

Научная статья

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14

**ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИРУЕМЫЙ СПЛАВ
ДЛЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ***Б.С. Ломберг¹, М.В. Ахмедзянов¹, Е.Б. Чабина¹, О.И. Расторгуева¹*

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

Аннотация. Разработан деформируемый высокожаропрочный сплав ВЖ179-ИД для лопаток последних ступеней компрессора высокого давления с рабочей температурой до 800 °С газотурбинных двигателей большой тяги. Для достижения требуемых показателей по механическим свойствам проведены структурные исследования, результаты которых использованы при определении режимов термической обработки сплава. По комплексу механических свойств разработанный сплав обладает значительными квотами превосходства как по сравнению с аналогом по применению сплавом ЭП718-ИД, так и с наиболее жаропрочным деформируемым сплавом для лопаток ЭП220.

Ключевые слова: высокожаропрочный деформируемый сплав, технология, пруток, структура, термическая обработка, компрессор высокого давления

Для цитирования: Ломберг Б.С., Ахмедзянов М.В., Чабина Е.Б., Расторгуева О.И. Высокожаропрочный деформируемый сплав для лопаток компрессора высокого давления перспективных газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14.

Scientific article

**HEAT-RESISTANT WROUGHT SUPERALLOY FOR HIGH-PRESSURE
COMPRESSOR BLADES OF PROMISING GAS TURBINE ENGINES***B.S. Lomberg¹, M.V. Akhmedzyanov¹, E.B. Chabina¹, O.I. Rastorgueva¹*

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

Abstract. A wrought heat-resistant superalloy VZh179-ID has been developed for blades of the last stages of a high-pressure compressor with an operating temperature up to 800 °C of high-thrust gas turbine engines. To achieve the required indicators for mechanical properties structural studies have been carried out, the results of which are used in determining the models of alloy's heat treatment. According to the complex of mechanical properties the developed alloy has significant quotes of superiority both in comparison with EP718-ID alloy and the most heat-resistant wrought alloy for blades EP220.

Keywords: heat-resistant wrought superalloy, technology, bar, structure, thermal treatment, high-pressure compressor

For citation: Lomberg B.S., Akhmedzyanov M.V., Chabina E.B., Rastorgueva O.I. Heat-resistant wrought superalloy for high-pressure compressor blades of promising gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14.

Введение

Для соответствия перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) мировым стандартам требуется применение новых материалов и технологий [1–4]. В связи с этим с учетом требований к работе компрессора высокого давления (КВД) перспективных ГТД большой тяги (35–50 тс) при повышенных температурах воздуха, частотах и амплитудах аэромеханического возбуждения, для лопаток КВД последних ступеней требуется сплав, существенно превосходящий по эксплуатационным характеристикам применяемые в серийных ГТД сплавы.

Новый материал должен обладать высокой кратковременной и длительной прочностью при повышенных рабочих температурах (до 800 °С), а также высоким сопротивлением усталости, в том числе при возникновении дефектов. В основном в серийных ГТД применяют сплавы ЭИ787 и ЭП718, не отвечающие повышенным требованиям к механическим свойствам перспективных ГТД.

Для перспективных ГТД требуется материал с более высокими характеристиками кратковременной и длительной прочности ($\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} \geq 1280$ МПа, $\sigma_{100}^{650^\circ} \geq 880$ МПа и $\sigma_{100}^{800^\circ} \geq 490$ МПа). При этом свойства при циклических нагрузках должны превосходить свойства для серийных материалов.

В качестве аналогов рассмотрены отечественные сплав ЭП718-ИД (по применению) и самый жаропрочный деформируемый сплав ЭП220, применявшийся для лопаток турбин в серийных двигателях третьего поколения.

При разработке нового материала учтено, что уровень служебных характеристик жаропрочных сплавов определяется степенью упрочнения твердого раствора (γ); количеством, дисперсностью и стабильностью упрочняемой γ' -фазы; состоянием поверхностей раздела, в первую очередь – границ зерен [5].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6–8].

Материалы и методы

При проведении исследования использована система на основе Ni, при легировании которой реализованы все современные принципы, применяемые при разработке современных деформируемых жаропрочных сплавов:

- твердорастворное упрочнение γ -матрицы (Cr, Co, W, Mo);
- дисперсионное упрочнение γ' -фазой (Al, Ti, Ta);
- упрочняющее влияние карбидов типа MeC;
- микролегирование поверхностей раздела (границы зерен и фаз) – В, Mg и редкоземельными металлами.

Новому материалу присвоена марка ВЖ179-ИД* (ХН57КВМЮТ-ИД, ЭК197-ИД). Получен патент № 2737835 «Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него» [9].

В условиях промышленного производства на предприятии АО «Металлургический завод «Электросталь» отработаны технологические режимы выплавки слитков в вакуумных индукционных и вакуумнодуговых печах, а также технология изготовления прутков.

* Правообладатель АО «ОДК».

Выплавку электродов из сплава ВЖ179-ИД проводили в 1,5 т вакуумно-индукционной печи Consarc; вакуумно-дуговой переплав слитков проводили с использованием кристаллизатора диаметром 290 мм. Далее на горизонтальном прессе с усилием 6300 тс по схеме двойного прессования в режиме сверхпластичности получали прутки диаметром 50 и 70 мм.

Опробована также прокатка на стане 350/250 прутков на диаметр 50 мм. При деформации слитков достигнут хороший уровень технологической пластичности, обеспечивший получение прутков диаметром 70 и 50 мм.

Проведена общая квалификация (паспортизация) прутков из сплава ВЖ179-ИД и выпущены технические условия на поставку прутков ТУ 14-131-1296–2020. Исследования полуфабрикатов проводили в Испытательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Для исследования микроструктуры применяли оптическую и электронную растворяющую микроскопию, а также микрорентгеноспектральный анализ для определения локального химического состава. Размер микрочерн определяли по ГОСТ 5639–82.

Определение температур фазовых превращений методом дифференциального термического анализа проводили в диапазоне температур от 20 до 1400 °С при нагреве со скоростью 20 К/мин в среде гелия.

Для определения видов, режимов и объемов испытаний в соответствии со стандартом НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ СТО 1-595-407–2012 «Паспортизация материалов для изделий авиационной и специальной техники» и ТЗ-0072–2017 (I этап, средние значения) разработана Программа паспортизации жаропрочного никелевого сплава марки ВЖ179-ИД.

В связи с тем, что предыдущие сплавы такого класса разрабатывали более 50 лет назад, многие характеристики свойств определены впервые.

Испытания образцов для определения кратковременных свойств проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 (при температуре 20 °С) и ГОСТ 9651–84 (при температурах 650–850 °С); пределов длительной прочности – по ГОСТ 10145–81 (при температурах 650–850 °С) на базах 10, 100 и 500 ч; ударной вязкости – по ГОСТ 9454–78 (при температурах 20–800 °С). Все испытания проводили на современных испытательных машинах [10].

Циклические испытания (многоцикловая (МнЦУ) и малоцикловая (МЦУ) усталость) проводили в соответствии с ГОСТ 25.502–79, испытания на определение скорости роста трещины усталости (СРТУ) при температурах 20, 750 и 800 °С – в соответствии с ASTM E 647 [11]. Все циклические испытания проводили на сервогидравлических испытательных машинах. Полученные экспериментальные данные обработаны при помощи линейного регрессионного анализа методом наименьших квадратов, где кривая аппроксимируется прямой линией в двойных логарифмических координатах $\log(dI/dN) - \log(\Delta K)$.

По результатам проведенных исследований выпущен паспорт на сплав ВЖ179-ИД.

Результаты и обсуждение

С учетом сложного легирования нового материала необходимо использовать технологию деформации, которая бы обеспечила получение прутков диаметром 50 мм с бездефектной поверхностью.

С этой целью разработаны режимы термомеханической обработки слитков и промежуточных заготовок с микродуплексной структурой, позволившей получить при температурах деформации материал в состоянии сверхпластичности.

Относительное удлинение образцов, испытанных при температурах деформации, составило 380–420 %.

Кроме того, помимо схемы двойного прессования, опробована также схема, по которой промежуточную заготовку получали прессованием с последующей прокаткой на круг диаметром 50 мм.

Для получения оптимального комплекса механических свойств сплава ВЖ179-ИД разработан специальный режим термической обработки.

В связи с тем, что сплав ВЖ179-ИД относится к сплавам с большим количеством упрочняющей γ' -фазы ($\geq 50\%$), при определении режимов закалки и старения руководствовались разработанными ранее положениями, которые использованы для сложнлегированных высокожаропрочных дисковых сплавов и обеспечивали получение однородной стабильной микроструктуры [5].

На рис. 1 представлена кривая дифференциальной сканирующей калориметрии сплава ВЖ179-ИД, свидетельствующая об отсутствии в структуре материала избыточных и топологически плотноупакованных фаз. Эти данные были взяты за основу при разработке термической обработки сплава.

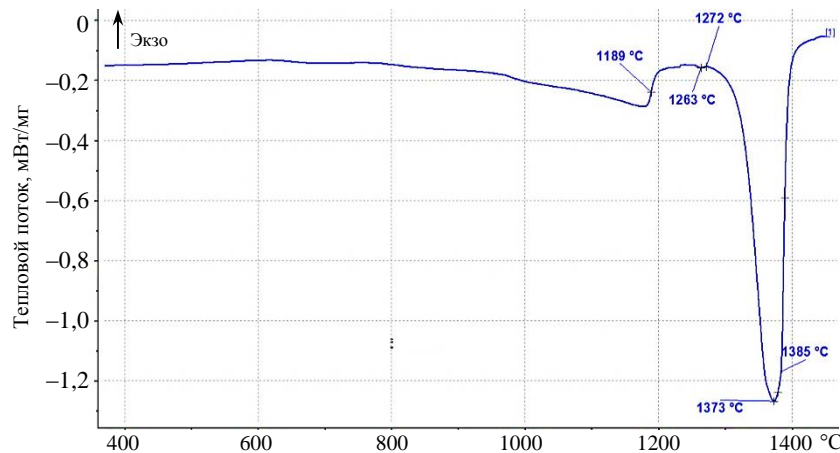


Рис. 1. Кривая дифференциальной сканирующей калориметрии сплава ВЖ179-ИД

Термическая обработка полученных прутков состояла из следующих операций:

- гомогенизирующий отжиг при температурах на 100–150 °С ниже температуры полного растворения γ' -фазы ($T_{п.р.\gamma'}$), обеспечивающий (благодаря релаксации напряжений в структуре, а также за счет частичного растворения мелких частиц γ' -фазы (0,1 мкм) и дальнейшего укрупнения частиц размером 5–10 мкм) повышение однородности твердого раствора, более равномерные и благоприятные условия для собирательной рекристаллизации в процессе закалки и получение однородного микрзерна (2–3 балла по ГОСТ 5639–82) [5, 12];

- закалка при температуре $T_{п.р.\gamma'}$, обеспечивающая однородную микроструктуру и наилучший комплекс механических свойств;

- двухступенчатое старение для создания условий максимального выделения γ' -фазы разной дисперсности; для получения стабильной структуры температура первой ступени старения выбрана в области начала растворения γ' -фазы, а второй ступени – в области, близкой к максимальной рабочей температуре лопатки.

Дополнительным критерием при выборе температуры закалки послужил размер рекристаллизованного микрзерна (рис. 2). В табл. 1 показано влияние размера зерна после закалки на время до разрушения при испытании на длительную прочность.

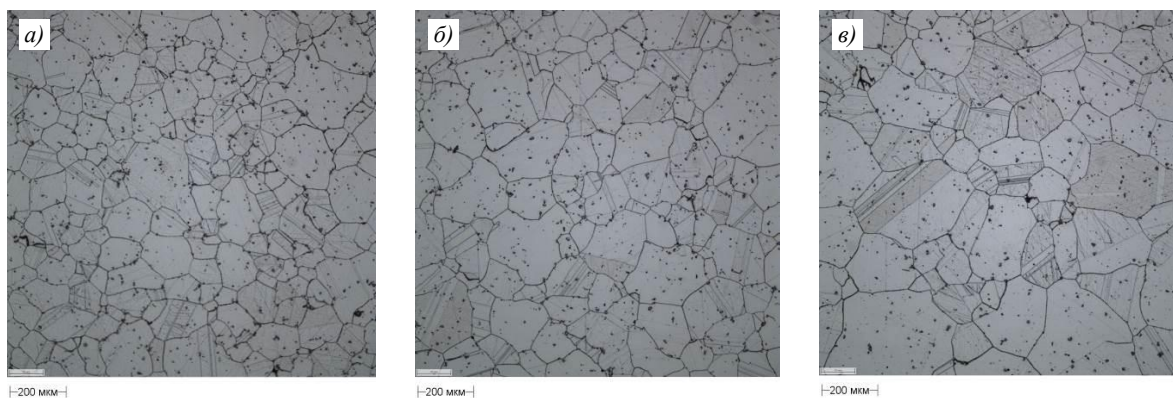


Рис. 2. Микроструктура ($\times 50$) прутка из сплава ВЖ179 с размером зерна 105 (а), 107 (б) и 135 мкм (в)

Таблица 1

Размер зерен прутка из сплава ВЖ179-ИД

Средний размер зерна, мкм	Время до разрушения, ч	Балл зерна
105	87	2–4
107	99	2–4
127	112	2–3
123	190	2–3
135	121	2
204	90	1–2

Установлено, что размер зерна влияет на время до разрушения при температуре 800 °С. Оптимальной температурой закалки будет та температура, которая обеспечивает средний размер зерна 120–135 мкм по ГОСТ 5639–82.

Типичная микроструктура прутков из сплава ВЖ179-ИД после термической обработки и дополнительной выдержки в течение 1000 ч приведена на рис. 3.

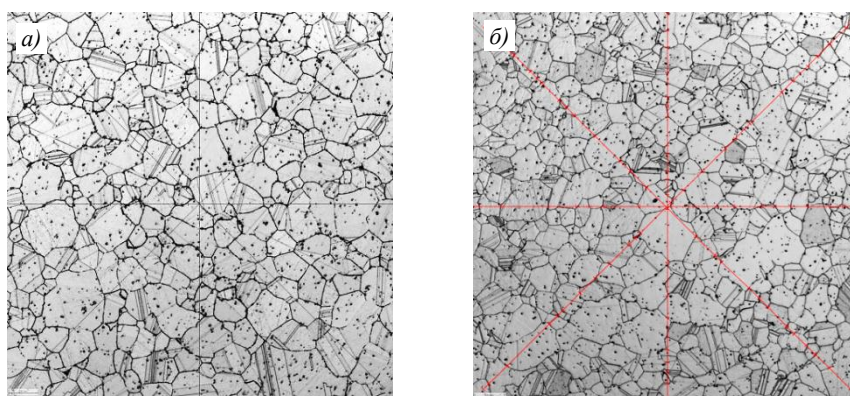


Рис. 3. Микроструктура ($\times 50$) прутка из сплава ВЖ179-ИД после полной термической обработки (а) и после полной термической обработки и дополнительной выдержки в течение 1000 ч (б)

Видно (рис. 3, а), что после полной термической обработки микроструктура прутков сплава ВЖ179-ИД однородная с размером зерна 2–3 балла по ГОСТ 5639–82. Структура сплава стабильная. После выдержки при максимальной рабочей температуре 800 °С в течение 1000 ч (рис. 3, б) изменений размера зерна не обнаружено, дополнительные выделения или топологически плотноупакованные фазы отсутствуют.

Средняя долговечность образцов, испытанных после выдержки на длительную прочность при температуре 800 °С и нагрузке 490 МПа, составила 179 ч.

Механические свойства, включая циклические характеристики прутков из сплава ВЖ179-ИД, приведены в табл. 2 и на рис. 4–6.

Таблица 2

Механические свойства сплавов для лопаток компрессора высокого давления

Температура испытания, °С	Свойства	Средние значения свойств для сплавов				Квоты превосходства сплава ВЖ179, %		
		ВЖ179-ИД	ЭП718-ИД*	ЭП220**	Inconel 718***	ЭП718-ИД	ЭП220	Inconel 718
	Максимальная рабочая температура, °С	800	700	950	650	14	–	23
20	Плотность, г/см ³	8,36	8,29	8,40	8,19	–	–	–
20–800	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	14,9	15,7	14,9	16,5	5	–	10
650	σ_{100}, MPa	1040	570	–	710	В 1,8 раза	–	В 1,5 раза
800		510	245	470	–	В 2,1 раза	9	–
20	σ_B, MPa	1400	1230	1040	1320	14	35	6
	$\sigma_{0,2}, MPa$	960	830	750	1060	16	28	–
	$\delta, \%$	20	27	12	12	–	В 1,4 раза	В 1,4 раза
800	σ_B, MPa	1000	670	930	–	В 1,5 раза	8	–
	$\sigma_{0,2}, MPa$	860	600	–	–	В 1,4 раза	–	–
	$\delta, \%$	17	19	9	–	–	В 1,8 раза	–
20	$KCU, Дж/см^2$	37,5	91,0	27,0	–	–	В 1,4 раза	–

* Свойства для прутка диаметром 90 мм после термической обработки [13].
 ** Свойства катаного прутка диаметром 45 мм после термической обработки [13].
 *** INCONEL® alloy 718 (AMS 5662, 5663, 5664) – свойства для прутка диаметром от 16 до 64 мм после термической обработки [14].

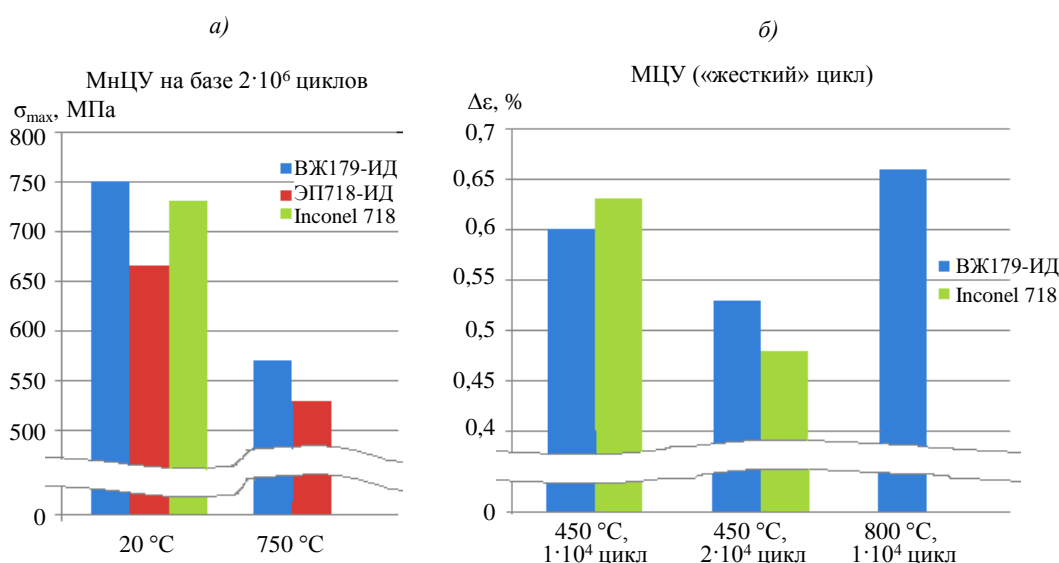


Рис. 4. Сравнение пределов ограниченной выносливости (средние значения) на гладких образцах из сплавов ВЖ179-ИД, ЭП718-ИД и Inconel 718: а – при контролируемой осевой нагрузке ($R_\sigma = 0$); б – при контролируемой деформации ($R_\epsilon = 0$)

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что кратковременные свойства сплава ВЖ179-ИД превосходят свойства сплава-аналога по применению (лопатки КВД) ЭП718-ИД на 14–16 % (при температуре 20 °С) и в 1,4–1,5 раза (при температуре 800 °С); по длительной прочности при температурах 650 и 800 °С – в 1,8 и 2,1 раза соответственно.

Превосходство над наиболее жаропрочным деформируемым сплавом ЭП220 для лопаток составляет по кратковременной прочности при 20 °С: 28–35 %, при 800 °С: 8 %, по длительной прочности при 800 °С: 9 %. Относительное удлинение сплава ВЖ179-ИД при этих температурах также больше в 1,4 и 1,8 раза соответственно.

При этом следует отметить, что такие важные для лопаток КВД свойства, как МнЦУ и МЦУ (рис. 4), у сплава ВЖ179-ИД больше, чем у применяемых в настоящее время сплавов ЭП718-ИД и Inconel 718 [14].

Сплав ВЖ179-ИД при испытании на длительную прочность не чувствителен к надрезу в диапазоне температур 650–850 °С ($\sigma_t^H / \sigma_t^{rn} > 1,15-1,2$).

Впервые для высокожаропрочных деформируемых сплавов для лопаток построены кривые скорости роста трещины усталости (СРТУ) при температурах 20, 750 и 800 °С**, графики которых представлены на рис. 5 и 6.

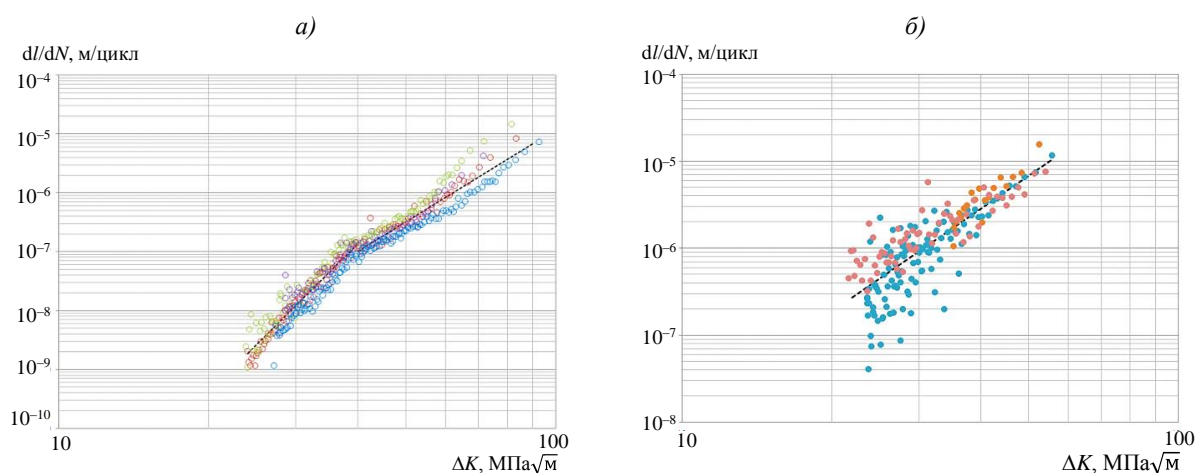


Рис. 5. Кривые скорости роста трещины усталости (СРТУ) для сплава ВЖ179-ИД при температурах 20 (а) и 800 °С (б)

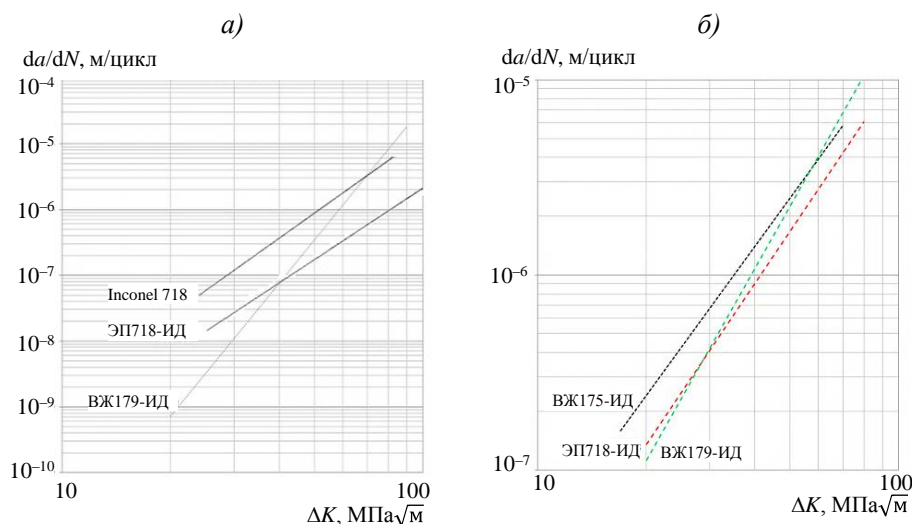


Рис. 6. Сравнение значений скорости роста трещины усталости (СРТУ) сплавов ВЖ179-ИД, ВЖ175-ИД, ЭП718-ИД и Inconel 718 при температурах 20 (а) и 750 °С (б) [14, 15]

** Работа выполнена в ИЦ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ под руководством к.т.н. М.А. Горбовца и И.А. Ходинаева.

Приведенные данные показывают, что сплав ВЖ179-ИД, существенно превосходящий сплавы-аналоги по прочностным и жаропрочным свойствам, по циклическим характеристикам полностью соответствует уровню серийных материалов или превосходит их.

С целью определения качества полученных по различным схемам деформации полуфабрикатов изготовлены образцы из прессованных и катаных прутков диаметром 50 мм производства АО «Металлургический завод «Электросталь» и проведены механические испытания. Результаты приведены в табл. 3 и 4 (все образцы доведены до разрушения).

Таблица 3

Результаты испытаний механических свойств (средние значения) при комнатной температуре прессованного и катаного прутков диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД

Схема деформации	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²
	МПа		%		
Двойное прессование	1400	960	20,0	21,0	37,5
Прессование + прокатка	1420	1010	18,5	18,0	38,0

Таблица 4

Результаты испытаний (средние значения) механических свойств и длительной прочности при температуре 800 °С прессованного и катаного прутков диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД

Схема деформации	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Время до разрушения, ч, при 800 °С и $\sigma = 490$ МПа
	МПа		%		
Двойное прессование	1000	860	16,5	19,5	204
Прессование + прокатка	1020	920	16,0	16,5	146

Анализ результатов основных механических свойств и длительной прочности показал, что прутки диаметром 50 мм, полученные по разным схемам деформации, из сплава ВЖ179-ИД имеют практически одинаковый уровень значений. Поэтому для изготовления полуфабрикатов из сплава применима как технология двойного прессования, так и прессования промежуточной заготовки с последующей прокаткой.

Заключения

Для лопаток КВД перспективных ГТД разработан и паспортизован высокожаропрочный деформируемый сплав ВЖ179-ИД, превосходящий по комплексу свойств применяемые в серийных двигателях зарубежные и отечественные сплавы.

В условиях промышленного производства предприятия АО «Металлургический завод «Электросталь» разработана технология получения прутков диаметром 50–70 мм и выпущены технические условия на поставку прутков ТУ 14-131-1296–2020.

Для достижения требуемых показателей по механическим свойствам проведены структурные исследования, результаты которых использованы при определении режимов термической обработки сплава.

Анализ результатов основных механических свойств и длительной прочности показал, что прутки диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД, полученные по разным схемам деформации (двойное прессование и прессование промежуточной заготовки с последующей прокаткой), имеют практически одинаковый уровень значений. Поэтому для изготовления полуфабрикатов из сплава применимы обе технологии.

Сплав ВЖ179-ИД рекомендован для опробования в производственно-эксплуатационных условиях для изготовления лопаток КВД, работающих при температуре до 800 °С.

Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Иноземцев А.А. Материалы и технологии для двигателя ПД-14 // Тез. Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России»: науч. электрон. изд. М.: ВИАМ, 2012. Ст. 16. 1 электрон. опт. диск.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
4. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
5. Ломберг Б.С., Чударева Л.Т., Серёгина Н.И. Влияние структуры сплава ЭП975-ИД на свойства крупногабаритных штамповок // Авиационные материалы. 1984. № 3. С. 9–17.
6. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
7. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
8. 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.
9. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2737835 Рос. Федерация. № 2020118382; заявл. 03.06.20; опубл. 03.12.20.
10. 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.
11. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
12. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978. 568 с.
13. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2018. Т. 2: Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. 248 с.
14. INCONEL® alloy 718. URL: <http://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel> (дата обращения: 24.01.2022).
15. Ходинев И.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование скорости роста трещины усталости в жаропрочных никелевых сплавах // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 48–63. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-48-63.

References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8. pp. 54–58.
2. Inozemtsev A.A. Materials and technologies for the PD-14 engine. *Proceedings of International Scientific and Technical Conference "New materials and technologies for deep processing of raw materials – the basis for the innovative development of the Russian economy"*. Moscow: VIAM, 2012, art. 16, 1 CD-ROM.
3. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Letnikov M.N., Mazalov I.S. The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.

4. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-2-3-11.
5. Lomberg B.S., Chudareva L.T., Seryogina N.I. Influence of the structure of the EP975-ID alloy on the properties of large-sized forgings. *Aviatsionnye materialy*, 1984, no. 3, pp. 9–17.
6. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
7. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
8. 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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
9. *Heat-resistant wrought nickel-based alloy and product made from it*: pat. 2737835 Rus. Federation, no. 2020118382; filed. 03.06.20; publ. 03.12.20.
10. Gorbovets M.A., Slavina A.V. Proof of material compliance with the requirements to part No. 33 of JARs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
11. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
12. Gorelik S.S. *Recrystallization of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 568 p.
13. *Aviation materials*: reference book in 13 vols. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2018. Vol. 2: Deformable heat-resistant steels and alloys. Alloys based on refractory metals, 248 p.
14. *INCONEL® alloy 718*. Available at: <http://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel> (accessed at: January 24, 2022).
15. Khodinev I.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V. Investigation of the growth rate of a fatigue crack in heat-resistant nickel alloys. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 4 (104), pp. 48–63. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-48-63.

Информация об авторах

Ломберг Борис Самуилович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ахмедзянов Максим Вадимович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чабина Елена Борисовна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Расторгуева Ольга Игоревна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Boris S. Lomberg, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maksim V. Akhmedzyanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena B. Chabina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga I. Rastorgueva, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.03.2022.
The article was submitted 21.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 09.03.2022.