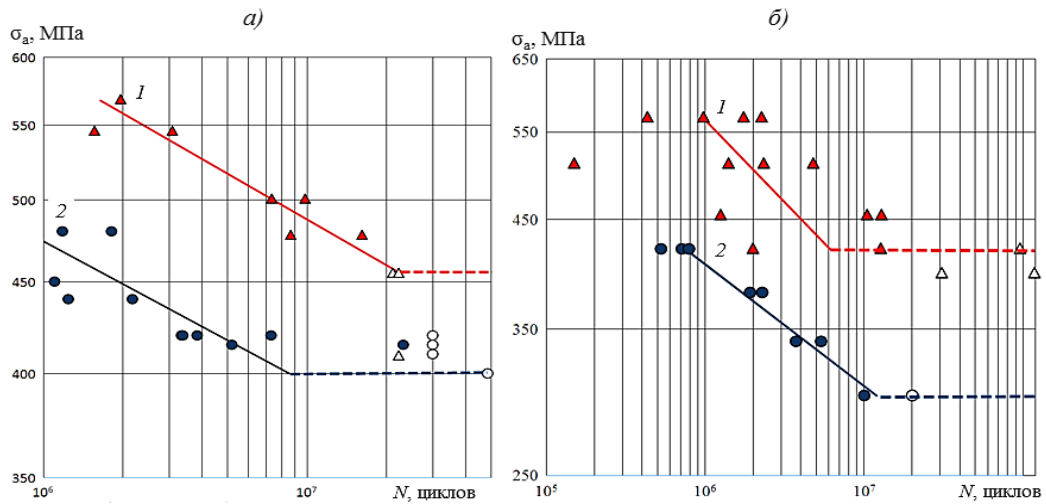


Рис. 4. Кривые МнЦУ жаропрочного никелевого сплава ЭИ698 при нагружении по схемам «чистый изгиб с вращением» (1) и «растяжение–сжатие» (2) при температурах 20 (а) и 650°C (б); \circ , Δ – образец снят без разрушения; \bullet , \blacktriangle – образец разрушен в рабочей части

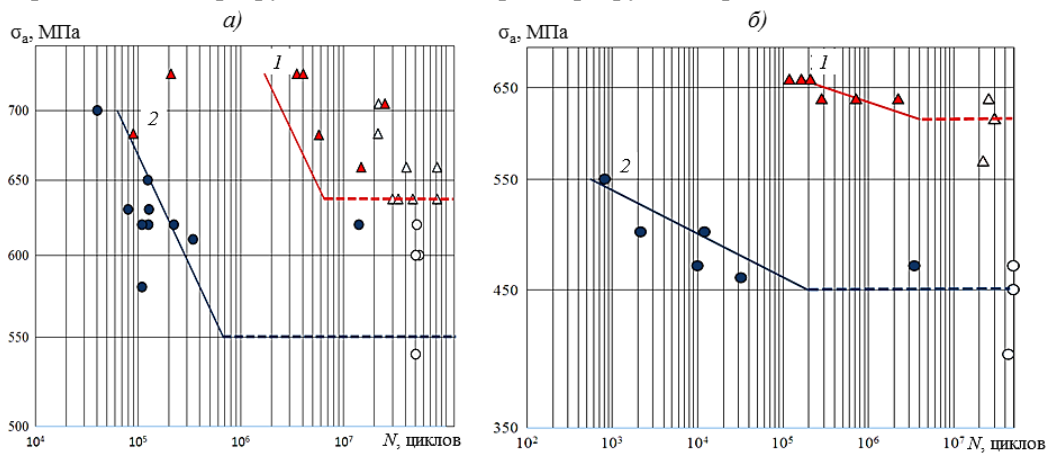


Рис. 5. Кривые МнЦУ жаропрочного титанового сплава ВТ8М-1 при нагружении по схемам «чистый изгиб с вращением» (1) и «растяжение–сжатие» (2) при температурах 20 (а) и 450°C (б); \circ , Δ – образец снят без разрушения; \bullet , \blacktriangle – образец разрушен в рабочей части

После проведения испытаний осуществляли расчет пределов ограниченной выносливости, соответствующих вероятности разрушения 50%, на уровнях 10^7 и $2 \cdot 10^7$ циклов с помощью «метода наименьших квадратов», «метода лестницы» и с учетом требований ГОСТ 25.502–79.

Метод наименьших квадратов применяли для расчета пределов ограниченной выносливости по результатам испытаний достаточного количества разрушенных образцов. В случае если значение предела выносливости необходимо было определять вблизи уровня, содержащего не менее половины образцов, прошедших базу испытания (соответственно снятых до разрушения), применялся метод ступенчатого назначения нагрузки – «метод лестницы» (ММ1.595-33-391–2009). Рассчитанные пределы ограниченной выносливости на базе 10^7 и $2 \cdot 10^7$ циклов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Рассчитанные пределы ограниченной выносливости
при нагружении по схемам «чистый изгиб с вращением» и «растяжение–сжатие»**

Сплав	Вид нагружения	Температура испытания, °С	σ ₋₁ , МПа, на базе циклов	
			10 ⁷	2·10 ⁷
ЖС6У	Чистый изгиб с вращением	20	170	170
	Растяжение–сжатие		150	150
	Чистый изгиб с вращением	950	274	262
	Растяжение–сжатие		225	225
ЭИ698	Чистый изгиб с вращением	20	487	455
	Растяжение–сжатие		400	400
	Чистый изгиб с вращением	650	420	420
	Растяжение–сжатие		306	300
ВТ8М-1	Чистый изгиб с вращением	20	650	650
	Растяжение–сжатие		550	550
	Чистый изгиб с вращением	450	614	614
	Растяжение–сжатие		450	450

Рассчитанные пределы ограниченной выносливости для образцов, испытанных по схеме нагружения «растяжение–сжатие» оказались ниже пределов ограниченной выносливости для образцов, испытанных по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением». В табл. 3 представлена разница между пределами ограниченной выносливости, которые получены для схем «растяжение–сжатие» и «чистый изгиб с вращением», в процентном соотношении.

Таблица 3

Снижение предела ограниченной выносливости для схемы «растяжение–сжатие» (σ₋₁^{pc}) относительно схемы «чистый изгиб с вращением» (σ₋₁^{изг}) в процентном соотношении

Сплав	Температура испытания, °С	$\left \frac{\sigma_{-1}^{\text{изг}} - \sigma_{-1}^{\text{pc}}}{\sigma_{-1}^{\text{изг}}} \cdot 100 \right $, %, на базе циклов	
		10 ⁷	2·10 ⁷
ЖС6У	20	12	12
	950	18	14
ЭИ698	20	18	12
	650	27	29
ВТ8М-1	20	15	15
	450	27	27

Снижение предела ограниченной выносливости на базе испытаний 10^7 – $2 \cdot 10^7$ циклов для схемы нагружения «растяжение–сжатие» относительно схемы «чистый изгиб с вращением» для жаропрочного литейного сплава ЖС6У при комнатной температуре составило 12%, при рабочей температуре 14–18%, для жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 при комнатной температуре 12–18%, при рабочей температуре 27–29%.

Явление снижения предела ограниченной выносливости при испытаниях по схеме нагружения «растяжение–сжатие» относительно схемы нагружения «чистый изгиб с вращением» также представлено для высокопрочной стали в работе [16].

Снижение предела ограниченной выносливости при схеме нагружения «растяжение–сжатие» относительно схемы «чистый изгиб с вращением» обусловлено тем, что при испытаниях по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением» возникает неоднородное напряженное состояние в поперечном сечении рабочей части образца, в то время как при испытаниях по схеме нагружения «растяжение–сжатие» – в сечении рабочей части образца однородное напряженное состояние и максимальные напряжения постоянны по всему сечению. Таким образом, отличие пределов ограниченной выносливости обусловлено различием однородности напряженного состояния в поперечном сечении рабочей части образцов, испытанных по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением» и «растяжение–сжатие».

Исходя из полученных данных, возможно введение коэффициента для сравнительной оценки результатов испытаний на МнЦУ по схеме нагружения «растяжение–сжатие» с результатами испытаний по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением»:

$$K_{\text{рс/изг}} = \frac{\sigma_{-1}^{\text{рс}}}{\sigma_{-1}^{\text{изг}}}.$$

Полученные коэффициенты сравнительной оценки ($K_{\text{рс/изг}}$) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициент сравнительной оценки для жаропрочных сплавов ЖС6У, ЭИ698 и ВТ8М-1

Сплав	Температура испытания, °С	$K_{\text{рс/изг}}$ на базе циклов	
		10^7	$2 \cdot 10^7$
ЖС6У	20	0,85	0,85
	950	0,80	0,85
ЭИ698	20	0,80	0,85
	650	0,70	0,70
ВТ8М-1	20	0,85	0,85
	450	0,70	0,70

Коэффициент сравнительной оценки результатов испытаний на МнЦУ по схеме нагружения «растяжение–сжатие» с результатами испытаний по схеме нагружения «чистый изгиб с вращением» ($K_{\text{рс/изг}}$) на базе испытаний 10^7 – $2 \cdot 10^7$ циклов при комнатной температуре для жаропрочного литейного сплава ЖС6У и жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 равен 0,80–0,85. При рабочих температурах $K_{\text{рс/изг}}$ для жаропрочного литейного сплава ЖС6У равен 0,80–0,85, а для жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 равен 0,70.

Полученное различие значений коэффициента сравнительной оценки при рабочих температурах у жаропрочного литейного сплава ЖС6У и жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1, вероятнее всего, связано со структурными особенностями литейных и деформируемых сплавов и требует дальнейшего исследования.

Заключения

1. Установлено, что значения пределов ограниченной выносливости при испытании гладких образцов из жаропрочных никелевых сплавов ЭИ698, ЖС6У и жаропрочного титанового сплава ВТ8М-1 при симметричном цикле нагружения по схеме «чистый изгиб с вращением» превышают значения пределов ограниченной выносливости, полученных по схеме нагружения «растяжение–сжатие». Данное превышение пределов ограниченной выносливости следует из того, что при испытаниях по схеме «растяжение–сжатие» большее количество материала работает при максимальных напряжениях по сравнению со схемой «чистый изгиб с вращением».

2. Снижение значений пределов ограниченной выносливости на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов при комнатной температуре для литейного жаропрочного сплава ЖС6У и жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 составило 12–15%. Снижение значений пределов ограниченной выносливости на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов при рабочих температурах для жаропрочного литейного сплава ЖС6У составило 14%, а для жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 составило 27–29%.

3. Коэффициент сравнительной оценки результатов испытаний на МнЦУ по схеме нагружения «растяжение–сжатие» с результатами испытаний по схеме «чистый изгиб с вращением» ($K_{рс/изг}$) на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов при комнатной температуре для жаропрочного литейного сплава ЖС6У и жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 равен 0,85; при рабочих температурах $K_{рс/изг}$ для жаропрочного литейного сплава ЖС6У равен 0,85, а для жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698 и ВТ8М-1 равен 0,70. Данное различие значений $K_{рс/изг}$ при рабочих температурах, вероятнее всего, связано со структурными особенностями жаропрочных литейных и деформируемых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Парфенович П.И. Конструирование литейных жаропрочных никелевых сплавов с поликристаллической структурой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. №2 (752). С. 47–55.
2. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
3. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
4. Гольнец С.А., Горбовец М.А., Каранов В.А. Оценка влияния размеров образцов на механические свойства при растяжении жаропрочных титановых и никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №3 (63). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-86-94.
5. Давыдов М.Н., Гишваров А.С., Рахимов А.Х. Моделирование долговечности лопаток турбин в условиях коррозионно-активной среды // *Вестник УГАТУ*. 2018. Т. 20. №1 (71). С. 71–80.
6. Горбовец М.А., Славин А.В. Доказательство соответствия материала требованиям Части 33 Авиационных правил // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
7. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
8. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.

9. 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.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
11. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2016. С. 10–11.
12. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-3-7.
13. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2153020 Рос. Федерация; опубл. 20.07.00.
14. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №2. С. 8–14.
15. Гейкин В.А. Разработка технологий для новых материалов в двигателестроении // *Двигатель*. 2017. №3. С. 10–11.
16. Гриневич А.В., Ерасов В.С., Якушева Н.А., Терехин А.Л. Усталостная долговечность стали ВКС-9 в условиях симметричного нагружения «растяжение–сжатие» и «изгиб с вращением» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6246-2017-0-9-11-11.