



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА
СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК БЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ИЗ РЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА ЖС32-ВИ

Начальник отдела турбин ОКБ
службы генерального конструктора

С.В. Наздрачев

Самара 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Лист
ВВЕДЕНИЕ	3
1 О возможности применения сплава ЖС32-ВИ.....	5
2 О макроструктуре сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ.....	7
3 Отработка технологии изготовления сопловых секций 1 ступени из сплава ЖС32-ВИ.....	12
4 Экспериментальная проверка секционных лопаток с различной макроструктурой	20
ВЫВОДЫ.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Сопловые лопатки турбины, как правило, являются наиболее теплонапряжёнными деталями двигателя. Образовавшаяся в 1960е годы тенденция к опережающему росту $T^*_{г}$ по сравнению с жаропрочностью и жаростойкостью конструкционных материалов привела к тому, что в современных авиационных двигателях температура газа, окружающая сопловые лопатки, превышает предельно допустимую температуру материала на 800-1000 °С. Из этого следует, что должны быть приняты все возможные меры для обеспечения приемлемого теплового состояния лопаток, соответствующие возможностям применяемых сплавов.

До недавнего времени (приблизительно до 2010 г.) в отечественном двигателестроении работоспособность сопловых лопаток 1 ступени при повышении $T^*_{г}$ обеспечивалась, в первую очередь, за счёт увеличения расхода охлаждающего воздуха. Такой подход был обусловлен практически безальтернативным применением сплава ЖС6У-ВИ, обеспечивающего работоспособность до 1050 °С [1]. В результате, на двигателях 5 поколения (типа изделия 30, ПД-14) на охлаждение сопловых лопаток 1 ступени из сплава ЖС6У-ВИ затрачивалось более 10 % от всего расхода воздуха, проходящего через внутренний контур двигателя. Развитое плёночное охлаждение, включающее завесы от стыка жаровой части камеры сгорания, перфорацию кромок, спинки, корыта и полок, приводит к снижению КПД турбины высокого давления на величину до 1,5 % за счёт потерь на смешение холодного воздуха с горячим газом.

Дальнейшее совершенствование высокотемпературных турбин потребовала применения для сопловых лопаток более жаростойких и жаропрочных сплавов по сравнению с ЖС6У. В частности, были опробованы варианты сопловых лопаток для двигателя ПС-90А2 из сплавов ЖС32-ВИ (t_{max} до 1150 °С), ВКНА1-В (t_{max} до 1200-1250 °С). Для изделия «30» в

рамках НИР опробованы сплавы ВКНА1-ВР, ВКНА-4 в различных вариантах исполнения. Следует отметить, что сопловые лопатки из указанных новых сплавов применялись в **одиночном** исполнении, которые по сравнению с блочными обладают рядом принципиальных недостатков:

- увеличенным числом уступов по стыкам соседних лопаток, что снижает КПД турбины и повышает утечки охлаждающего воздуха;

- большим весом за счёт большего числа стыковочных и уплотнительных элементов.

Учитывая успешный опыт применения сплава ЖС32-ВИ для изготовления рабочих лопаток, проведены работы для его адаптации к изготовлению сопловых лопаток первой ступени изделия «РФ». Профицит жаропрочности и жаростойкости благодаря применению лучшего сплава будет использован для снижения затрат охлаждающего воздуха, а блочная конструкция лопаток позволит реализовать заложенную в проект турбины высокую экономичность и весовые требования.

В настоящем представлении приведены сведения о проведённых опытных работах по освоению технологии получения сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ **блочной** конструкции, которые обладают рядом неоспоримых преимуществ перед одиночными, и их экспериментальной проверке, выполненных на ПАО «Кузнецов», в рамках подготовки технологий к использованию их в изделии «РФ».

Сопловые лопатки изделия «РФ» для достижения проектных величин КПД турбин проектировались в рамках жёсткого ограничения расхода охлаждающего воздуха, что привело к необходимости замены материала ЖС6У на новый, допускающий работу при температуре до 1150-1180 °С, что превышает на 100-120 °С предел работоспособности традиционно применявшегося ранее сплава ЖС6У.

1 О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВА ЖС32-ВИ

Паспорт на сплав ЖС32-ВИ [2] указывает его область применения – лопатки газотурбинных двигателей, отлитых методом высокоскоростной кристаллизации. В двигателестроительной отрасли имеется опыт применения этого сплава для изготовления рабочих и сопловых лопаток турбины как с монокристаллической, так и с поликристаллической (столбчатой) структурой.

По химическому составу сплав ЖС32-ВИ по сравнению с традиционными лопаточными материалами типа ЖС6У-ВИ, ЖС6Ф-ВИ отличается наличием редкоземельных элементов. Содержание углерода в сплаве ЖС32 составляет 0,13-0,18 %, т.е. оно сопоставимо со сплавами ЖС6У-ВИ (0,1-0,2 %), ЖС30-ВИ, ЖС6Ф-ВИ. Поскольку упрочнение границ зёрен в них определяется, в основном, наличием карбида вольфрама, то при прочих равных условиях содержание в составе сплава углерода является критерием допустимости отклонения макроструктуры отливок от чисто монокристалльной.

На СНТК им. Н.Д. Кузнецова имеется опыт применения сплава ЖС32-ВИ, полученный в 1980-1990х годах при создании изделий НК-93, НК-110, НК-44, доводке и модификации изделия НК-86А.

Так, при создании двигателя НК-93 альбомы макроструктур допускали наличие границ зёрен на пере и, в особенности, на замковой части рабочих лопаток и распространялись в равной степени на материалы ЖС30-ВИ и ЖС32-ВИ. Было изготовлено порядка 200 рабочих лопаток из материала ЖС32, наработка которых на экспериментальных установках и полноразмерных изделиях достигала 220 часов. Дефектов по границам зёрен не отмечалось. В то же время, технологическая апробация безуглеродистого ($C < 0,02\%$) сплава ЖС30М и испытания натуральных рабочих лопаток из него показали, что наличие границ зёрен приводит к развитию по ним трещин при изготовлении – в момент шлифования замков и полок – и при нагружении в составе изделий.

Обобщение многочисленных лабораторных исследований образцов и натуральных лопаток после различных видов нагружения и испытаний в составе опытных изделий позволили сделать вывод о **достаточности упрочнения границ зёрен** сплава ЖС32-ВИ в лопатках **поликристаллической столбчатой структуры** с преимущественным ориентированием КГО [001] вдоль оси основного действующего напряжения в интервале температур 900-1100 °С.

С учётом значительно большей ожидаемой температуры материала сопловых лопаток изделия «РФ», работа по адаптации сплава ЖС32-ВИ преследовала следующие цели:

1) Исследование влияния границ зёрен сплава на механические свойства ЖС32-ВИ при более высокой температуре испытаний.

2) Отработка технологии литья блочных лопаток с различной макроструктурой и выбор наилучшего варианта по сочетанию свойств технологичности и надёжности.

3) Оценка работоспособности секционных сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ с различной макроструктурой в условиях предельных рабочих температур.

2 О МАКРОСТРУКТУРЕ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ЖС32-ВИ

Поскольку литьё лопаток в секционном исполнении без границ зёрен в настоящее время практически неосуществимо, потребовалось разработать предварительные критерии допустимой макроструктуры сопловых лопаток, включающие количество, расположение и ориентацию границ зёрен.

Эта задача решалась путём сравнения механических свойств стандартных образцов из сплава ЖС32-ВИ с регламентированным малым количеством границ зёрен и образцов с заведомо большим их числом.

Образцы с малым количеством границ зёрен были получены по технологии **направленной** кристаллизации (НК) с КГО, близкой к [001]. Образцы с большим количеством границ зёрен получены по технологии **равноосной** кристаллизации.

Результаты выборки испытаний стандартных образцов при 900 °С и 1000 °С приведены далее в таблицах 1- 6.

Таблица 1 – Механические свойства образцов с **равноосной** структурой (РС)

$T_{исп}, ^\circ C$	Усл. № образца	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
700	1	101,6	87,2	3,6	7,3
	2	103,6	86,3	2,4	8,2
800	3	97,7	85,1	4,4	8,1
	4	100,6	84,6	3,6	7,5
850	5	92,8	82,3	2,8	6,2
	6	83,6	81,2	4,8	7,5
900	7	86,9	83,4	3,2	7,7
	8	80,9	72,0	1,6	1,6
	9	84,8	82,5	4,4	6,1
950	10	74,5	73,5	4,4	3,5
	11	79,0	73,9	3,2	3,0
1000	12	69,0	67,3	2,8	2,0
	13	74,2	65,8	3,2	2,4

Таблица 2 – Длительная прочность образцов с **равноосной** структурой

$T_{исп}, ^\circ C$	Усл. № образца	Действующие напряжения, кгс/мм ²	Время до разрушения, час
700	1	90	0 ³⁰
	2		1 ⁰⁰
	3		8 ⁵⁰
	4	75	311 ³⁰
	5		368 ²⁰
800	6	65	1 ⁰⁰
	7		14 ⁰⁰
	8		21 ³⁰
	9	55	149 ²⁰
	10		513 ⁴⁵
	11	50	149 ³⁰
12	796 ⁰⁰		
850	13	50	18 ⁰⁰
	14		69 ⁰⁰
	15		137 ⁰⁰
	16		384 ⁴⁵
900	17	40	139 ⁰⁰
	18		280 ⁰⁰
950	19	25	255 ⁰⁰
	20		285 ⁵⁰
1000	21	20	162 ⁰⁰
	22		252 ¹⁵
	23	15	364 ⁰⁰
	24		407 ⁰⁰

Таблица 3 – Средние свойства образцов с **равноосной** структурой

$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	Время до разрушения, час	
					σ_{25}	σ_{50}
700	102,6	86,75	3,0	7,7	-	-
800	99,15	84,85	4,0	7,8	-	-
850	88,2	81,75	3,8	6,8	-	-
900	84,2	79,3	3,1	5,1	-	31,2
950	76,75	73,7	3,8	3,2	-	-
1000	71,6	66,55	3,0	2,2	24,2	-

Таблица 4 – Механические свойства образцов с **направленной** кристаллизацией

$T_{исп}, ^\circ C$		$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
900	Образец 1	98,1	86,5	8,0	8,6
	Образец 2	95,4	91,5	14,8	13,5
	Образец 3	93,9	-	14,8	12,0
1000	Образец 1	67,2	-	15,2	21,2
	Образец 2	70,8	66,2	7,2	15,3
	Образец 3	78,5	73,5	9,2	8,9

Таблица 5 – Длительная прочность образцов с **направленной** кристаллизацией

$T_{исп}, ^\circ C$		Время до разрушения, час	
		σ_{25}	σ_{50}
900	Образец 1	-	84→
	Образец 2	-	84→
	Образец 3	-	84→
1000	Образец 1	78	-
	Образец 2	87→	-
	Образец 3	38 ³⁰	-

Таблица 6 – Средние свойства образцов с **направленной** кристаллизацией

$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	Время до разрушения, час	
					σ_{25}	σ_{50}
900	95,8	89	12,53	11,37	-	84
1000	72,17	69,85	10,53	15,13	67,8	-

Проведённые испытания образцов с **направленной** структурой показали соответствие свойств сплава паспортным данным.

Испытания образцов с **равноосной** структурой показали, что:

- их кратковременная прочность находится на том же уровне, что и НК;
- имеется достаточно высокий уровень длительной прочности при 900 и 1000 °С (на уровне ~80% от паспортного;)
- пластичность РС понижена в 2-3 раза по сравнению с НК.

Таким образом, по результатам испытаний стандартных образцов с различным количеством и ориентацией границ зёрен, были сделаны следующие **выводы**:

1) макроструктура сплава не оказывает существенного влияния на механические характеристики прочности при низких температурах;

2) свойства сплава ЖС32-ВИ в варианте НК соответствует паспорту во всём интервале температур испытания образцов;

3) наличие большого количества границ зёрен приводит к снижению длительной прочности и пластичности при высоких температурах, что, в свою очередь, негативно повлияет на ресурсные показатели реальных деталей по длительной прочности и МЦУ. Также различная КГО равноосных зёрен, попадающих на рабочую зону стандартных образцов, приводит к большому разбросу свойств;

4) границы зёрен, ориентированные вдоль оси основного действующего напряжения, не влияют на свойства сплава ЖС32-ВИ.

Также была предпринята попытка повышения пластичности сплава ЖС32-ВИ с равноосной структурой путём термической обработки (ТО) по режимам как для монокристалльного сплава. Образцы с ТО показали снижений свойств сплава по длительной прочности до 10 %, по пластичности в 8-10 раз.

Сделано заключение о возможности проведения высокотемпературной термической обработки (ВТВО) для сплава в варианте с направленной структурой и об исключении ВТВО для равноосной структуры.

Полученные данные позволили сформировать принципиальные требования к макроструктуре блочных сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ:

– допустимость малого количества продольных границ зёрен на перьях;
– исключение поперечных границ зёрен в местах с большими термическими напряжениями;

– допустимость малого количества границ зёрен на полках, ориентированных вдоль действия термических напряжений.

Эти требования в связи с наличием объёмного напряжённого состояния, отсутствием явно выраженного основного действующего напряжения и неопределённым напряжённо-деформированным состоянием лопатки при пере-

ходных процессах были переформулированы и легли в основу ТУ01.2998 – «Сопловые лопатки турбины из малоуглеродистых жаропрочных сплавов, отлитые методом направленной кристаллизации (опытные партии)».

Основные требования сформулированы следующим образом:

– макроструктура лопаток с направленной кристаллизацией должна состоять из столбчатых, вытянутых вдоль оси кристаллов и соответствовать утвержденным образцам;

– на верхней и нижней полках допускается наличие границ нескольких кристаллов. Для одиночных лопаток количество границ не должно превышать 2 штук на каждой из полок. Для секций количество границ не должно превышать 2 штук между соседними лопатками, и суммарно не должно превышать 8 штук на каждую из полок.

– выход границ кристаллов на выходную кромку пера в зоне 20 мм от верхней полки не допускается;

– рекристаллизационный слой не допускается.

Имеющиеся на предприятии возможности испытательного оборудования не позволили выполнить испытания стандартных образцов при более высоких температурах (целевой уровень – до 1250 °С).

Учитывая относительно низкую напряжённость сопловых лопаток, достаточно высокий уровень свойств сплава с равноосной структурой и имеющуюся технологическую базу, работы по определению возможности применения поликристаллических сопловых лопаток из ЖС32-ВИ были продолжены как в варианте равноосной, так и направленной кристаллизации.

3 ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОПЛОВЫХ СЕКЦИЙ 1 СТУПЕНИ ИЗ СПЛАВА ЖС32-ВИ

В рамках реализации программы отработки сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ были изготовлены секции сопловые I ступени 152.410.001-5 с равноосной и направленной структурой из сплава ЖС32-ВИ.

Для получения отливок лопаток соплового аппарата I ступени в соответствии с требованиями КД были использованы модели лопаток цеха №7 ПАО «Кузнецов» деталей двигателя-прототипа 152.410.001-5 из массы ЗГВ101. Отливки лопаток с **равноосной** структурой заливались в цехе №7 ПАО «Кузнецов» по серийному процессу цеха с учётом корректировки под сплав ЖС32-ВИ. Сборка в блок (рис.1) и формирование керамического покрытия осуществлялось в цехе №7 по серийной технологии для детали 152.410.001-5.

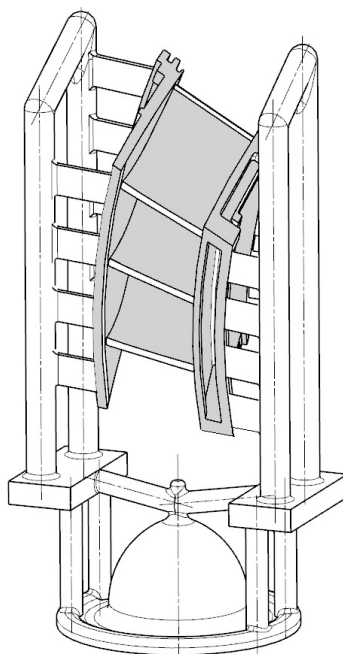


Рисунок 1 – Литейный блок сопловых лопаток 1 ступени (РС)

Плавка металла и заливка форм осуществлялась на индукционной плавильной установке Т- 7146, по режимам:

ТППФ= 1100 °С; Тпер=1650 °С; Тзал= 1580-1585 °С

Ni-I лигатура (модификатор для уменьшения размеров макрозёрен) не использовалась.

Полученные отливки в количестве 7 шт. обрабатывались по серийному технологическому процессу цеха: удаление стержня в бифториде калия, рентгенконтроль, ЛЮМ-контроль, подгонка профиля пера лопаток по профильному и трактовому приборам. В связи с несовершенством имеющейся оснастки оценка выхода годного не производилась.

Секции лопаток соплового аппарата с направленной структурой изготавливались в цехе №55 ПАО «Кузнецов» с использованием моделей цеха №7.

Для определения оптимальной сборки лопаток, с целью получения направленной структуры и минимального количества границ зерен по перу и полкам лопаток, были собраны различные варианты сборок лопаток с кристалловодом и различными питателями (рис. 2).

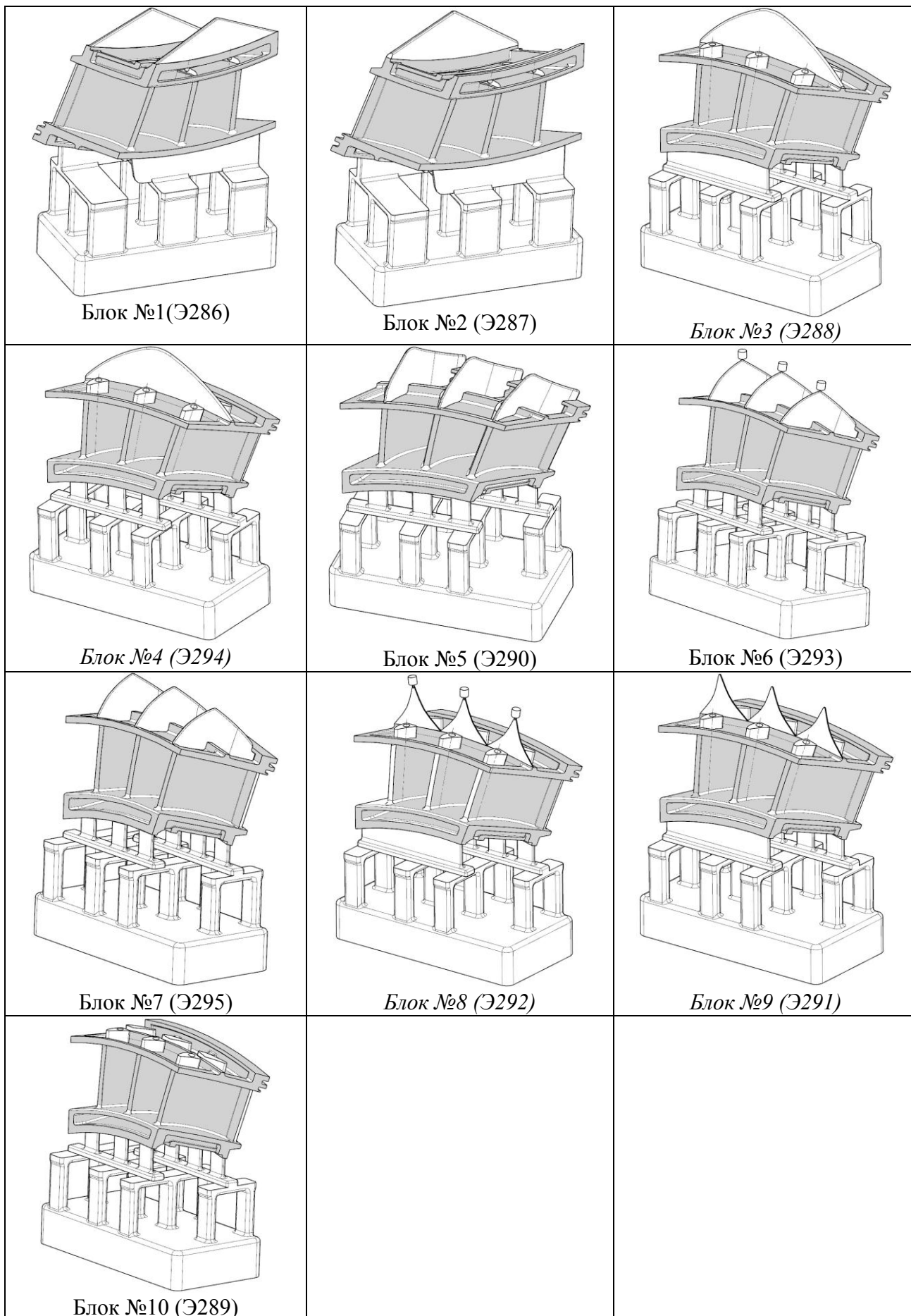


Рисунок 2 – Опробованные варианты заливки блоков с НК

Формирование керамического покрытия осуществлялось по «Временному технологическому процессу на изготовление лопаток турбины I и II ступени на вакуумной плавильной установке УВНК-9А» (ВТП). Полученные по ВТП керамические формы имели заведомо большую прочность по сравнению с серийными прототипами. В связи с наличием остаточных напряжений, приводящих к образованию трещин по границам зерен, что неблагоприятно для секционных лопаток, были опробованы различные варианты формирования керамического покрытия и подмазка формы (таблица 7).

Для получения близкой к монокристаллической структуры на пере и полках лопаток на блоках № 6,8 в стартовую зону кристалловода в затравочную полость была установлена Ni-W затравка с ориентацией [001].

Таблица 7 – Опробованные варианты формирования керамических стержней

Вариант	Блоки	Основа	Количество слоев	Вязкость суспензии, сек	Графитовый слой	Примечание
I	1,3,5	Электрокорунд с добавкой АСД4 5% для 4,5,7,8,9 слоев	9 + суспензия	28...30; 15 для графитового; 14...16 для закрепл.	6	
II	2,4,6	Электрокорунд с добавкой АСД4 — 5% для 4,6,8,9 слоев	9 + суспензия	28...30; 15 для графитового; 14...16 для закрепл.	5, 7	
III	7,8,9	Электрокорунд с добавкой АСД4 — 5% для 4,6,7,8 слоев	8 + суспензия	28...30; 16 для графитового; 14...16 для закрепл.	5	
IV	10	Электрокорунд с добавкой АСД4 — 5% для 4,5,6,7,8 слоев	8 + суспензия	28...30	-	Подмазка верхней и нижней полки

Плавка металла проводилась на вакуумной плавильной установке УВНК-9А. С целью создания различных условий формирования структуры лопаток заливка форм осуществлялась по различным режимам (таблица 8):

Таблица 8 – Варианты заливки и выявленные дефекты

№ блока	Инд. номер	Вариант покраски	Температура металла при сливе	Скорость крист.	Температура ППФ (верх/низ)	Выявленные дефекты	Примечание
1	Э286	I	1541	3	1560/1580	Смещение стержня	Брак
2	Э287	II	1535	4	1560/1570	Прорыв формы	Брак
3	Э288	I	1543	3	1560/1570	<i>Кристалл на вх. кромке с корыта</i>	
4	Э294	II	1538	3	1560/1580	<i>3 крист под острым углом на вх. кромке</i>	
5	Э290	I	1542	4	1560/1580	Незалив на средней и правой л.	Брак
6	Э293	II	1570	3/2	1560/1570	Незалив на средней и правой л.	Брак
7	Э295	III	1535	4	1560/1580	трещина	Брак
8	Э292	III	1543	3	1560/1580	<i>Кр. под острым углом</i>	
9	Э291	III	1543	3/2	1560/1570	<i>Кристаллы на вх. кромке струи на бурте</i>	
10	Э289	IV	1544	4	1580/1550	Наличие нескольких кристаллов	

После удаления стержня, лопатки были направлены на травление на макроструктуру в цех №27 ПАО «Кузнецов». По результатам контроля макроструктуры шесть лопаток допущены на дальнейшие операции. Ни рисунках 3 и 4 приведены типичные проявления макроструктуры блоков пропущенных на последующую обработку.



Рисунок 3 – Макроструктура блочных сопловых лопаток (перо)

Макроструктуры всех сопловых блоков приведены в приложении 1.

По результатам проведенных работ установлено:

1) предпочтительный вариант сборки лопаток в блок с литниково-питающей системой и установкой кристалловода – №3 (Э288), №4 (Э294), №8 (Э292), №9 (Э291) (рисунок 2);

2) вариант формирования керамического покрытия, обеспечивающий оптимальное сочетание прочности формы и ее податливости (с целью минимизации остаточных напряжений в отливке) - № III (таблица 7);

3) для обеспечения оптимальных условий формирования направленной структуры лопатки, предпочтителен следующий режим:

– ППФверх – 1550 (+10)⁰С; ППФниз – 1570 (+10)⁰С; выдержка 2...3 мин., слив при температуре 1540 (+5)⁰С; скорость перемещения формы из зоны нагрева в жидкометаллический охладитель (алюминий) – 3 мм/мин.

Анализируя полученную структуру лопаток соплового аппарата I ступени из сплава ЖС32-ВИ, можно сделать вывод: оптимальный температурный режим заливки и кристаллизации – это минимальная скорость перемещения формы из ППФ в кристаллизатор и температура заливки, приближенная к температуре верхних нагревателей печи подогрева форм (ППФ вверх).

Исходя из полученных результатов сформированы основные параметры технологического процесса, позволяющие обеспечить требуемую структуру с малой дефектностью при высоком выходе годного.

Освоение технологии литья сопловых лопаток их сплава ЖС32-ВИ осуществлялось силами металлургических служб ОП «Управленческий» и основной площадки ПАО «Кузнецов». Работы выполнялись в цехах 7 и 55.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СЕКЦИОННЫХ ЛОПАТОК С РАЗЛИЧНОЙ МАКРОСТРУКТУРОЙ

Годные по специальным видам контроля отливки сопловых обрабатывались механически по серийному технологическом процессе для лопатки-прототипа с корректировками для возможности их испытания в условиях предельных температур.

Сопловые лопатки выполнены двухполостными с раздельным (независимым) подводом охлаждающего воздуха из вторичной зоны камеры сгорания: через переднюю полость воздух подаётся на плёночное охлаждение входной кромки, спинки и корытца через 10 рядов перфорационных отверстий; через заднюю полость - на конвективное охлаждение с выпуском воздуха через щель на корытную оболочку вблизи выходной кромки.

Экспериментальная проверка сопловых секций с реализацией наибольшей возможной температуры материала выполнялась на установке ГГРФ ПАО «Кузнецов», которая представляет собой двухвальный газотурбинный двигатель – экспериментальный газогенератор изделия «РФ». Реализуемая на экспериментальной установке ГГРФ температура перед турбиной ограничена величиной 1350 К, поэтому испытываемые секции были выполнены **без плёночного охлаждения**, с практически неохлаждаемыми входными кромками и прилегающими участками профиля, без перфорационных отверстий с минимально возможным охлаждением выходных кромок.

Испытание сопловых секций на экспериментальной установке ГГРФ позволило имитировать основные виды нагружения лопаток как на полноразмерном двигателе, при этом отсутствие перфорационных отверстий позволило максимально достоверно измерить температуру материала входных кромок сопловых секций, исключив помехи от плёночного охлаждения.

Для прямого измерения температуры лопаток выполнено препарирование входных кромок термопарами хромель-алюмель (ХА), по 3 термопары на

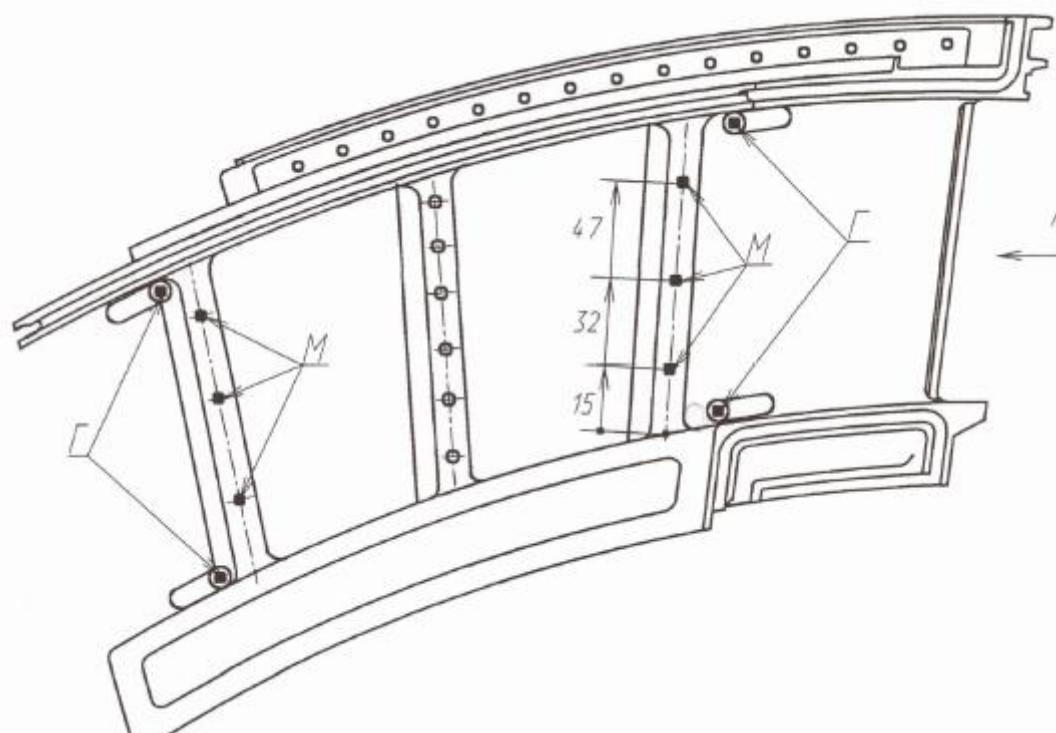
2-х крайних лопатках в секции, расположенные по высоте тракта на расстоянии 24%, 50% и 74% от втулочного сечения. Для исследования плёночного охлаждения трактовых полок сопловых секций было выполнено термометрирование газового потока на входе в сопловые секции на расстоянии 3 % (~2мм) от верхней и нижней полок с помощью термопар ХА с открытым спаем, которые в керамических изоляторах закреплялись на двух крайних лопатках на 6-ти секциях. Всего на сопловых секциях было установлено 60 термопар. Также для параметрической оценки газогенератора было выполнено препарирование входных кромок трубками замера полного давления на входе в СА, на средних лопатках на 6-ти препарированных секциях было установлено по 6 трубок давления на расстоянии 5%, 23%, 41%, 59%, 77%, 95% от втулочного тракта. Всего с неохлаждаемыми входными кромками и с препарированием выполнены 3 секции НК и 3 секции РС. Схема препарирования и фото препарированных лопаток показаны на рис. 4, 5, 6.

Секции по проточным поверхностям алитировались вместо штатного теплозащитного покрытия с керамическим слоем.

Раскладка по секциям, установленным в сопловой аппарат с указанием материала, структуры и наличия препарирования приведена в таблице 9. Все лопатки из материала ЖС32-ВИ выполнены с уменьшенным охлаждением. Лопатки из ЖС6У-ВИ выполнены с штатным (полным) охлаждением.

Таблица 9 – Раскладка сопловых секций в установке ГГРФ на экспериментальное испытание

№ п/п	Инд. № секции	Материал	Структура	Препарирование
1	Э43	ЖС32-ВИ	РС	-
2	Э292	ЖС32-ВИ	НК	ДА
3	901	ЖС6У-ВИ	РС	-
4	923	ЖС6У-ВИ	РС	-
5	Э36	ЖС32-ВИ	РС	ДА
6	Л779	ЖС6У-ВИ	РС	-
7	842	ЖС6У-ВИ	РС	-
8	37	ЖС32-ВИ	РС	ДА
9	44	ЖС32-ВИ	РС	-
10	294	ЖС32-ВИ	НК	ДА
11	51	ЖС32-ВИ	РС	-
12	45	ЖС32-ВИ	РС	-
13	291	ЖС32-ВИ	НК	ДА
14	38Э	ЖС32-ВИ	РС	-
15	288	ЖС32-ВИ	НК	-
16	34	ЖС32-ВИ	РС	ДА



М – термопары на входных кромках; Г – газовые термопары

Рисунок 4 - Схема расположения термопар на сопловых лопатках

Внешний вид препарированных лопаток и собранного соплового аппарата в состоянии после испытания показаны на рисунке 5, 6.

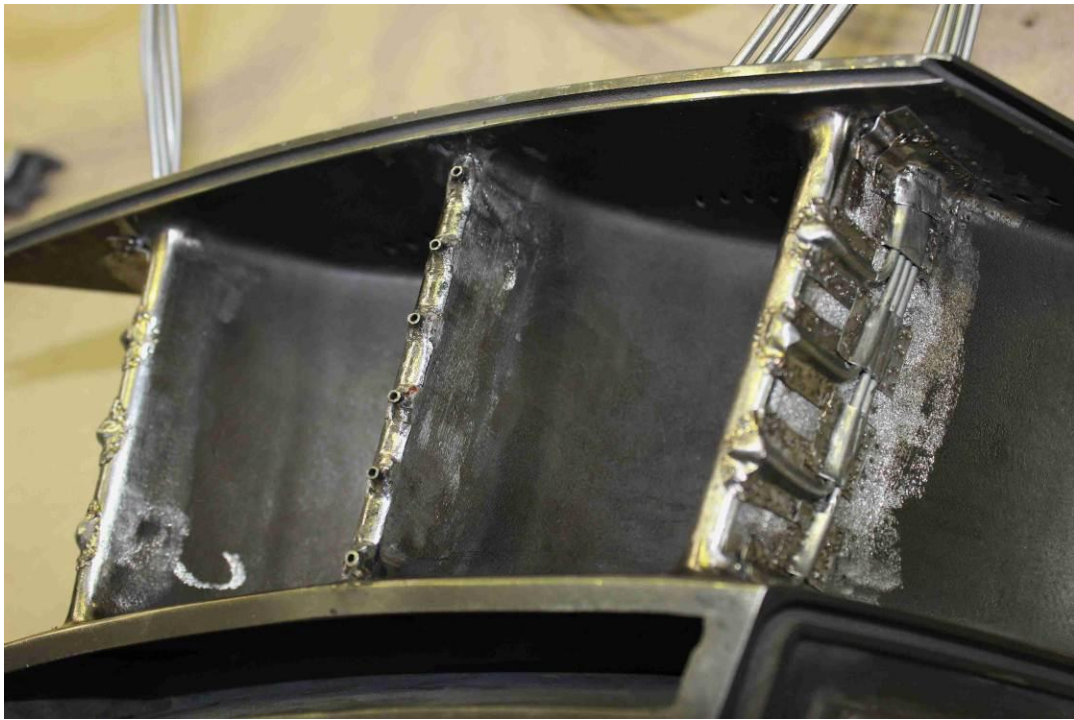


Рисунок 5 – Вид препарированной секции

В сопловом аппарате препарированные секции устанавливались по номерам 2, 5, 8, 10, 13, 16, соответствующим максимальным ожидаемым местным значениям $T^*_{г}$ от окружной неравномерности.



Рисунок 6 – Сопловой аппарат с препарированными лопатками

Схема расположения секций и максимальные замеренная температура во всех точка препарирования показаны на рисунках 7, 8.

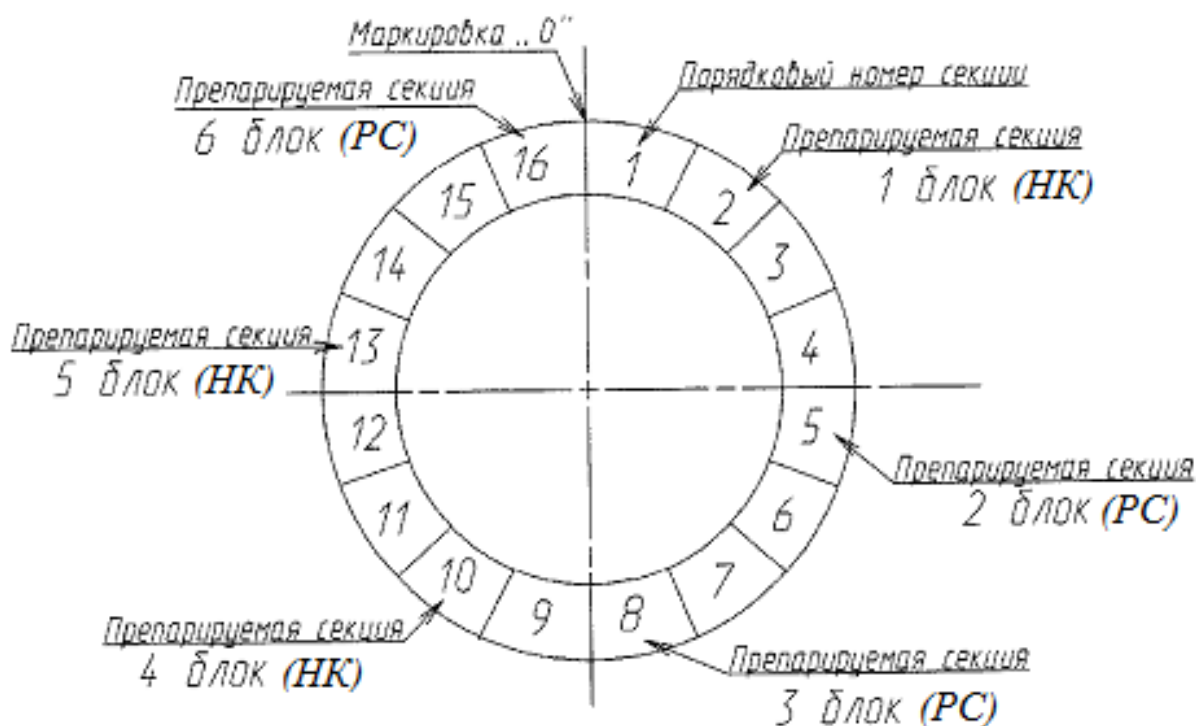


Рисунок 7 – Схема расположения препарированных секций (вид по полёту).

Испытания установки ГГРФ с препарированными секциями проведено в период с 30 октября по 4 ноября 2019 г. За время испытания суммарная наработка составила **2 часа 55 минут**, из них из них **36 минут** на режиме с $t_{\text{лоп.макс}}=1245^{\circ}\text{C}$. Наибольшая температура материала входных кромок лопаток, достигнутая при испытании, измерена на секции № 13 и составила 1245°C (одна точка). Температура материала входных кромок в диапазоне $1200 \div 1215^{\circ}\text{C}$ зафиксирована в 3-х точках на секциях 2 и 13. Остальные секции имели температуру входных кромок от 1030 до 1180°C . Измеренная температура входных кромок во всех точках препарирования на максимальном режиме показана на рисунках 8 и 9. Замеренный перепад температуры вдоль высоты входной кромки составил от 270°C до 550°C . Раскладка по максимальным замеренным температурам и перепадам температур вдоль высоты входной кромки приведена в таблице 3.

Схема расположения препарируемых секций лопаток
(вид против полета)

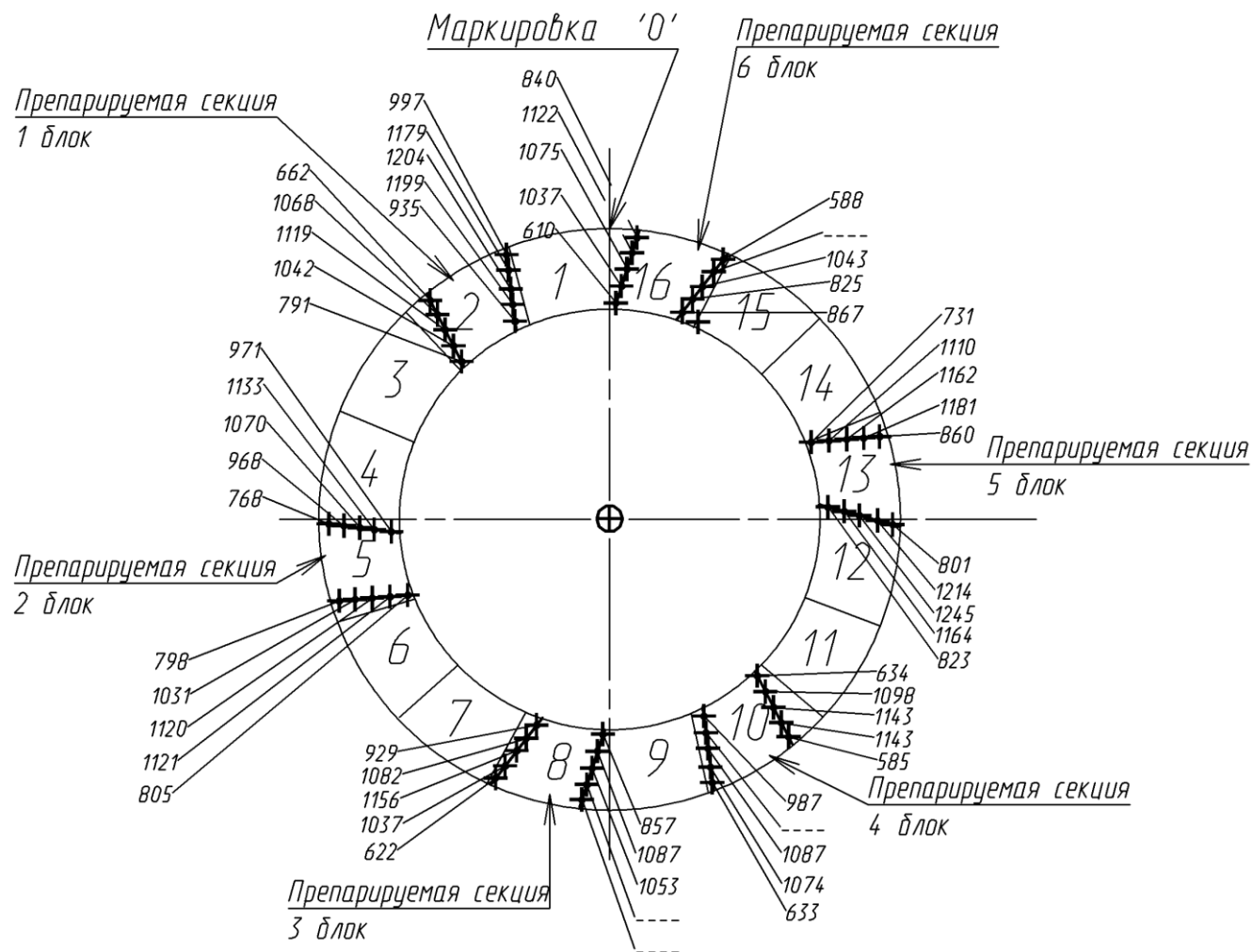


Рисунок 8 – Наибольшие замеренные температуры входных кромок лопаток

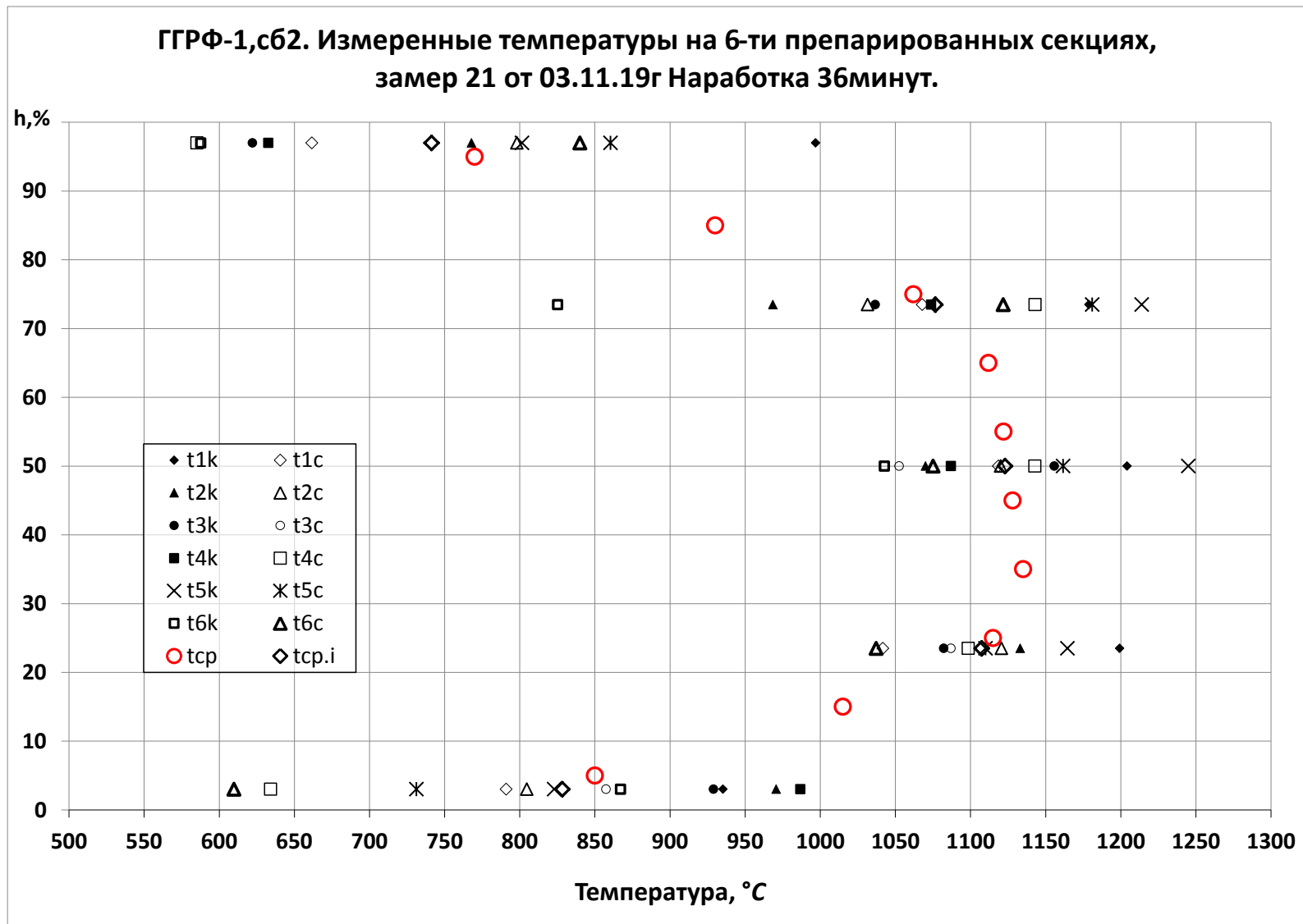


Рисунок 9 – Температура неохлаждаемых входных кромок 1-го СА и газового потока в притрактовых зонах перед 1 СА

После завершения испытания установка ГГРФ была разобрана по узлам. Сопловой аппарат продефектирован в сборе визуально и с применением цветной дефектоскопии второго класса чувствительности.

По результатам дефектации отмечено следующее:

– секции с **равноосной** структурой № 5, 8, 16 имеют трещины на входных кромках длиной 4-12 мм. Из них трещины на секциях № 8 и 16 длиной 7-17 мм расположены на центральной лопатке с началом от отверстия под постановку трубки замера давления, трещина на секции №5 – на средней и третьей лопатке длиной 5-7 мм;

– трещина длиной 17 мм на входной кромке секции №8 проходит через забоину, образовавшейся в результате производственного дефекта при препарировании;

– секции с **направленной** структурой повреждений не имеют;

– препарирование сохранило работоспособность.

Состояние сопловых лопаток показано на рисунках 10-12.



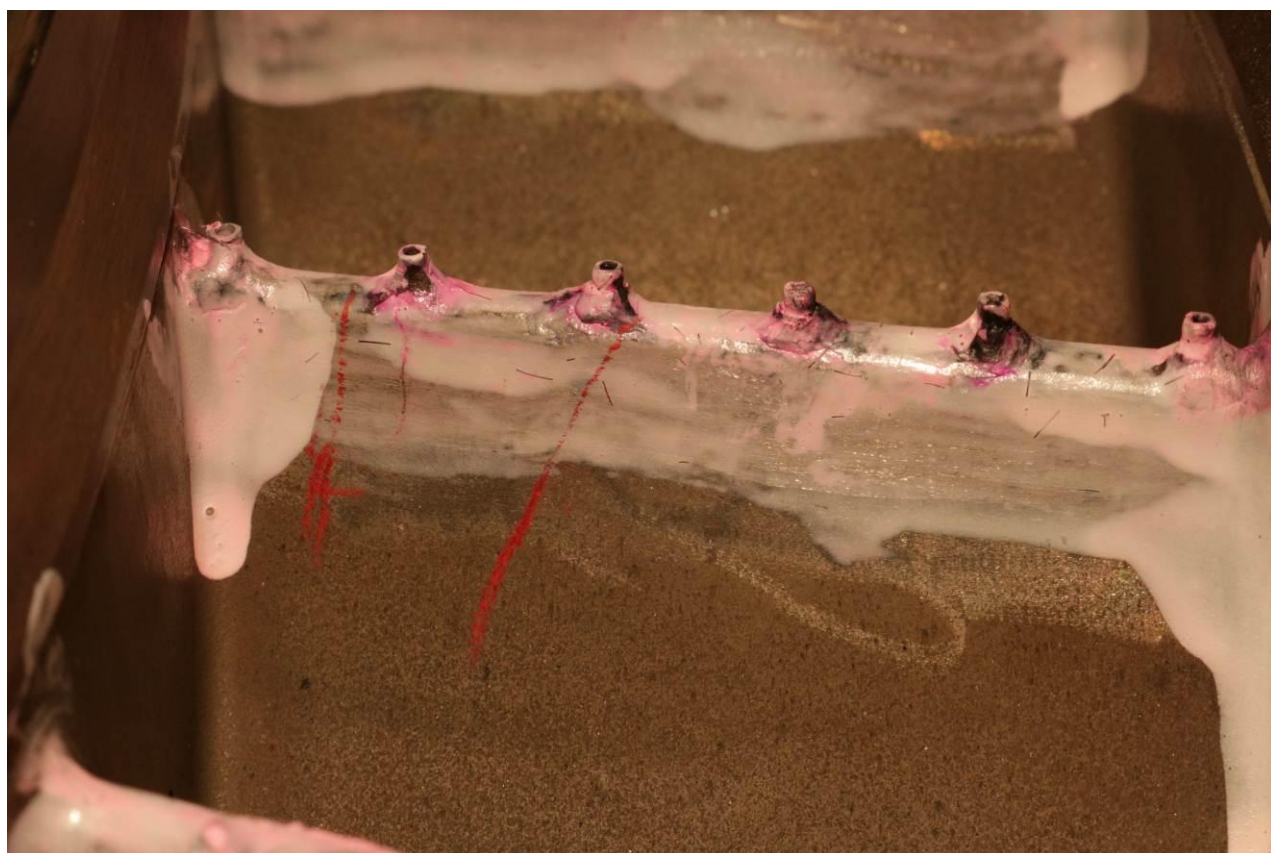
Секция № 8 (инд. № 37) ЖС32-ВИ РС

Рисунок 10 – Вид забоины на секции №8



Секция №8 (РС) (инд. № 37) ЖС32-ВИ РС

Рисунок 11 – Результаты ЛЮМ-ЦМ14 секции №8 (ЖС32, РС)



Секция № 16 (инд. №34) ЖС32-ВИ, РС

Рисунок 12 – Результаты ЛЮМ-ЦМ14 секции №16 (ЖС32, РС)

В целом, состояние сопловых секций с НК и РС удовлетворительное.

Проявившиеся дефекты в виде трещин образовались, по всей видимости, от действия напряжений сжатия с началом от доработок под препарирование трубок замера давлений. Появлению трещин способствовало:

- наличие забоины на секции № 8 при доработке под препарирование;
- доработка под препарирование трубок способом ЭЭО без последующего удаления дефектного слоя;
- высокий уровень термических напряжений вследствие высокой разности температуры стенки лопатки вдоль высоты входной кромки (на них отмечена наибольшая разность – 534 °С на 8ой секции и 512 °С на 16ой секции, 365 °С – на 5 секции).

На неохлаждаемых стенках лопаток очаги разгара и газовой эрозии отсутствуют. Все секции пригодны для продолжения испытаний.

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность секционных лопаток из сплава ЖС32-ВИ до температуры 1250 °С как в варианте с равноосной, так и с направленной кристаллизацией.

ВЫВОДЫ

1) Подтверждена пригодность сплава ЖС32-ВИ для изготовления блочных сопловых лопаток с различной макроструктурой. Применение сплава ЖС32-ВИ вместо ЖС6У-ВИ позволит увеличить рабочую температуру стенок сопловых лопаток до 1250°С, т.е. на 200 °С бóльшую.

2) Испытания механических свойств образцов сплава ЖС32-ВИ с направленной кристаллизацией (НК) и равноосной структурой (РС) установили, что:

– при высоких температурах наличие большого количества границ зёрен в равноосном исполнении снижает длительную прочность сплава ЖС32-ВИ на 20 % от уровня сплава с НК;

– относительное удлинение образцов с РС снижается в 4-5 раз;

– свойства образцов с НК соответствуют ТУ на сплав.

3) Опробованы различные варианты технологического процесса литья секционных сопловых лопаток с направленной кристаллизацией. Подобранные параметры процесса обеспечивают макроструктуру с малым количеством продольных границ зёрен на перьях лопаток и с малым числом границ зёрен на полках.

4) По результатам технологической отработки литья блочных лопаток с направленной структурой сформированы и обоснованы нормы макроструктуры сопловых секций из сплава ЖС32-ВИ (ТУ 01.2998, ТУ 01.3007).

5) Подтверждена работоспособность сопловых секционных лопаток при температуре материала до 1250°С в условиях газотурбинной двухвальной установки ГГРФ, наработка составила 2 часа 55 минут, из которой 36 минут с температурой входных кромок 1200-1250°С для секций с НК. На секциях с РС зафиксирована температура 1040-1156°С.

6) По результатам дефектации после испытаний установлено, что секции с равноосной структурой имеют начальную стадию развития дефектов в виде трещин. Развитие трещин от доработок под препарирование и отсутствие тре-

щин на иных секциях с РС указывает на работоспособность варианта секций с РС для кратковременных испытаний. Секции с направленной структурой дефектов не имеют.

7) Секции при проведении испытания на установке ГГРФ работали в более тяжёлых условиях по сравнению с ожидаемыми на полноразмерном изделии «РФ». В частности, разность температуры вдоль входной кромки при испытании на ГГРФ превышает ожидаемую на полноразмерном изделии на 100-130 °С.

8) Для последующего изготовления и отработки конструкции блочных сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ **предпочтительным является вариант НК** по следующим причинам:

- повышенного уровня пластичности сплава ЖС32-ВИ по сравнению с РС;
- отсутствия отработанных режимов термической обработки для ТВО-закалки и снятия напряжений для сплава ЖС32-ВИ с РС;
- возможной повышенной дисперсии механических свойств сплава РС;
- отсутствием дефектов секций с НК после испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс проделанных работ по технологическому освоению литья с направленной структурой блочных сопловых лопаток турбины и подтверждение их работоспособности в условия экстремально высоких рабочих температур (до 1250 °С) позволил создать новую **критическую технологию**. Эффект от её внедрения, заключается в:

- сокращении расхода охлаждающего воздуха для сопловых лопаток;
- снижении потерь в проточной части турбины благодаря резкому сокращению количества уступов (втрое для изделия «РФ»);
- уменьшению утечек воздуха по стыкам блоков;
- снижению веса благодаря меньшему числу соединительных элементов.

Обоснована возможность и практическая достижимость требований к макроструктуре секционных и одиночных сопловых лопаток из сплава ЖС32-ВИ, которые легли в основу технических условий ТУ01.2998 (для блочных и одиночных лопаток с направленной кристаллизацией) и ТУ01.3007 (для одиночных сопловых лопаток с структурой, близкой к монокристалльной), разработанных для изготовления опытных партий лопаток изделия «РФ» на предприятиях производственной кооперации.

Применение блочных сопловых лопаток является резервом повышения эффективности созданных и вновь проектируемых высокотемпературных турбин.

Дальнейшие работы должны включать:

- достижение высокого выхода годного отливок сопловых лопаток по структуре и металлургическим дефектам;
- разработку оптимальных режимов термической обработки сплава ЖС32-ВИ в поликристаллическом исполнении;
- набор статистики изменения структурно-фазового состава сплава по мере накопления эксплуатационной повреждаемости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Паспорт сплава ЖС6У-ВИ №979;
2. Сертификат 1.2.0099-88 на сплав ЖС32-ВИ.
3. Отчёт ЦЗЛ №31/19 от 15.03.19.
4. Отчёт ЦЗЛ №66/19 от 25.06.19.