

Конкурсная работа

Разработка и проведение общей квалификации (паспортизации) литейных сплавов ВЖЛ718, ВЖЛ125, ВЖЛ220, ВЖМ12

1. Введение

С целью обеспечения технологического суверенитета авиастроения Российской Федерации (РФ) и импортозамещения газотурбинного двигателя (ГТД) SaM146 из отечественных материалов, стоимость и эксплуатационные характеристики которых не должны уступать зарубежным материалам, а так же учитывая отсутствие российских материалов сравнимых по физико-механическим свойствам принято решение о проведении паспортизации материалов ВЖЛ718, ВЖЛ125, ВЖЛ220, ВЖМ12 для возможности применения в двигателе ПД-8.

На основании технических требований к зарубежным материалам ПАО «ОДК-Сатурн» совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ определили предварительный перечень применяемых в производстве отечественных материалов, планируемых для изготовления деталей двигателя ПД-8. Однако для наиболее ответственных деталей, таких как рабочие и сопловые лопатки турбин низкого и высокого давления (ТНД и ТВД), а также детали заднего стоечного узла двигателя ПД-8 требуется разработка новых литейных жаропрочных никелевых сплавов.

В рамках выполнения вышеуказанных работ определены материалы для проведения общей квалификации (паспортизации):

- ВЖЛ718 – аналог Inco718 (литейный вариант);
- ВЖЛ125 – аналог RENE125;
- ВЖЛ220 - аналог RENE220;
- ВЖМ12 – аналог AM1.

Разрез ТНД с применением материалов-аналогов приведен на рисунке 1.

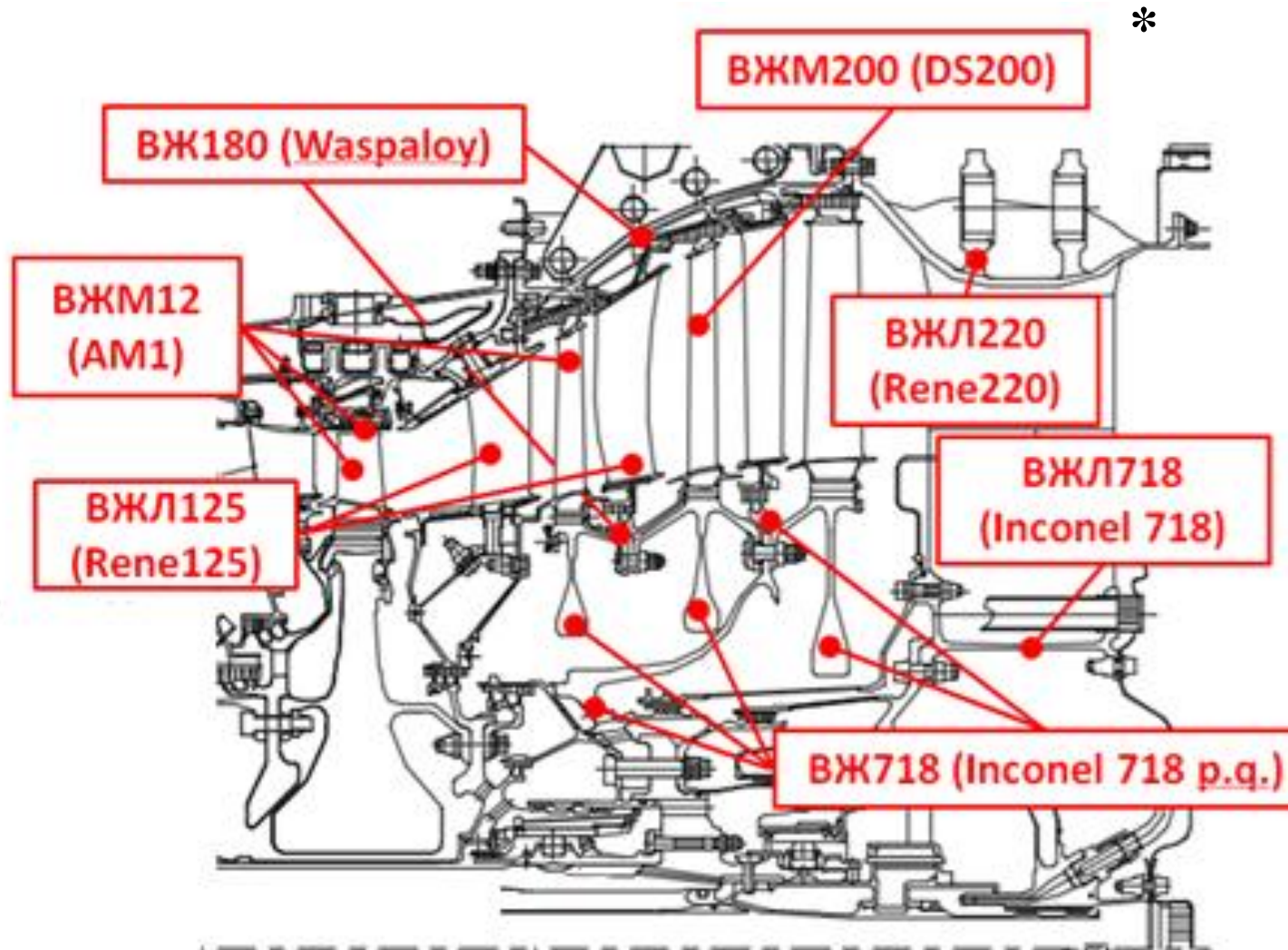


Рисунок 1 – Разрез ТНД с применением материалов-аналогов

* Паспортизация материала ВЖМ200 проводилась в рамках работ по освоению изделия «РФ»

2. Проведение контроля химического контроля шихтовых материалов-аналогов

Для определения оптимального химического состава паспортизируемых материалов на производственных мощностях НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ был проведен контроль химического состава шихтового материала переданного НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в качестве давальческого материала зарубежных сплавов-аналогов двигателя-прототипа производства иностранных фирм «Cannon Muskegon Corporation» и «HOWMET LTD». Результаты химического анализа представлены в таблицах 1-4.

Химический состав сплавов определяли методом атомно-эмиссионного анализа на спектрометре ROTIMA 8300 фирмы «PerkinElmer» в соответствии с МИ 1.2.036-2011, МИ 1.2.037-2011, МИ 1.2.038-2011 и методом волно-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии на установке S4 EXPLORER фирмы «Bruker Support» в соответствии МИ 1.2.071-2015

Таблица 1 Химический состав сплава Rene125 производства фирмы Cannon Muskegon Corporation

Место анализа	Содержание элементов, % масс.													
	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	W+Mo	W+Re	C	B	Zr
ФГУП «ВИАМ»	Осн.	9,65	8,76	6,91	1,81	4,86	2,30	3,73	1,51	8,72	6,91	0,11	0,015	0,031
Cannon Muskegon Corporation (СМС)	Осн.	9,70	8,84	6,85	1,86	4,89	2,37	3,78	1,55	8,71	6,85	0,109	0,015	0,03
Технические требования фирмы СМС, не более	Осн.	9,5–10,5	8,7–9,1	6,6–7,4	1,6–2,4	4,6–5,0	2,3–2,7	3,6–4,0	1,4–1,7	≥8,5	≤7,4	0,09–0,13	0,01–0,02	0,03–0,07
Место анализа	Содержание элементов, % масс.													
	Nb	Re	V	Pt	Pd	Mg	O	N	S	P	Fe	Si	Mn	Cu
ФГУП «ВИАМ»	0,004	0,0003	0,0011	<0,00005	<0,00002	0,0024	0,0004	0,0004	<0,0004	0,0002	0,021	0,008	0,00022	0,0002
СМС	<0,05	<0,05	<0,005	<0,01	<0,001	<0,01	0,0002	0,0004	0,0002	0,0008	0,02	<0,01	<0,001	0,001
Технические требования фирмы СМС, не более	0,1	0,1	0,1	0,3	0,15	0,01	0,0025	0,005	0,0075	0,01	0,2	0,10	0,10	0,1

Таблица 2 Химический состав сплава Inco718 производства фирмы Cannon Muskegon Corporation

Место анализа	Содержание элементов, % масс.											
	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti	Al+Ti	C	Co	B	Cu
ФГУП «ВИАМ»	52,7	18,8	18,6	5,06	3,10	0,56	0,91	1,47	0,062	0,010	0,0052	0,0036
СМС	52,33	18,98	Осн.	4,93	3,02	0,54	0,90	1,44	0,06	<0,05	0,005	0,005
Технические требования фирмы СМС, не более	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	Осн.	4,75 – 5,50	2,80 – 3,30	0,4 – 0,8	0,65 – 1,15	≤1,75	≤0,08	≤1,0	≤0,006	≤0,30
Место анализа	Содержание элементов, % масс.											
	Si	Mn	P	S	Bi	Pb	Se	Te	Tl	N	O	
ФГУП «ВИАМ»	0,021	0,010	0,0020	0,0020	0,00002	<0,00001	<0,00002	0,00003	<0,00001	0,0019	0,0007	
СМС	0,02	0,02	0,0016	0,0007	<0,00002	<0,00005	<0,0005	<0,0002	<0,00002	0,0018	0,0004	
Технические требования фирмы СМС, не более	0,35	0,35	0,015	0,015	0,00005	0,0005	0,0003	0,00005	0,0005	–	–	

Таблица 3 Химический состав сплава AM1 производства фирмы HOWMET LTD

Место анализа	Содержание элементов, % масс.											
	Ni	Ta	Cr	Co	W	Al	Mo	Ti	Hf	Fe	Nb	Mn
ФГУП «ВИАМ»	Осн.	7,98	7,42	6,42	5,50	5,40	2,01	1,22	0,0007	0,019	0,0157	0,0002
HOWMET LTD	Осн.	7,90	7,40	6,40	5,40	5,40	2,0	1,2	<0,1	<0,1	0,01	<0,01
Технические требования фирмы HOWMET LTD	Осн.	7,5 – 8,5	7,0 – 8,0	6,0 – 7,0	5,0 – 6,0	5,1 – 5,5	1,8 – 2,2	1,0 – 1,4	≤0,2	≤0,2	≤0,05	≤0,05
Место анализа	Содержание элементов, % масс.											
	Si	P	S	C	Cu	Sn	Ag	Pb	Bi	As	Cd	Ga
ФГУП «ВИАМ»	0,006	0,0002	0,001	0,004	<0,0006	0,00014	<0,000015	<0,00001	<0,00001	<0,0003	<0,0005	<0,0005
HOWMET LTD	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,0001	<0,0001	<0,00001	<0,0005	<0,0001	<0,0010
Технические требования фирмы HOWMET LTD, не более	≤0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,00005	0,0025	0,0025	0,0025
Место анализа	Содержание элементов, % масс.											
	In	Mg	Zr	B	O	N	Tl	Sb	Zn	Y	Se	Te
ФГУП «ВИАМ»	<0,00001	<0,0004	0,0007	0,0001	0,0008	0,0003	<0,00001	<0,00004	<0,0005	<0,0002	<0,0002	<0,00001
HOWMET LTD	<0,0001	<0,01	<0,01	<0,01	0,0003	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0002	<0,0020	<0,0001	<0,0001
Технические	0,0025	0,01	0,01	≤0,0	0,001	0,001	0,0001	0,0025	0,0025	0,002	0,000	0,0001

требования фирмы HOWMET LTD, не более				1							5	5	
---	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	---	---	--

Таблица 4 Химический состав сплава Rene220 производства фирмы Cannon Muskegon Corporation

Место анализа	Содержание элементов, % масс.									
	Ni	Co	Cr	Mo	Al	Ti	Ta	Nb	C	B
ФГУП «ВИАМ»	Осн.	12,2	18,9	3,31	0,46	1,01	3,13	5,05	0,03	0,004
СМС	Осн.	11,99	19,06	3,21	0,50	1,00	3,13	5,11	0,03	0,004
Технические требования фирмы СМС, не более	Осн.	11,0 – 13,0	18,0 – 20,0	3,0 – 3,4	0,4 –0,6	0,9 –1,1	3,0 –3,5	5,0 – 5,5	0,02 – 0,04	0,003 –0,005
Место анализа	Содержание элементов, % масс.									
	O	N	S	P	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zr
ФГУП «ВИАМ»	0,0007	0,0006	0,0008	<0,0003	0,029	0,014	0,0002	<0,0007	0,0005	0,0006
СМС	0,0006	0,0005	0,0006	0,0003	0,026	0,01	<0,001	0,001	<0,004	<0,001
Технические требования фирмы СМС, не более	0,003	0,0075	0,005	0,010	0,50	0,10	0,05	0,10	0,004	0,01

Анализ результатов химического анализа, представленных в таблицах 1-4, показывает, что химический состав переданных зарубежных сплавов марок Rene125, Inco718, AM1 и Rene220 соответствует техническим требованиям зарубежных производителей фирм СМС и HOWMET LTD.

3. Разработка стандартных образцов предприятия (СОП) сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12, ВЖЛ220

Стабильность химического состава по основным легирующим элементам является одним из критериев высокого качества сплава и способствует обеспечению требуемого уровня механических свойств жаропрочных сплавов. Современное спектральное оборудование (оптико-эмиссионные спектрометры, рентгенофлуоресцентные анализаторы) позволяет определять содержание легирующих элементов и на основании полученных результатов корректировать химический состав сплава во время плавки. Достоверные результаты анализа химического состава сплавов на

таким образом можно получить только при наличии стандартных образцов соответствующих сплавов.

Кроме того, учитывая узкие интервалы легирования в разработанных сплавах, для снижения погрешности определения при выходном и входном контроле необходимо, чтобы калибровка приборов на предприятии-изготовителе и предприятии-заказчике была выполнена по одним и тем же стандартным образцам.

Для изготовления комплектов СОП проведено шесть плавов сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, и пять плавов ВЖМ12, ВЖЛ220.

Для сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ220 и ВЖЛ718 заливка производилась методом равноосного литья по выплавляемым моделям на установке УППФ-У

Для сплава ВЖМ12 заливка производилась методом LMC (liquid metal cooling) на промышленной установке УВНК-9А с использованием монокристаллических затравок с кристаллографической ориентацией (КГО) <001>.

Определен химический состав выплавленных плавов – содержание легирующих элементов аттестовано с помощью методов атомно-эмиссионного и масс-спектрометрического анализа с предварительным растворением проб в смеси кислот. Для сплава ВЖЛ718 в комплект СОП был дополнительно включен образец иностранного металла (пл. №4V7156), химический состав которого аттестован во НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. Содержание легирующих и микролегирующих элементов выплавленных сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 переменных составов приведено в таблице 5 (протоколы испытаний №№ 11721-621-2020, 11148-621-2020, 11119-621-2020, 11804-621-2020).

Таблица 5 Содержание легирующих и микролегирующих элементов в сплавах ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 переменных составов

Марка сплава	№№ пл.	Содержание легирующих элементов, % масс.													
		Ni	C	Co	Cr	Fe	Nb	Al	W	Ti	Ta	Mo	Hf	Zr	B
ВЖЛ125	20-38к	Осн.	0,058	9,09	9,86	-	-	5,58	6,06	3,17	3,15	2,69	1,13	0,012	0,0003
	20-39к	Осн.	0,088	9,48	9,31	-	-	5,06	6,59	2,66	4,11	2,26	0,84	0,033	0,005
	20-36к	Осн.	0,11	9,56	8,79	-	-	4,93	6,82	2,34	3,76	1,82	1,37	0,044	0,020

	20-37к	Осн.	0,116	9,83	8,63	-	-	4,89	6,89	2,47	3,80	1,99	1,34	0,056	0,036
	20-40к	Осн.	0,156	10,56	8,56	-	-	4,62	7,58	2,29	3,47	1,71	1,47	0,10	0,039
	20-41к	Осн.	0,18	10,91	8,00	-	-	4,11	8,10	1,91	4,54	1,22	1,76	0,073	0,009
ВЖЛ1718	20-82к	52,3	0,26	-	16,6	21,0	4,10	1,02	-	1,12	-	3,81	-	-	-
	20-83к	52,9	0,12	-	17,5	19,5	4,50	0,70	-	1,41	-	3,34	-	-	-
	20-61Л	53,0	0,061	-	18,9	18,5	5,05	0,51	-	0,89	-	3,04	-	-	-
	20-84к	52,7	0,083	-	20,5	17,5	5,45	0,30	-	0,70	-	2,79	-	-	-
	20-85к	52,0	0,010	-	22,5	16,5	6,00	0,10	-	0,42	-	2,44	-	-	-
	4V7156	52,3	0,060	-	19,0	19,0	4,93	0,54	-	0,90	-	3,02	-	-	-
ВЖМ12	20-42к	Осн.	-	7,46	6,38	-	-	5,01	6,06	0,88	8,48	1,63	-	-	-
	20-43к	Осн.	-	6,95	6,91	-	-	4,42	6,55	0,46	8,93	1,22	-	-	-
	20-15к	Осн.	-	6,46	7,29	-	-	5,38	5,57	1,22	8,10	2,04	-	-	-
	20-44к	Осн.	-	5,95	7,90	-	-	5,79	5,04	1,54	7,48	2,31	-	-	-
	20-46к	Осн.	-	5,47	8,50	-	-	6,32	4,46	1,97	6,91	2,60	-	-	-
ВЖЛ220	20-76к	Осн.	0,056	10,01	20,8	-	4,58	0,97	-	1,42	2,60	3,74	-	-	0,0008
	20-77к	Осн.	0,037	10,97	19,8	-	5,50	0,60	-	1,2	3,29	3,47	-	-	0,0021
	20-5М	Осн.	0,030	11,98	18,7	-	4,94	0,49	-	1,01	3,28	2,73	-	-	0,0044
	20-81к	Осн.	0,013	13,06	17,7	-	5,59	0,065	-	0,6	3,83	3,01	-	-	0,0051
	20-80к	Осн.	0,010	14,03	16,6	-	6,10	0,77	-	0,91	2,58	2,72	-	-	0,0093

Из выплавленного металла изготовлено 4 комплекта стандартных образцов предприятия литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ1718, ВЖМ12, и ВЖЛ220. Оформлены паспорта СОП №№ СО-28-20, СО-30-20, СО-29-20, СО-31-20.

4. Разработка технических условий (ТУ) на литые прутковые заготовки сплавов ВЖЛ125, ВЖМ12, ВЖЛ220

На основании результатов контроля химического состава зарубежных сплавов-аналогов и разработанных с привлечением НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ отечественных литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ125, ВЖМ12, ВЖЛ220 выпущены технические условия на литые прутковые заготовки (ЛПЗ) из данных сплавов, содержащие в себе требования к поставке, маркировке, хранению, критериям химического состава и механических свойств:

- ТУ 1-595-3-1860-2019 «Литые прутковые заготовки из литейного жаропрочного никелевого сплава марки ВЖЛ125» (Приложение Г);

- ТУ 1-595-3-1861-2020 «Литые прутковые заготовки из литейного жаропрочного никелевого сплава марки ВЖМ12» (Приложение Д);

- ТУ 1-595-3-1874-2019 «Литые прутковые заготовки из литейного жаропрочного никелевого сплава марки ВЖЛ220» (Приложение Е).

ТУ 1-595-3-1659-2017 «Литые прутковые заготовки из литейного жаропрочного сплава марки ВЖЛ718» разработаны НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ ранее .

5. Разработка Программ и методик предварительных испытаний опытных партий сплавов ВЖЛ125, ВЖМ12, ВЖЛ220

Для установления соответствия опытных партий сплавов требованиям ТТ разработаны Программы и методики предварительных испытаний опытных партий литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ125, ВЖМ12, ВЖЛ220, включающие:

- определение химического состава;
- испытание на кратковременное растяжение;
- испытание на длительную прочность.

Для сплава ВЖЛ718 предварительные испытания проведены НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ ранее, за счет собственных средств института.

6. Изготовление и проведение приемочных испытаний опытных партий сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220

Изготовлены опытные партии сплавов ВЖЛ125 (пл. №20-103л), ВЖЛ718 (пл. №20-61Л), ВЖМ12 (пл. №20-100л), ВЖЛ220 (пл. №21ВЖЛ220-46Л) и проведены их приемочные испытания в соответствии с разработанными программами и методиками. Оформлены акты изготовления опытных партий.

Результаты приемочных испытаний опытных партий представлены в таблицах 6-13.

Таблица 6 Химический состав опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 (приемочные испытания)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.											
	Ni	Co	Cr	W	Al	Ta	Ti	Mo	Hf	C	Nb	Mg
20-103л (опытная партия)	Осн.	9,79	8,93	7,19	4,74	3,98	2,36	1,90	1,56	0,11	0,011	0,004

ТЗ и ТУ 1-595-3-1860-2020	Осн.	9,5 – 10,5	8,7 – 9,1	6,6 – 7,4	4,6 – 5,0	3,6 – 4,0	2,3 – 2,7	1,6 – 2,4	1,4 – 1,7	0,09 – 0,13	≤0,1	≤0,01
№ пл.	Содержание элементов, % масс.											
	Fe	Mn	Si	Re	Pt	Pd	Cu	P	S	N	O	
20-103л (опытная партия)	0,035	0,0005	0,031	0,0006	<0,0001	<0,001	0,0011	0,0002	0,0010	0,0015	0,0006	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1860-2020, не более	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,15	0,1	0,01	0,0075	0,005	0,0025	

Таблица 7 Химический состав опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ718 (приемочные испытания)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti	C	Co	W	Re	Hf	Zr
20-61Л (опытная партия)	52,8	18,9	18,5	4,95	3,04	0,51	0,89	0,061	0,007	0,001	0,0001	0,015	0,029
ТЗ и ТУ 1-595-3-1659-2017	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	17,0 – 20,0	4,65 – 5,4	2,8 – 3,3	0,3 – 0,7	0,65 – 1,15	0,02 – 0,08	≤1,0	≤1,0	≤0,02	≤0,03	0,03
№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Ta	Cu	Si	Mn	P	S	Re	Bi	Ag	Pb	N	O	
20-61Л (опытная партия)	0,0064	0,0054	0,071	0,0052	0,0013	0,0049	0,0001	0,00004	0,00007	<0,00001	0,0006	0,0034	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1659-2017, не более	0,1	0,2	0,2	0,1	0,015	0,005	0,02	0,0001	0,0005	0,001	0,005	-	

Таблица 8 Химический состав опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ12 (приемочные испытания)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.													
	Ni	Ta	Cr	Co	W	Al	Mo	Ti	C	Mg	Hf	Fe	Nb	
20-100л (опытная партия)	Осн.	7,99	7,69	6,43	5,66	5,23	1,96	1,23	0,0014	0,0012	0,0001	0,02	0,005	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1861-2020	Осн.	7,5 – 8,5	7,0 – 8,0	6,0 – 7,0	5,0 – 6,0	5,1 – 5,5	1,8 – 2,2	1,0 – 1,4	≤0,01	≤0,01	≤0,2	≤0,2	≤0,05	
№ пл.	Содержание элементов, % масс.													
	Mn	Si	Zr	B	P	S	Cu	Sn	Ag	Pb	Bi	O	N	
20-100л (опытная партия)	0,0003	0,008	0,0008	0,0001	0,00012	0,001	0,0006	0,0001	<0,00005	<0,00001	<0,00001	0,0005	0,0003	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1861-2020, не более	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,00005	0,001	0,001	

Таблица 9 Химический состав опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ220 (приемочные испытания)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.										
	Ni	Cr	Co	Nb	Ta	Mo	Ti	Al	C	Hf	W

21ВЖЛ220-46Л (опытная партия)	Осн.	18,97	12,00	5,21	3,16	3,25	1,04	0,54	0,032	0,035	0,22
ТУ 1-595-3-1874-2020	Осн.	18,0 – 20,0	11,0 – 13,0	5,0 – 5,5	3,0 – 3,5	3,0 – 3,4	0,9 – 1,1	0,4 – 0,6	0,02 – 0,04	<0,05	<0,5
№ пл.	Содержание элементов, % масс.										
	Mg	Zr	Fe	Mn	Si	Cu	P	S	N	O	
21ВЖЛ220-46Л (опытная партия)	0,0014	0,0014	0,023	0,0003	0,008	0,0007	0,0005	0,0007	0,0007	0,0019	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1874-2020, не более	0,004	0,01	0,5	0,05	0,1	0,1	0,01	0,005	0,0075	0,003	

Таблица 10 Механические свойства опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 (приемочные испытания)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение																Испытания на длительную прочность			
	T = 20 °C				T = 450 °C				T = 650 °C				T = 900 °C				T=870°C, σ=415МПа		T=950°C, σ=250МПа	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	δ ₅ , ч	τ, ч	δ ₅ , ч
20-103л	1090	970	5,2	13	1090	980	6,2	11	1080	930	7,4	14	790	710	13,5	24,5	106	11	90	8,1
	1140	930	10	12	1100	970	8,2	14	1110	930	9,8	15	770	700	9	28	121	11	71	11
ТЗ, не менее	1000	820	5	6	1000	820	5	10	1000	820	5	12	650	550	2	3	60	5	30	4
ТУ 1-595-3-1860-2020, не менее	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	830	5	-	-	-	-	-	60	5	30	4

Таблица 11 Механические свойства опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ718 (приемочные испытания)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение												Испытания на длительную прочность при T = 650 °C, σ = 620 МПа	
	T = 20 °C				T = 350 °C				T = 550 °C				τ, ч	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %		
20-61Л	990	910	14,5	29	850	810	12	32	770	730	8,8	29	70	
	870	740	13,5	25	800	660	23,5	29	780	640	18	33	64	
ТЗ, не менее	830	640	5	8	610	560	4	6	550	510	6	8	23	
ТУ 1-595-3-1659-2017, не менее	830	640	5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	23	

Таблица 12 Механические свойства опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ12 (приемочные испытания)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение при T = 650 °C				Испытания на длительную прочность			
					T = 850 °C, σ = 600 МПа		T = 1050 °C, σ = 180 МПа	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	δ ₅ , ч	τ, ч	δ ₅ , ч
20-100л	1220	1050	6,4	14	144	22	89	15,5
	1220	1050	6	13	128	24	93	27
ТЗ и ТУ 1-595-3-1861-2020, не менее	1050	985	5,0	6,0	60	10	60	10

Таблица 13 Механические свойства опытной партии литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ220 (приемочные испытания)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение	Испытания на длительную прочность

	T = 20 °C				T = 200 °C				T = 400 °C				T = 600 °C				T = 800 °C				T=650°C, σ=680МПа	T=750°C, σ=380МПа
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	τ, ч
21ВЖЛ220-46Л	1110	850	8	18	1130	740	20	20,5	1060	730	13	20	1050	720	12,5	17	650	550	20,5	45	268	172
	1150	850	6,8	11,5	1120	740	16	21,5	1100	720	17,5	26	920	670	15	20,5	620	530	14	25	189	131
ТЗ, не менее	1020	840	3	5,6	920	740	3,7	6,8	850	680	3,6	6,8	800	670	2,8	5,3	520	530	3,1	5,9	100	100
ТУ 1-595-3-1874-2020, не менее	1020	780	6	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100

На основании результатов приемочных испытаний опытной партии сплава ВЖЛ220 получено отклонение по условному пределу текучести

С целью повышения условного предела текучести сплава ВЖЛ220 в соответствии с требованием ТТ скорректирован его режим термической обработки заготовок образцов.

7. Разработка программ паспортизации сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220

Для определения видов, режимов и объемов испытаний для общей квалификации литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 разработаны Программы паспортизации указанных выше сплавов.

В программы паспортизации вошли следующие виды испытаний: определение характеристик кратковременной прочности и пластичности при нормальной и повышенных температурах; определение ударной вязкости при нормальной и повышенных температурах; определение пределов длительной прочности и ползучести при повышенных температурах на базах 10, 100, 500 ч и 1000 ч (для длительной прочности); пределов ограниченной выносливости МЦУ и МнЦУ на гладких образцах и образцах с надрезом при нормальной и повышенных температурах; определение твердости при нормальной температуре; характеристик общей коррозионной стойкости в условиях камеры солевого тумана, камеры тропического климата, а также природных условиях умеренного климата промышленной атмосферы (МЦКИ, г. Москва) и умеренно теплого климата приморской атмосферы (ГЦКИ, г. Геленджик), стойкости к сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии при

повышенных температурах, определение физических характеристик (плотности, удельного электросопротивления, температурного коэффициента линейного расширения, удельной теплоемкости, теплопроводности, температур фазовых превращений) сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220.

8. Выплавка опытно-промышленных партий сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 для проведения общей квалификации (паспортизации)

Для проведения общей квалификации выплавлено по две опытно-промышленные партии литейных жаропрочных никелевых сплавов марок ВЖЛ125 (плавки №№20ВЖЛ125-185В, 20ВЖЛ125-210В), ВЖЛ718 (плавки №№ 20ВЖЛ718-127В, 20ВЖЛ718-135В), ВЖМ12 (плавки №№20ВЖМ12-167В, 20ВЖМ12-195В) и ВЖЛ220 (плавки №№20ВЖЛ220-58В, 20ВЖЛ220-60В). Оформлены акты изготовления опытно-промышленных партий.

Результаты химического анализа представлены в таблицах 14-17. Результаты испытаний механических свойств представлены в таблицах 18-21.

Таблица 14 Химический состав литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.											
	Ni	Co	Cr	W	Al	Ta	Ti	Mo	Hf	C	Nb	Mg
20ВЖЛ125-185В	Осн.	9,69	8,73	6,86	4,84	3,78	2,41	1,86	1,51	0,12	0,017	0,0023
20ВЖЛ125-210В	Осн.	9,70	8,70	6,80	4,81	3,81	2,43	1,87	1,52	0,12	0,016	0,0019
ТЗ и ТУ 1-595-3-1860-2020	Осн.	9,5 – 10,5	8,7 – 9,1	6,6 – 7,4	4,6 – 5,0	3,6 – 4,0	2,3 – 2,7	1,6 – 2,4	1,4 – 1,7	0,09 – 0,13	≤0,1	≤0,01
№ пл.	Содержание элементов, % масс.											
	Fe	Mn	Si	Re	Pt	Pd	Cu	P	S	N	O	
20ВЖЛ125-185В	0,027	0,0003	<0,005	0,0050	<0,00005	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0012	0,0004	0,0008	
20ВЖЛ125-210В	0,024	0,0003	<0,005	0,0042	<0,00005	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0010	0,0005	0,0009	
ТУ 1-595-3-1860-2020, не более	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,15	0,1	0,01	0,0075	0,005	0,0025	

Таблица 15 Химический состав литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ718 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti	C	Co	W	Re	Hf	Zr
20ВЖЛ718-127В	53,65	18,13	18,06	5,07	3,00	0,68	0,94	0,064	0,29	0,22	0,019	0,014	0,020
20ВЖЛ718-135В	53,72	18,64	18,17	4,98	2,99	0,56	0,95	0,058	0,3	0,17	0,014	0,009	0,005
ТУ 1-595-3-1659-2017	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	17,0 – 20,0	4,65 – 5,4	2,8 – 3,3	0,3 – 0,7	0,65 – 1,15	0,02 – 0,08	≤1,0	≤1,0	≤0,02	≤0,03	0,03
№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Ta	Cu	Si	Mn	P	S	Re	Bi	Ag	Pb	N	O	
20ВЖЛ718-127В	0,032	0,0081	0,058	0,0058	0,002	0,004	0,019	<0,00001	<0,0001	<0,00001	0,0038	0,001	
20ВЖЛ718-135В	0,024	0,0034	0,06	0,0019	0,0035	0,0015	0,014	<0,00001	<0,0001	<0,00001	0,0026	0,003	
ТУ 1-595-3-1659-2017, не более	0,1	0,2	0,2	0,1	0,015	0,005	0,02	0,0001	0,0005	0,001	0,005	-	

Таблица 16 Химический состав литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ12 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Ni	Ta	Cr	Co	W	Al	Mo	Ti	C	Mg	Hf	Fe	Nb
20ВЖМ12-167В	Осн.	7,98	7,40	6,37	5,58	5,22	1,99	1,16	0,0010	0,0019	0,0001	0,011	0,0022
20ВЖМ12-195В	Осн.	7,88	7,78	6,38	5,48	5,22	2,00	1,21	0,0012	0,0013	0,0001	0,019	0,0048
ТУ 1-595-3-1861-2020	Осн.	7,5 – 8,5	7,0 – 8,0	6,0 – 7,0	5,0 – 6,0	5,1 – 5,5	1,8 – 2,2	1,0 – 1,4	≤0,01	≤0,01	≤0,2	≤0,2	≤0,05
№ пл.	Содержание элементов, % масс.												
	Mn	Si	Zr	B	P	S	Cu	Sn	Ag	Pb	Bi	O	
20ВЖМ12-167В	0,0001	0,003	0,0002	0,0001	0,0017	0,0006	0,0004	0,0006	<0,00003	<0,00001	<0,00001	0,0009	
20ВЖМ12-195В	0,0004	0,007	0,0009	0,0001	0,00015	0,0009	0,0005	0,00010	<0,00005	<0,00001	<0,00001	0,0006	
ТУ 1-595-3-1861-2020,	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,00005	0,001	

не более															
----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 17 Химический состав литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ220 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Содержание элементов, % масс.										
	Ni	Cr	Co	Nb	Ta	Mo	Ti	Al	C	Hf	W
20ВЖЛ220-58В	Осн.	18,83	12,04	5,17	3,15	3,31	1,02	0,47	0,032	0,031	0,28
20ВЖЛ220-60В	Осн.	19,01	11,95	5,25	3,20	3,22	0,98	0,50	0,027	0,034	0,26
ТУ 1-595-3-1874-2020	Осн.	18,0 – 20,0	11,0 – 13,0	5,0 – 5,5	3,0 – 3,5	3,0 – 3,4	0,9 – 1,1	0,4 – 0,6	0,02 – 0,04	≤0,05	≤0,5

№ пл.	Содержание элементов, % масс.										
	Mg	Zr	Fe	Mn	Si	Cu	P	S	N	O	
20ВЖЛ220-58В	0,0015	0,0011	0,024	0,0003	0,0033	0,0005	0,0004	0,0007	0,0006	0,0010	
20ВЖЛ220-60В	0,0012	0,0017	0,019	0,0004	0,003	0,0007	0,0005	0,0005	0,0007	0,0009	
ТЗ и ТУ 1-595-3-1874-2020, не более	0,004	0,01	0,5	0,05	0,1	0,1	0,01	0,005	0,0075	0,003	

Таблица 18 Механические свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение																Испытания на длительную прочность			
	T = 20 °C				T = 450 °C				T = 650 °C				T = 900 °C				T=870°C, σ=415МПа		T=950°C, σ=250МПа	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	δ ₅ , ч	τ, ч	δ ₅ , ч
	20ВЖЛ125-185В	1040 1080 1020	920 910 910	6,8 7,8 5	13 11 12	1000 1060 1100	910 920 930	5 7,8 8,8	11 13,5 15,5	1070 1070 1090 1080	840 850 890 880	7,8 6,8 7 7,8	14 12,5 14,5 14	770 780 780	740 790 730	11 15,5 12	25 23,5 17	119 119 109 85	12,5 13 12,5 10,5	82 88 59 62
20ВЖЛ125-210В	1050 1040	930 920	5,2 6	12 11	1040 1090 1100	930 930 930	5 7,4 8,2	13,5 11,5 15,5	1080 1100	890 890	5,8 8	12 13	780 780	730 730	7,6 11,5	23,5 26	135 112	13,5 14	78 88	7,9 10
ТЗ, не менее	1000	820	5	6	1000	820	5	10	1000	820	5	12	650	550	2	3	60	5	30	4
ТУ 1-595-3-1860-2020, не менее	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	830	5	-	-	-	-	-	60	5	30	4

Таблица 19 Механические свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ718 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение												Испытания на длительную прочность при T=650°C, σ=620МПа	
	T = 20 °C				T = 350 °C				T = 550 °C				τ, ч	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %		
20ВЖЛ718-127В	1080 1050	950 920	16,5 25	26 31	880 940	790 860	21,0 15,5	33 38	820 820	760 740	14,5 19,5	37 44	51 78 65	
20ВЖЛ718-135В	1100 1040 1010	1000 930 920	9,8 21,5 11	16,5 30 33	860 950 930	760 870 860	19 11,5 13	34 20 32	860 890 830	810 820 770	9,6 11 17,5	42 36 49	62 79 54	
ТЗ, не менее	830	640	5	8	610	560	4	6	550	510	6	8	23	

ТУ 1-595-3-1659-2017, не менее	830	640	5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	23
-----------------------------------	-----	-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Таблица 20 Механические свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ12 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение при T = 650 °С				Испытания на длительную прочность			
					T = 850 °С, σ = 600 МПа		T = 1050 °С, σ = 180 МПа	
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	δ ₅ , ч	τ, ч	δ ₅ , ч
20ВЖМ12-167В	1230	1020	6,6	11,5	133	24	60	19,5
	1220	1010	7	11	110	27	95	35
20ВЖМ12-195В	1240	1050	9,6	15,5	117	22,5	76	11
	1180	1010	9	15,5	117	28	75	32
ТЗ и ТУ 1-595-3-1861-2020, не менее	1050	985	5,0	-	60	10	60	10

Таблица 21 Механические свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ220 (опытно-промышленные партии)

№ пл.	Испытания на кратковременное растяжение																Испытания на длительную прочность					
	T = 20 °С				T = 200 °С				T = 400 °С				T = 600 °С				T = 800 °С				T=650°C, σ=680МПа	T=750°C, σ=380МПа
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	τ, ч	τ, ч
20ВЖЛ220-58В	1270	890	11,0	15,5	1080	790	7	19,5	1020	720	9	14,5	1040	720	10,5	16,0	660	570	4,8	13	191	150
	1170	860	6,4	14,5	1160	770	12	18,5	1110	750	10	17,5	1020	740	10,0	21,5	700	630	4,6	9,7	132	162
	1220	860	9	16,5	1160	770	12	18,5	1110	750	10	17,5	1020	740	10,0	21,5	700	630	4,6	9,7	132	162
20ВЖЛ220-60В	1240	840	13,0	21,5	1160	790	10,5	17	1130	720	12,0	19,5	1060	740	11,5	18,0	630	560	9,6	17,0	264	112
	1240	890	7,8	15	1140	780	10	19,5	1160	750	12,0	19,5	1080	740	9,4	17	640	580	9,6	14	173	104
	1240	890	7,8	15	1140	760	10,5	21	1110	710	11	15	1100	700	15	19,5	690	610	5,0	14	173	104
ТЗ, не менее	1020	840	3	5,6	920	740	3,7	6,8	580	680	3,6	6,8	800	670	2,8	5,3	520	530	3,1	5,9	100	100
ТУ 1-595-3-1874-2020, не менее	1020	780	6	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100

Из таблиц 14-21 видно, что химический состав и механические свойства опытно-промышленных партий литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ12, ВЖЛ125, ВЖЛ220 и ВЖЛ718 соответствуют требованиям ТУ на сплавы.

9. Разработка и оформление паспортов на сплавы ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220

На основе проведенных испытаний разработаны и оформлены паспорта №№ 2013 «Литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖЛ125», 2009 «Литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖЛ718», 2012 «Литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖМ12» и 2014 «Литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖЛ220» на литейные

жаропрочные никелевые сплавы марок ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 со следующей областью применения:

- Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ125 предназначен для изготовления турбинных лопаток, работоспособных при температурах до 1000 °С.

- Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ718 предназначен для изготовления корпусных деталей ГТД, работоспособных при температурах до 650 °С;

- Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖМ12 предназначен для изготовления турбинных рабочих лопаток с монокристаллической структурой, работоспособных при температурах до 1100 °С и кратковременно до температуры 1150 °С.

- Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ220 предназначен для изготовления корпусных деталей ГТД, работоспособных при температурах до 750 °С.

Квоты превосходства сплавов ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖМ12 и ВЖЛ220 над зарубежными сплавами-аналогами Rene125, Inco718, AM1 и Rene220 представлены в таблицах 28-31.

Таблица 22 Сравнительные показатели свойств сплава ВЖЛ125 с зарубежным аналогом Rene125 (NK10CWATaTD)

Наименование характеристики	ВЖЛ125 (РФ)	NK10CWATaTD ¹ (Франция)	Квоты превосходства, %	
T, °С	Длительная прочность (средние значения)			
900	σ_{100} , МПа	345	330	5
	σ_{500} , МПа	265	240	10
	σ_{1000} , МПа	230	210	10
1000	σ_{100} , МПа	150	140	7
	σ_{500} , МПа	95	90	6
–	Механические свойства при испытаниях на кратковременное растяжение (средние значения)			
900	σ_B , МПа	780	710	10
	$\sigma_{0,2}$, МПа	732	670	9
	δ , %	11,5	4,3	в 2,7 раза
1000	σ_B , МПа	490	410	20
	$\sigma_{0,2}$, МПа	380	370	1
	δ , %	14	5	в 2,8 раза
1100	σ_B , МПа	261	230	13
	$\sigma_{0,2}$, МПа	210	210	-
	δ , %	10,5	7,5	в 1,4 раза

¹DMD 0429 Snesta (Франция); Представлены свойства для отливок с равноосной структурой после термической обработки.

Таблица 23 Сравнительные показатели свойств сплава ВЖЛ718 с зарубежным аналогом Inco718 (NC19FeNb)

Наименование характеристики		ВЖЛ718 (РФ)	NC19FeNb ¹ (Франция)	Квоты превосходства, %	
Т, °С		Механические свойства при испытаниях на кратковременное растяжение (средние значения)			
20	σ_B , МПа	1060	990	7	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	940	880	7	
	δ , %	17	9	1,9 раза	
350	σ_B , МПа	910	870	5	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	830	775	7	
	δ , %	16	7,5	2,1 раза	
400	σ_B , МПа	870	850	2	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	810	770	5	
	δ , %	15,5	7,5	2,1 раза	
500	σ_B , МПа	830	810	3	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	770	750	3	
	δ , %	16	9	1,8 раза	
550	σ_B , МПа	840	800	5	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	780	730	7	
	δ , %	14,5	10	1,5 раза	
600	σ_B , МПа	810	780	4	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	750	730	3	
	δ , %	15,5	10	1,6 раза	
650	σ_B , МПа	800	760	5	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	740	700	6	
	δ , %	14	8,5	1,6 раза	
700	σ_B , МПа	680	670	2	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	640	630	2	
	δ , %	8,6	5,7	1,5 раза	
Предел ограниченной выносливости при МЦУ на базе $1 \cdot 10^4$ циклов при $R_\varepsilon = 0$, $f=1$ Гц (средние значения)					
350	$\Delta\varepsilon$, %	на гладких образцах	0,65	0,62	5

¹DMD 0423 Snesta (Франция).

Таблица 24 Сравнительные показатели свойств сплава ВЖМ12 с зарубежным аналогом AM1 (NTa8CKWA)

Наименование характеристики		ВЖМ12 (РФ)	NTa8CKWA ¹ (Франция)	Квоты превосходства	
Т, °С		Длительная прочность (средние значения)			
1100	σ_{100} , МПа	135	127	6	
Механические свойства при испытаниях на кратковременное растяжение (средние значения)					
1000	σ_B , МПа	730	620	18	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	545	420	30	
	δ , %	29	17	в 1,7 раз	
1100	σ_B , МПа	440	370	19	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	315	225	40	
	δ , %	34	18	в 1,9 раз	
1150	σ_B , МПа	310	270	15	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	220	175	26	
	δ , %	33	18,5	в 1,8 раз	
Предел ограниченной выносливости при МнЦУ на базе $1 \cdot 10^7$ циклов при $R_\sigma = -1$ (0), $f=50$ Гц на гладких образцах (средние значения)					
20	σ_{max} , МПа	-	400	300 ²	33
Предел ограниченной выносливости при МЦУ на базе $1 \cdot 10^4$ циклов («жесткий цикл») при $R_\sigma = 0$, $f=1$ Гц на гладких образцах (средние значения)					
650	σ_{max} , МПа	-	645	600	8

¹DMD 0479 Snesta (Франция).
² Представлены значения предела ограниченной выносливости МнЦУ $\Delta\sigma/2$ на базе $1 \cdot 10^7$ циклов при $R_\sigma = 0$. По соответствующей диаграмме Гудмана амплитуды напряжений эквивалентны при $R_\sigma = -1$.

Таблица 25 Сравнительные показатели свойств сплава ВЖЛ220 с зарубежным аналогом Rene 220 (NiCr19Co12NbTaMo)

Наименование характеристики		ВЖЛ220 (РФ)	NiCr19Co12NbTaMo ¹ (Франция)	Квоты превосходства, %	
Т, °С		Механические свойства при испытаниях на кратковременное растяжение (средние значения)			
20	σ_B , МПа	1230	1165	6	
	δ , %	9,4	5,8	в 1,6 раза	
200	σ_B , МПа	1140	1075	6	
	δ , %	10	7,1	в 1,4 раза	
400	σ_B , МПа	1110	1010	10	
	δ , %	11	7	в 1,6 раза	
600	σ_B , МПа	1060	960	10	
	δ , %	11,5	5,3	в 2,2 раза	
700	δ , %	9	4,6	в 2 раза	
750	δ , %	8	4,8	в 1,7 раза	
800	δ , %	6,7	6	12	
Предел ограниченной выносливости при МЦУ на базе $1 \cdot 10^4$ циклов при $R_\sigma = 0$, $f=1$ Гц (средние значения)					
750	$\Delta\epsilon$, %	на гладких образцах	0,5	0,45	11

¹DMD 0472 Snesta (Франция).

Главный металлург
Начальник ТО УГМет

В.И. Шабров
А.В. Троицкий