

Научная статья

УДК 620.172

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-3-12

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО
ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖЛ23**Н.В. Петрушин¹, С.А. Голынец¹, Э.Г. Римша¹, П.В. Рыжков¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований кратковременной и длительной прочности, ползучести, многоциклового и малоциклового усталости литейного коррозионностойкого жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ23 для турбинных лопаток ГТУ и ГТД.

Проведен сравнительный анализ полученных значений характеристик длительной прочности, многоциклового и малоциклового усталости сплава ВЖЛ23 с наиболее жаропрочным зарубежным сплавом-аналогом IN-792. Установлено, что по комплексу механических свойств сплав ВЖЛ23 не уступает сплаву IN-792.

Ключевые слова: литейные коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы, механические свойства, микроструктура, температура испытания, характеристики прочности, усталость

Для цитирования: Петрушин Н.В., Голынец С.А., Римша Э.Г., Рыжков П.В. Механические свойства коррозионностойкого жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ23 // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-3-12.

Scientific article

**MECHANICAL PROPERTIES OF CORROSION-RESISTANT
NICKEL-BASED SUPERALLOY VZhL23**N.V. Petrushin¹, S.A. Golynets¹, E.G. Rimsha¹, P.V. Ryzhkov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of experimental studies of short-term strength, long-term strength, multi-cycle fatigue and low-cycle fatigue of the castable corrosion-resistant nickel-based superalloy VZhL23 for turbine blades of GTI and GTE are presented.

Comparative analysis of the obtained values of long-term strength, multi-cycle fatigue and low-cycle fatigue of VZhL23 with the most heat-resistant foreign alloy IN-792 is carried out. It has been established that according to the set of mechanical properties VZhL23 is not inferior to IN-792.

Keywords: castable corrosion-resistant nickel-based superalloys, mechanical properties, microstructure, testing temperature, strength characteristics, fatigue

For citation: Petrushin N.V., Golynets S.A., Rimsha E.G., Ryzhkov P.V. Mechanical properties of corrosion-resistant nickel-based superalloy VZhL23. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-3-12.

Введение

Развитие современных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) направлено на существенное повышение их мощности, ресурса и надежности при одновременном снижении массы. Для этого требуется создание сплавов с высоким

уровнем температурной работоспособности, обеспечивающих постоянство свойств в течение заданного ресурса при воздействии высоких температур и напряжений.

В отечественной промышленности для литья поликристаллических лопаток ГТУ широко используются литейные коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы марок ЧС70-ВИ, ЧС70У-ВИ, ЧС88У-ВИ и ЦНК-7П [1–3]. Однако эти сплавы по своим механическим характеристикам не обеспечивают требования, предъявляемые к материалам турбинных лопаток перспективных ГТУ.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан сплав ЖСКС-1РК для литья рабочих лопаток с поликристаллической равноосной структурой стационарных энергетических и газоперекачивающих ГТУ с пределом длительной прочности $\sigma_{100}^{900} = 305$ МПа. Однако в связи с фазовой нестабильностью сплава ЖСКС-1РК, проявляющейся в склонности к образованию вредных топологически плотноупакованных фаз, лопатки из этого сплава будут иметь недостаточно высокий ресурс.

Зарубежные фирмы-производители стационарных ГТУ, которые широко эксплуатируются на территории Российской Федерации, для литья турбинных лопаток с поликристаллической равноосной структурой используют литейные коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы марок IN-738, IN-792 и IN-939 [4]. По своим физико-механическим характеристикам эти сплавы близки к сплавам типа ЧС. В связи с этим в настоящее время весьма актуальной является проблема импортозамещения зарубежных литейных сплавов в составе ГТУ отечественными сплавами-аналогами, производимыми в Российской Федерации по российским технологиям с обеспечением эксплуатационных свойств не хуже, чем у зарубежных сплавов [5–9]. Отсутствие такого класса отечественных сплавов нового поколения и невозможность использования импортных материалов значительно усложняет решение задач по созданию высокоэффективных мощных и экологически «чистых» отечественных ГТУ.

Разработанный сплав марки ВЖЛ23 с поликристаллической структурой может применяться для изготовления рабочих и сопловых лопаток стационарных энергетических газовых турбин перспективных высокоресурсных ГТУ и морских ГТД, работающих длительное время при температурах до 900 °С [10].

Лопатки турбин эксплуатируются в условиях активного воздействия статических, термических и усталостных нагрузок и подвержены комплексу различных видов повреждений. Воздействие высоких температур и больших нагрузок приводит к возникновению ползучести, которая становится одним из важных факторов выбора материала для лопаток турбин. Статическое разрушение лопаток вследствие недостаточной длительной прочности может наблюдаться в результате повышения температуры газа, снижения свойств материала из-за отклонения от регламентированных режимов термической и механической обработки. В процессе длительных испытаний встречаются разрушения и повреждения замков лопаток вследствие недостаточной длительной прочности и сопротивления усталости.

Механические свойства жаропрочных сплавов в диапазоне температурно-силовых условий эксплуатации турбинных лопаток определяют на образцах, заготовки которых получают по технологии производства лопаток, а изготовление образцов и их испытания осуществляют согласно требованиям государственных стандартов [11, 12].

Цель данной работы – исследование комплекса механических свойств литейного коррозионностойкого жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ23 системы легирования Ni–Al–Ti–Ta–Cr–Co–Mo–W–C–B–Zr.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись поликристаллические образцы из сплава ВЖЛ23, полученные по технологии равноосного литья [13]. Выплавку проводили в промышленной вакуумной индукционной печи с номинальной емкостью керамического плавильного тигля 350 кг [14]. Отливку поликристаллических образцов (длина 70, диаметр 16 мм) из литых прутковых (шихтовых) заготовок осуществляли в вакуумной установке для равноосного литья.

С целью снижения ликвационной химической неоднородности и литейной микропористости, а также формирования кубоидных микрочастиц γ' -фазы оптимального размера, полученные литые отливки подвергали горячему изостатическому прессованию (ГИП) и термической обработке. Технологический процесс ГИП состоял из газостатирования под давлением инертного газа аргона выше температуры растворения γ' -фазы, которая для исследуемого сплава составляет 1200 °С. После процесса ГИП отливки подвергали термической обработке, состоящей из гомогенизирующего отжига и двухступенчатого старения, из которых затем были изготовлены образцы для испытаний.

На рис. 1 представлена микроструктура исследуемых образцов. Видно, что материал образцов имеет дендритно-ячеистое строение и состоит из дендритов и междендритных областей γ -матрицы, в которой сформировались кубоидные выделения микрочастиц γ' -фазы размером 0,3–0,5 мкм. В междендритных областях γ -матрицы расположены выделения частиц на основе монокарбида (Ti, Ta)C и эвтектики $\gamma + \gamma'$. Распределение микрочастиц γ' -фазы в γ -матрице зерна приобрело псевдорегулярный характер, а их огранка близка к оптимальной кубической. Избыточных фаз в структуре материала не обнаружено.

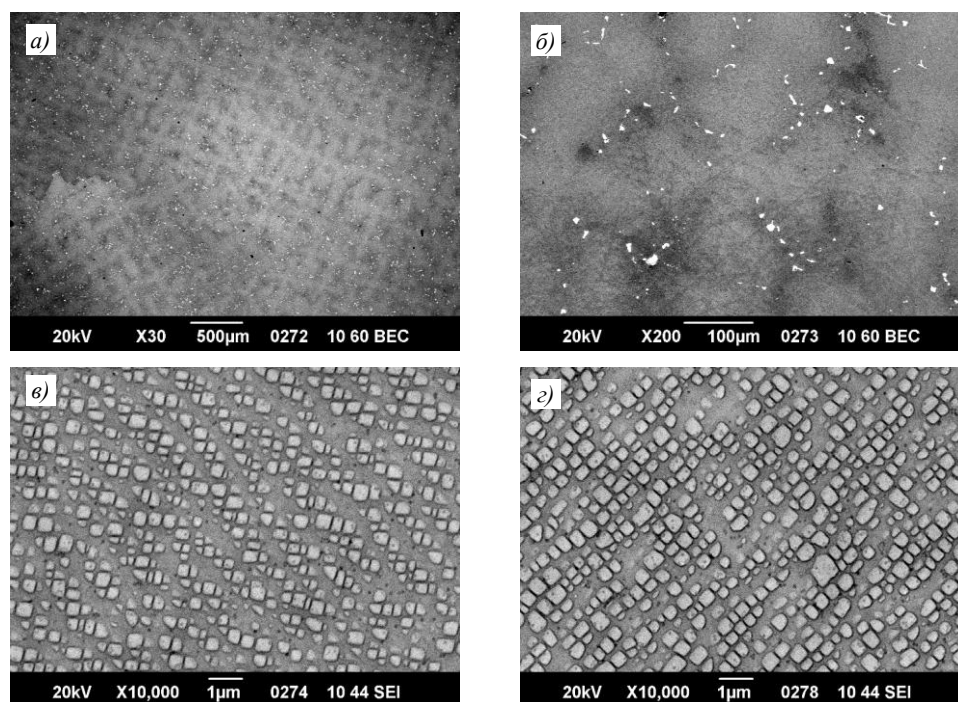


Рис. 1. Микроструктура материала образцов из сплава ВЖЛ23 после горячего изостатического прессования и термообработки: *a* – дендритно-ячеистая структура; *b* – распределение карбидных частиц (светлые выделения) и эвтектических фаз $\gamma + \gamma'$ (темные выделения) в междендритных участках; *c*, *d* – микрочастицы γ' -фазы в γ -матрице в осях дендритов первого порядка (*c*) и междендритных участках (*d*)

Испытания образцов на растяжение, длительную прочность, ползучесть, многоцикловую усталость (МнЦУ) при чистом изгибе с вращением с частотой 50 Гц при цикле нагружения $R_\sigma = -1$ синусоидальной формы и малоцикловую усталость (МЦУ) при «жестком» цикле нагружения с частотой 1 Гц при отнулевом цикле нагружения $R_\varepsilon = 0$ синусоидальной формы проводили на гладких образцах в соответствии с требованиями стандартов [15–19].

Результаты и обсуждение

Механические свойства при растяжении

Проведены испытания на растяжение, при каждой температуре испытывали по 5 образцов (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства сплава ВЖЛ23

Температура испытания, °С	E, ГПа	$\sigma_{0.2}$	σ_B	δ_5	ψ
		МПа			
20	188	920	1020	5,3	10
700	168	760	1010	6,4	14
800	157	840	980	10,5	31
900	141	580	690	13	29
950	140	430	550	12	20,5

Видно, что в интервале температур 20–950 °С модуль упругости монотонно снижается, предел прочности при растяжении при температуре до 700 °С практически не изменяется. Это может быть обусловлено тем, что в структуре материала не происходит термически активируемых структурно-фазовых превращений, а пластическая деформация осуществляется путем скольжения дислокаций в прослойках γ -твердого раствора с образованием высокоэнергетичной антифазной границы в упорядоченной кристаллической решетке γ' -фазы [20]. С повышением температуры в сплаве протекают диффузионные процессы растворения частиц γ' -фазы в матричном γ -твердом растворе, приводящие к разупрочнению сплава и, следовательно, к снижению предела прочности и увеличению пластичности, которая характеризуется относительным удлинением. Наиболее интенсивное разупрочнение материала наблюдается при температуре 950 °С.

Температурная зависимость условного предела текучести является типичной для литейных жаропрочных никелевых сплавов с объемной долей γ' -фазы ~50 % и объясняется аномальной температурной зависимостью условного предела текучести интерметаллидной γ' -фазы [21].

Длительная прочность и ползучесть

Проведены испытания на длительную прочность и ползучесть при разных уровнях напряжений с долговечностями при каждой температуре испытания от 10 до 1000 ч. На каждый температурный уровень (T) испытывалось по 12 образцов, по 4 образца на каждую базу испытаний.

Для обработки результатов испытаний используют функциональные зависимости между напряжением и временем до разрушения τ_p^T при $T = \text{const}$ и временем накопления деформации ползучести τ_ε^T при $T = \text{const}$ в виде уравнений [22, 23]:

$$\tau_p^T = \exp(A) \cdot \sigma^{-N} \cdot \exp(-B \cdot \sigma); \quad (1)$$

$$\tau_\varepsilon^T = \exp(C) \cdot \sigma^{-E} \cdot \exp(-D \cdot \sigma). \quad (2)$$

где τ_p и τ_ε – время до разрушения и время накопления деформации ползучести при $T = \text{const}$; σ – напряжение; A, B, N, C, D, E – коэффициенты, которые определяются обработкой выборки результатов испытаний образцов методом наименьших квадратов.

Определены численные значения коэффициентов уравнений температурно-силовой зависимости времени до разрушения и времени накопления заданной деформации ползучести $\varepsilon = 0,2\%$:

– для температуры 700 °С

$$\tau_p = \exp(73,15677) \cdot \sigma^{-10} \cdot \exp(-8,41625 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma); \quad (3)$$

$$\tau_\varepsilon = \exp(71,335) \cdot \sigma^{-10} \cdot \exp(-2,411961 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma); \quad (4)$$

– для температуры 800 °С

$$\tau_p = \exp(19,4315) \cdot \sigma^{-1} \cdot \exp(-1,562399 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma); \quad (5)$$

$$\tau_\varepsilon = \exp(22,4965) \cdot \sigma^{-1} \cdot \exp(-3,095398 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma); \quad (6)$$

– для температуры 900 °С

$$\tau_p = \exp(15,00262) \cdot \sigma^{-1} \cdot \exp(-1,567812 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma); \quad (7)$$

$$\tau_\varepsilon = \exp(45,32265) \cdot \sigma^{-8} \cdot \exp(-1,015944 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma). \quad (8)$$

С использованием уравнений (3–8) рассчитаны средние значения пределов длительной прочности и ползучести в интервале температур 700–900 °С и долговечностей от 10 до 1000 ч (табл. 2).

Таблица 2

Значения пределов длительной прочности и ползучести сплава ВЖЛ23

Температура, °С	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/10}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/500}$
	МПа			МПа		
700	860	750	710	800	670	585
800	535	450	410	465	385	330
900	300	215	180	300	220	160

На рис. 2 представлены пределы длительной прочности при температуре 900 °С исследуемого сплава ВЖЛ23 и зарубежного сплава-аналога IN-792 [24].

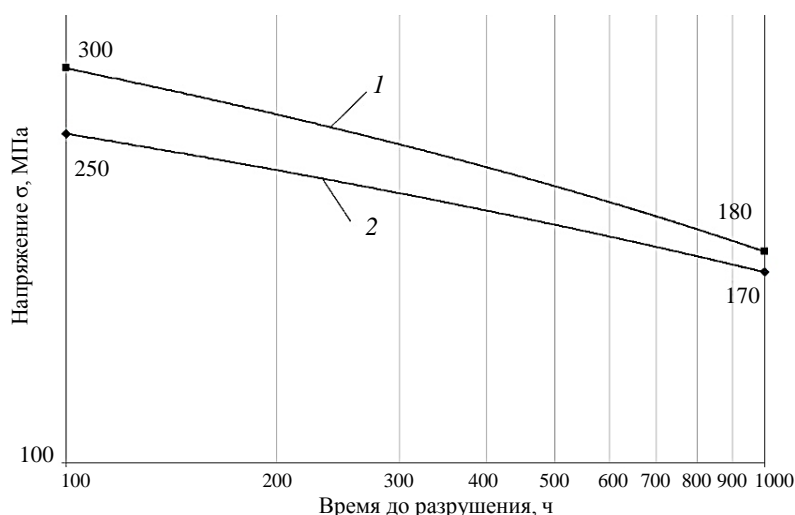


Рис. 2. Кривые длительной прочности сплавов ВЖЛ23 (1) и IN-792 (2) при температуре 900 °С

Сплав ВЖЛ23 имеет более высокие значения пределов длительной прочности, чем сплав IN-792, при долговечностях до 1000 ч.

Повышенный уровень длительной прочности обеспечивается благодаря сбалансированному содержанию в сплаве и соответственно в γ' - и γ -фазах сплава тугоплавких (Cr, Mo, W, Ta) и γ' -образующих (Al, Ta, Ti) металлов, а также высокими показателями фазовой стабильности.

Многоцикловая (МнЦУ) и малоцикловая (МЦУ) усталость

Проведены испытания на МнЦУ на базах до $N = 2 \cdot 10^7$ циклов при температуре 900 °С и на МЦУ на базах до $N = 1 \cdot 10^4$ циклов при температуре 700 °С. На каждом температурном уровне испытывали по 20 образцов.

По медианной ($\sigma-N$)-кривой определены средние значения предела выносливости в упругой области нагружения на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. Значение вероятности разрушения 50 % на установленной базе составило 240 МПа по параметру контролируемой амплитуды напряжений. По медианной ($\varepsilon-N$)-кривой определены средние значения предела выносливости в упругопластической области нагружения на базе $N = 1 \cdot 10^4$ циклов. Значение вероятности разрушения 50 % на установленной базе составило 0,4 % по параметру контролируемого размаха деформаций.

При многоцикловом нагружении чаще всего используется силовой подход, в котором предельное состояние материала может оцениваться амплитудными значениями контролируемой нагрузки при симметричном цикле:

$$\Delta\sigma/2 = \sigma_f N_f^b, \quad (9)$$

где $\Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжения; σ_f – коэффициент усталостной прочности; N_f – число циклов до разрушения; b – показатель сопротивления усталости.

При помощи медианной кривой $\sigma-N$, полученной нелинейной аппроксимацией экспериментальных данных по МнЦУ сплава ВЖЛ23 при температуре 900 °С (режим нагружения – изгиб при вращении) и представленной на рис. 3, проведено сравнение с кривой усталости (режим нагружения – осевое «растяжение–сжатие») сплава IN-792 [25].

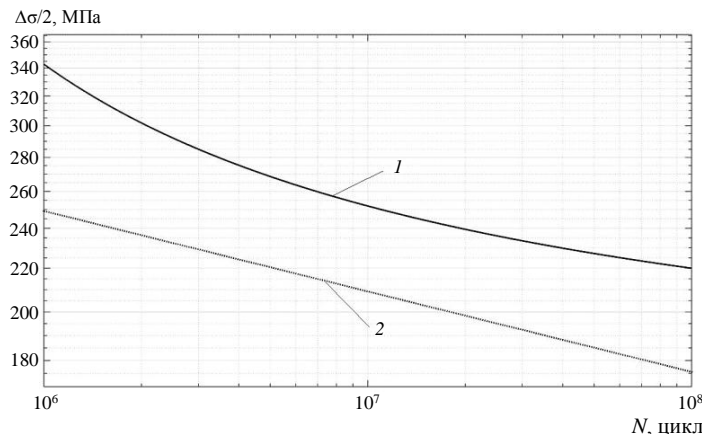


Рис. 3. Кривые многоцикловой усталости сплавов ВЖЛ23 (1; изгиб при вращении) и IN-792 (2; осевое «растяжение–сжатие») при температуре 900 °С ($R_\sigma = -1$)

Видно, что различие напряжений в интервале долговечности от 10^6 до 10^8 циклов при одноосном нагружении сплава IN-792 относительно чистого изгиба при вращении сплава ВЖЛ23 обусловлено различием напряженно-деформированного состояния образцов сплавов в процессе испытания на МнЦУ. При чистом изгибе при вращении максимальные напряжения распределены на поверхности, которые монотонно убывают к центру, а при одноосном «растяжении–сжатии» реализуется однородное поле максимальных напряжений, распределенное по всему объему. Очевидным становится тот факт, что поиск дефектного микрообъема материала при многоцикловом нагружении по схеме «изгиб при вращении» будет происходить на меньшем объеме материала, чем по схеме осевое «растяжение–сжатие». В работе [26] применительно к литейным жаропрочным сплавам установлено, что такое различие напряжений в объеме испытываемых образцов вызывает снижение предела выносливости на 12 %.

При сравнении напряжений на базе $1 \cdot 10^7$ циклов для исследуемого сплава ВЖЛ23 и зарубежного сплава-аналога IN-792 различие составляет 19 %.

При «жестком» нагружении при испытаниях на МЦУ чаще всего используется деформационный подход, в котором предельное состояние материала может оцениваться амплитудными значениями полной деформации, описываемой уравнением Мэнсона–Коффина [27]:

$$\Delta\varepsilon/2 = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c, \quad (10)$$

где $\Delta\varepsilon/2$ – амплитуда полной деформации; σ'_f – коэффициент сопротивления усталости; b – экспонента сопротивления усталости; ε'_f , c – коэффициенты усталостной пластичности; N_f – число циклов до разрушения.

При помощи медианной кривой МЦУ ($\varepsilon'_f - N_f$) для сплава ВЖЛ23 с использованием полученных коэффициентов уравнения Мэнсона–Коффина проведено сравнение с кривой МЦУ сплава IN-792 (рис. 4).

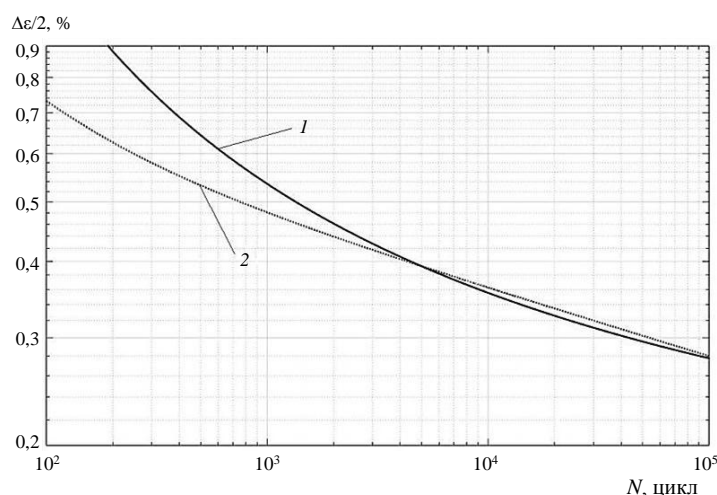


Рис. 4. Кривые малоциклового усталости («жесткий» цикл нагружения) сплавов ВЖЛ23 (1; $R_\varepsilon = 0$) и IN-792 (2; $R_\varepsilon = -1$) при температуре 700 °С

Наблюдаемое на рис. 4 различие ($\varepsilon'_f - N_f$)-кривых сопротивления усталости сплавов ВЖЛ23 и IN-792 в области малых долговечностей и высоких нагрузок объясняется влиянием средней компоненты цикла деформации. Испытания на МЦУ сплава IN-792 проводили при симметричном цикле нагружения, в котором среднее значение деформации равно нулю. Отнулевой цикл деформации при испытании сплава ВЖЛ23 подразумевает наличие статической составляющей цикла деформации, влияющей на усталостную долговечность. Хорошо известно, что влияние растягивающей средней деформации цикла наиболее существенно при условии преобладания пластической деформации, которое реализуется на интервале менее $1 \cdot 10^3$ циклов [26]. В области преобладания упругой деформации и малых нагрузок при долговечности $1 \cdot 10^4$ циклов поведение двух жаропрочных сплавов становится идентичным.

Таким образом, сплав ВЖЛ23 в области МнЦУ и МЦУ при рабочих температурах не уступает наиболее жаропрочному зарубежному коррозионностойкому никелевому сплаву-аналогу IN-792.

Заключения

Определены характеристики прочности сплава ВЖЛ23 при рабочих температурах. Проведен сравнительный анализ полученных значений характеристик длительной прочности, многоциклового и малоциклового усталости сплава ВЖЛ23 с наиболее жаропрочным зарубежным сплавом-аналогом IN-792. Установлено, что по комплексу механических свойств сплав ВЖЛ23 не уступает сплаву IN-792.

Разработанный новый литейный коррозионностойкий жаропрочный никелевый сплав марки ВЖЛ23 может быть использован для изготовления рабочих и сопловых лопаток с поликристаллической равноосной структурой для стационарных энергетических газовых турбин перспективных высокоресурсных ГТУ и морских газотурбинных двигателей (ГТД), работающих длительное время при температурах до 900 °С.

Список источников

1. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин: в 2-х кн. Кн. 1. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2010. 605 с.
2. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин: в 2-х кн. Кн. 2. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2011. 493 с.
3. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2017. 854 с.
4. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2 кн. /под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; пер. с англ. М.: Металлургия, 1995. Кн. 2. 384 с.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
6. 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.
7. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
8. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
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. Литейный жаропрочный сплав на никелевой основе и изделие, выполненное из него: пат. RU 2633679 С1; заявл. 20.12.16; опубл. 16.10.17.
11. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость при высоких температурах жаропрочного никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73.
12. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
13. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. / Под общ. ред. Е.Н Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
14. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование. М.: ВИАМ, 2016. 368 с.
15. ГОСТ 10145–81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. М.: Изд-во стандартов, 1981. 9 с.
16. ГОСТ 3248–81. Металлы. Метод испытания на ползучесть. М.: Изд-во стандартов, 1981. 11 с.

17. ГОСТ 25.502–79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Москва. 1981. М.: Изд-во стандартов, 1986. 25 с.
18. Соловьев А.Е., Голынец С.А., Хвацкий К.К., Аслаяна И.Р. Проведение статических испытаний при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12.
19. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.
20. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
21. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. Cambridge: United Kingdom at University Press. 2006. 372 p.
22. Ковпак В.И. Прогнозирование жаропрочности металлических материалов. Киев: Наукова думка, 1981. 240 с.
23. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
24. Donachie M.J., Donachie S.J. Selection of superalloys for design // Mechanical Engineers Handbook. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2006. P. 287–334.
25. Du B., Yang J., Cui C., Sun X. Effects of grain size on the high-cycle fatigue behavior of IN792 superalloy // Materials & Design. 2015. Vol. 65. P. 57–64. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.059.
26. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.12.2022) DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
27. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.

References

1. Getsov L.B. *Materials and strength of gas turbines*: in 2 books. Rybinsk: Gas turbine technologies, 2010, book 1, 605 p.
2. Getsov L.B. *Materials and strength of gas turbines*: in 2 books. Rybinsk: Gas turbine technologies, 2011, books 2, 493 p.
3. Logunov A.V. *Heat-resistant nickel alloys for shoulder blades and disks of gas turbines*. Rybinsk: Gas turbine technologies, 2017, 854 p.
4. *Superplanes II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants*: in 2 book. Eds. Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, U.K. Hagel; Moscow: Metallurgiya, 1995, book 2, 384 p.
5. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation of technological leadership and national security of Russia // *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
6. Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., Arginbaeva E.G., Letnikova E.Yu., Shestakov A.V. Development trends of nickel-based intermetallic alloys. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
7. Kablov E.N. Materials and technologies of the VIAM for the "Aviator" // *Permskiye aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
8. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 06, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. *Foundry of a nickel-based heat-resistant alloy and a product made from it*: pat. RU 2633679 C1; appl. 20.12.16; publ. 16.10.17.
11. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue at high temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73.

12. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Influence of average cycle stress on characteristics of low-cycle fatigue of high-temperature nickel alloy VZh175. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 07, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
13. *Casting shoulder blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coating*. 2nd ed. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
14. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E. *Metallurgy of foundry heat-resistant alloys: technology and equipment*. Moscow: VIAM, 2016, 368 p.
15. State Standard 10145–81. *Metals. The method of testing long-term strength*. Moscow: Publishing house of standards, 1981, 9 p.
16. State Standard 3248–81. *Metals. The testing method for creep*. Moscow: Publishing house of standards, 1981, 11 p.
17. State Standard 25.502–79. *Methods of mechanical testing of metals. Fatigue test methods*. Moscow: Publishing house of standards, 1986, 25 p.
18. Solovyev A.E., Golynets S.A., Khvatsky K.K., Aslanyan I.R. Performing of static tensile tests on Zwick/Roell machines. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 12. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022).
19. Shkolnik L.M. *Forest test methodology: reference*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 304 p.
20. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
21. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: United Kingdom at University Press. 2006, 372 p.
22. Kovpak V.I. *Prediction of heat resistance of metal materials*. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 240 p.
23. Kablov E.N., Golubovsky E.R. *The heat resistance of nickel alloys*. Moscow: Mechanical Engineering, 1998, 463 p.
24. Donachie M.J., Donachie S.J. Selection of superalloys for design // *Mechanical Engineers Handbook*. Third Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2006, pp. 287–334.
25. Du B., Yang J., Cui C., Sun X. Effects of grain size on the high-cycle fatigue behavior of IN792 superalloy // *Materials & Design*, 2015, vol. 65, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.059.
26. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Yushin V.D. Influence of the type of loading on high-cycle fatigue of heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 06, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
27. Collins J. *Damage to materials in structures. Analysis, prediction, prevention*. Moscow: Mir, 1984, 624 p.

Информация об авторах

Петрушин Николай Васильевич, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гольнец Сергей Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Римша Эльвира Гайсаевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Рыжков Петр Валерьевич, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikolay V. Petrushin, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Golynets, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elvira G. Rimsha, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Petr V. Ryzhkov, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2023; получена после доработки 07.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.06.2023.
The article was submitted 26.05.2023; received in revised form 07.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.06.2023.