

Приложение к заявке ПАО «ОДК-УМПО»

на участие в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2020 года в номинации
«За успехи в разработке авиационной техники и компонентов (ОКБ года)»

Наименование разработки:

«Инновационная методология и технология автономной стендовой газодинамической доводки компрессора и турбины низкого давления»

В соответствии с современной методологией создания авиационных двигателей выделяется особый этап – экспериментальное исследование составных частей газотурбинного двигателя на специализированных автономных стендах, на которых отрабатываются новые технические решения в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Главной задачей этого этапа является исследование теплового состояния, прочности, надёжности, работоспособности, эффективности составных частей газотурбинного двигателя. Экспериментальные характеристики составных частей, определяемые при этих испытаниях в широком диапазоне режимных параметров, используются при идентификации математических моделей как стационарных, так и динамических процессов. Это позволяет существенно повысить достоверность оценки соответствия параметров заданным их значениям и существенно сократить сроки доводки двигателя.

Характерной особенностью этого этапа является необходимость оперативного внесения изменений в конструкцию разрабатываемых составных частей, что предопределяет значительные материальные и временные затраты на подготовку производства с зачастую негарантированным положительным результатом.

В рамках выполнения опытно-конструкторских работ по компрессору и турбине низкого давления газотурбинного двигателя была разработана и апробирована инновационная методология и технология их автономной стендовой газодинамической доводки, позволившая получить характеристики указанных узлов при значительном сокращении сроков доводки. Основной упор в данной работе был сделан на широком применении аддитивных технологий, позволяющих воспроизводить элементы конструкций, изготовление которых посредством

традиционных технологий производства потребовало бы значительных материальных и временных затрат.

1 Компрессор низкого давления газотурбинного двигателя в составе установки для автономных испытаний

1.1 К узлу компрессора низкого давления (КНД, вентилятора) предназначенного для испытаний в составе автономной установки на стенде Ц-3 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» предъявляются следующие требования:

- снижение влияния средств измерения потока в проточной части на параметры узла;
- снижение сроков и стоимости производства элементов конструкции, для которых необходима возможность оперативной замены при итерационном поиске оптимальной конфигурации с целью обеспечения заданных параметров.

Наилучшим решением этих задач одновременно является применение аддитивных технологий, а именно селективного лазерного сплавления из металлического порошка.

Оптимальным способом снижения влияния средств измерения является интегрирование прибора в лопатку направляющего аппарата (рисунок 1.1). В таком приборе практически исчезают проблемы с наличием следа и запиранием межлопаточного канала, что позволяет получить более достоверные характеристики узла.

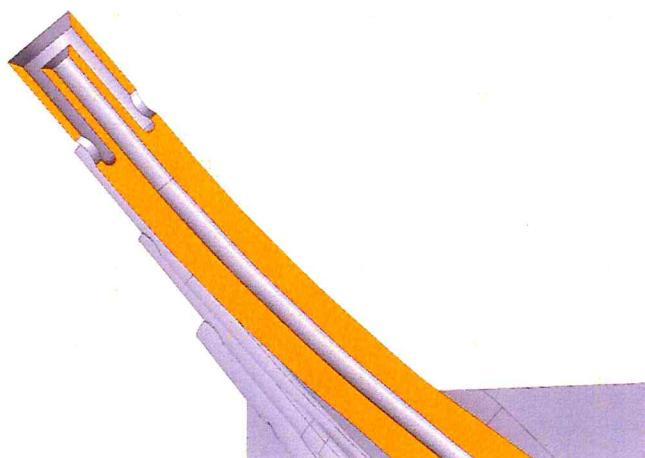


Рисунок 1.1 – Поперечный разрез прибора, интегрированного в лопатку направляющего аппарата

В ходе проектирования были рассмотрены два варианта приборов, интегрированных в направляющий аппарат:

- механическое закрепление приёмников с дефлекторами в специальной лопатке с фрезерованными каналами (рисунок 1.2);
- интегральный прибор, выполненный за одно целое с лопаткой, изготовленной методом селективного лазерного сплавления (рисунок 1.3).

Второй вариант позволил выполнить каналы внутри профиля пера лопатки и дополнительно исключить сложный и трудоемкий процесс прокладки коммуникаций.

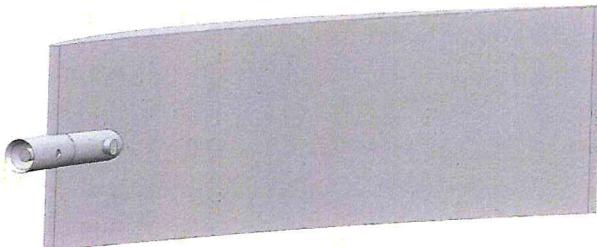


Рисунок 1.2 – Модель прибора, прикреплённого к профилю лопатки заклёпкой

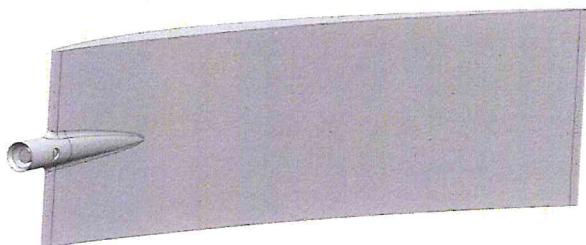


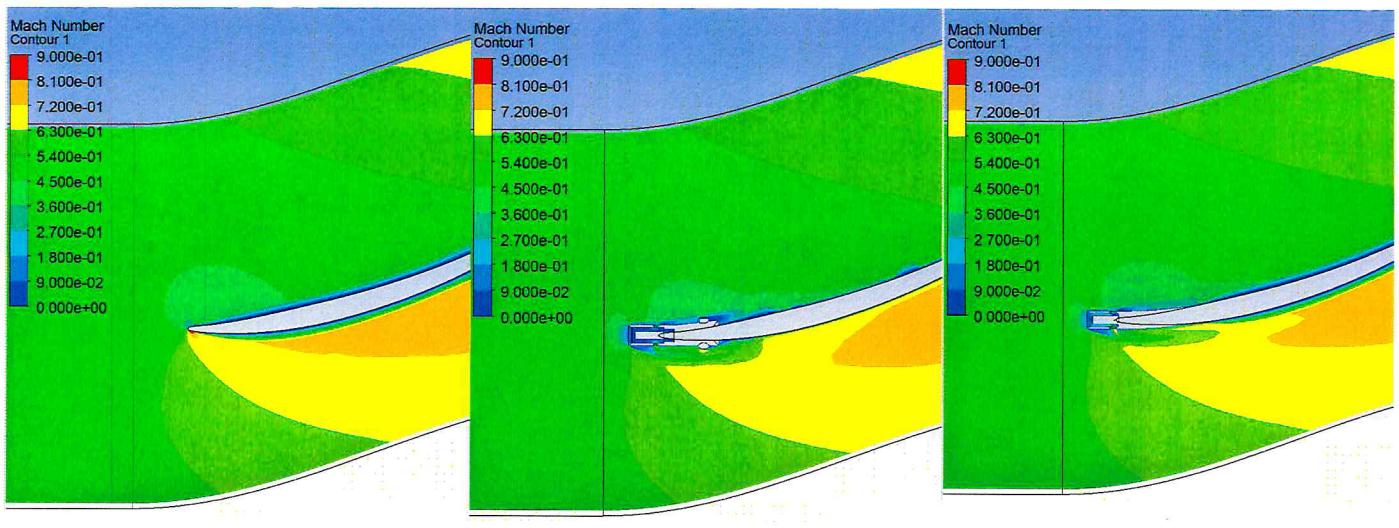
Рисунок 1.3 – Модель прибора, выращенного с лопаткой за одно целое

С целью окончательного выбора конструкции приборов выполнено математическое моделирование вязкого течения около элементарной решётки среднего сечения лопатки с одним приёмником полного давления для различных вариантов исполнения. Дополнительно выполнен расчёт течения для элементарной решётки без приборов.

Сравнительный расчёт упрощенной модели был выполнен в программном комплексе ANSYS CFX со следующими граничными условиями:

- полное давление и температура на входе соответствуют стандартным атмосферным условиям;
- приведенная скорость потока на выходе в диапазоне от 0,5 до 0,9.

На рисунке 1.4 представлена картина течения в сечении приёмника давления.



а

б

в

Рисунок 1.4 – Распределение числа М в решётке а – без приёмника давления, б – механически закреплённым приёмником давления, в – с выращенным приёмником давления

На рисунке 1.5 представлен график зависимости потерь полного давления в элементарной решётке от приведенной скорости потока для рассматриваемых вариантов конструкции приёмников.

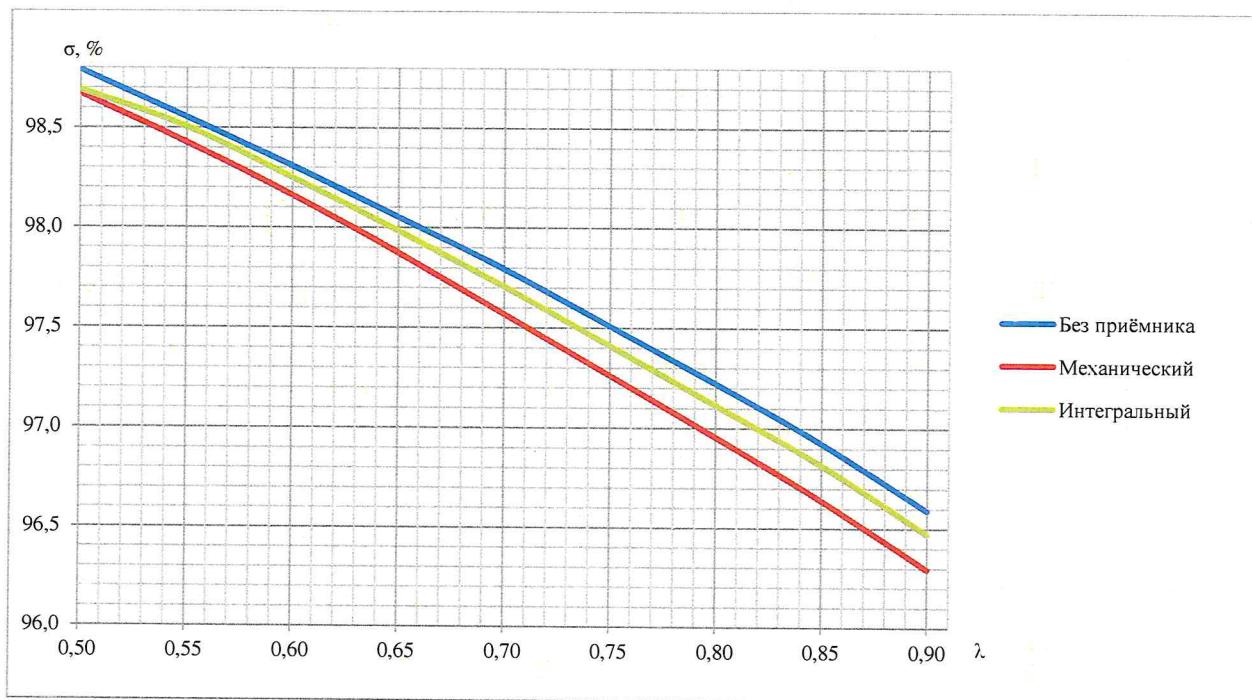


Рисунок 1.5 – График зависимости потерь полного давления в элементарной решётке от приведенной скорости потока

Как видно из графика лопатка с выращенным за одно целое приёмником имеет меньшие потери полного давления (на 0,2 %) по сравнению со сборным приёмником.

Поскольку при испытаниях КНД число препарированных лопаток направляющего аппарата может достигать 1/3 от общего числа лопаток на каждом венце, то общее снижение параметров потока КНД с лопатками направляющих аппаратов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, составит около 0,42 %. Тот же КНД с лопатками направляющих аппаратов с механически закреплёнными приборами покажет снижение параметров на величину 0,85 %.

На основании выполненных расчётов была выбрана конструкция препарированной лопатки направляющего аппарата, изготовленной методом селективного лазерного сплавления.

После проработки конструкции был запущен процесс изготовления заготовки с последующей термообработкой для снятия термических напряжений. На рисунке 1.6 изображена заготовка препарированной лопатки направляющего аппарата с приемниками полного давления на входной кромке после выращивания из материала IN 718.

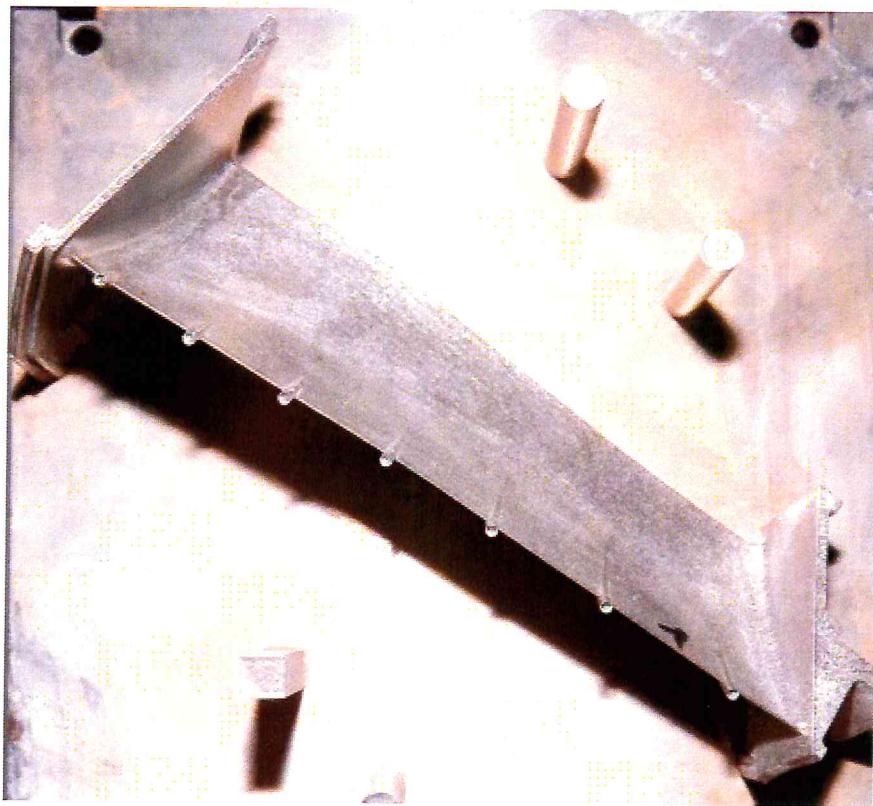


Рисунок 1.6 – Заготовка препарированной лопатки направляющего аппарата после выращивания

Для оценки возможности установки лопаток, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, в автономный компрессор был изготовлен отдельный комплект лопаток для проверки предела выносливости (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Готовая лопатка и её заготовка для определения предела выносливости

Предел выносливости образцов лопаток составил 360 МПа на базе N, равной $2 \cdot 10^7$ циклов. Результаты испытаний по определению предела выносливости позволили для ускорения производства применить технологию селективного лазерного сплавления и для штатных лопаток направляющего аппарата автономного компрессора, что кроме длительности изготовления позволило сократить затраты на изготовление специального штамповочного оборудования.

Изготовленные лопатки направляющего аппарата были использованы при сборке автономной установки для испытаний КНД на стенде Ц-3 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (рисунок 1.8).

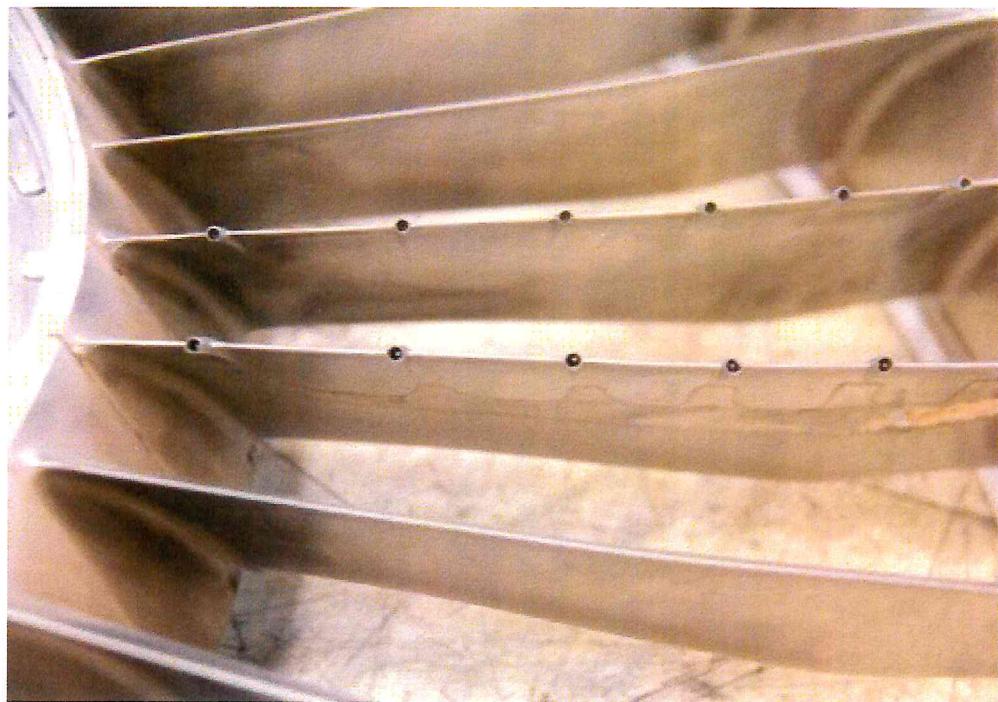


Рисунок 1.8 – Препарированные лопатки, собранные в лопаточный венец

1.2 Проведение испытаний КНД

При испытаниях КНД в составе экспериментальной установки на стенде Ц-3 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» были подтверждены требуемые параметры по ТЗ

После проведения испытаний и окончательной разборки был проведен внешний визуальный осмотр лопаток на наличие дефектов, а также проведен контроль капиллярным люминесцентным методом ЛЮМ1-ОВ. По результатам контроля повреждений не выявлено. На рисунке 1.9 изображен результат проведения контроля методом ЛЮМ1-ОВ. В ходе испытаний лопатки выдержали приложенные нагрузки без каких-либо повреждений



Рисунок 1.9 – Результаты контроля лопаток методом ЛЮМ1-ОВ

1.3 Экономическая эффективность

Применение технологии селективного лазерного сплавления позволило снизить влияние средств измерения на параметры КНД в 2 раза, а также на 3 месяца сократило время и в 1,5 раза снизило стоимость изготовления комплекта лопаточных венцов. По результатам испытаний выявлена необходимость незначительной корректировки профилирования части венцов направляющих аппаратов, что при применении аддитивных технологий позволит без изменения дорогой штамповой оснастки и применения длительных операций металлообработки на станках с числовым программным управлением изготовить новые лопатки для повторных испытаний компрессора составе экспериментальной установки.

2 Турбина низкого давления газотурбинного двигателя в составе установки для автономных испытаний

2.1 Автономные испытания турбины низкого давления (ТНД) газотурбинного двигателя в первоначальном ее конструктивном исполнении на стенде ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» выявили несоответствие коэффициента ее полезного действия заданному в техническом задании значению (недобор 0,4 %), для устранения которого профили лопаточных венцов были скорректированы с целью минимизации углов атаки газового потока и профильных потерь кинетической энергии. Для оперативной проверки эффективности разработанных мероприятий были запланированы автономные испытания ТНД в обновленном конструктивном исполнении в составе экспериментальной установки на стенде ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», причем изготовление материальной части решено произвести посредством аддитивных технологий и с использованием имеющейся технологической оснастки, т.к. цикл изготовления охлаждаемых лопаток турбины посредством освоенной технологии составляет более 12 месяцев, что не соответствует плану доводки газотурбинного двигателя.

2.2 Для оценки реализуемости данного решения были проведены следующие подготовительные работы:

a) отработка технологических приемов при 3D печати с целью минимизации отклонений геометрических параметров лопаток ТНД (подбиралось оптимальное положение на плите для минимизации поддержек и коробления лопаток (рисунок 2.1). По результатам этой работы для уменьшения коробления пера сопловых лопаток ТНД, выполнено утолщение их стенок с 1,2 до 2,5 мм. Для упрощения конструкции сопловых лопаток ТНД и придания ей дополнительной жесткости, возможность чего обусловлена модельным характером испытаний ТНД, исключен дефлектор из схемы охлаждения и заменен на эквивалентную перемычку во внутренней полости с дросселирующими отверстиями. В результате максимальное коробление пера лопатки СА уменьшилось с 1,2 до 0,55 мм (рисунок 2.2), положительное значение которого дает возможность доработки профиля шлифованием снаружи. Кроме этого, для исключения технологических операций пайки сотоблоков надроторного уплотнения ТНД, сопровождающихся

значительным нагревом конструкции и потенциально способствующих дополнительному короблению, сотоблоки решено изготавливать 3D печатью.

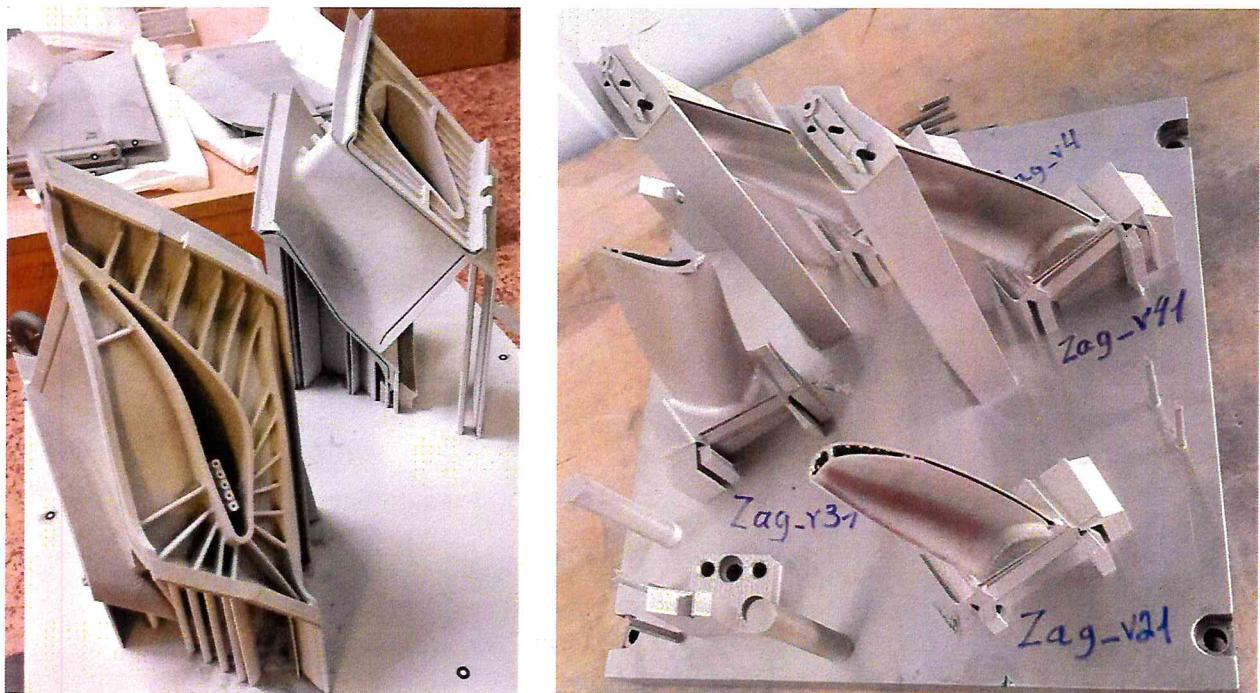


Рисунок 2.1 – Оптимизированное положение лопаток при 3D печати

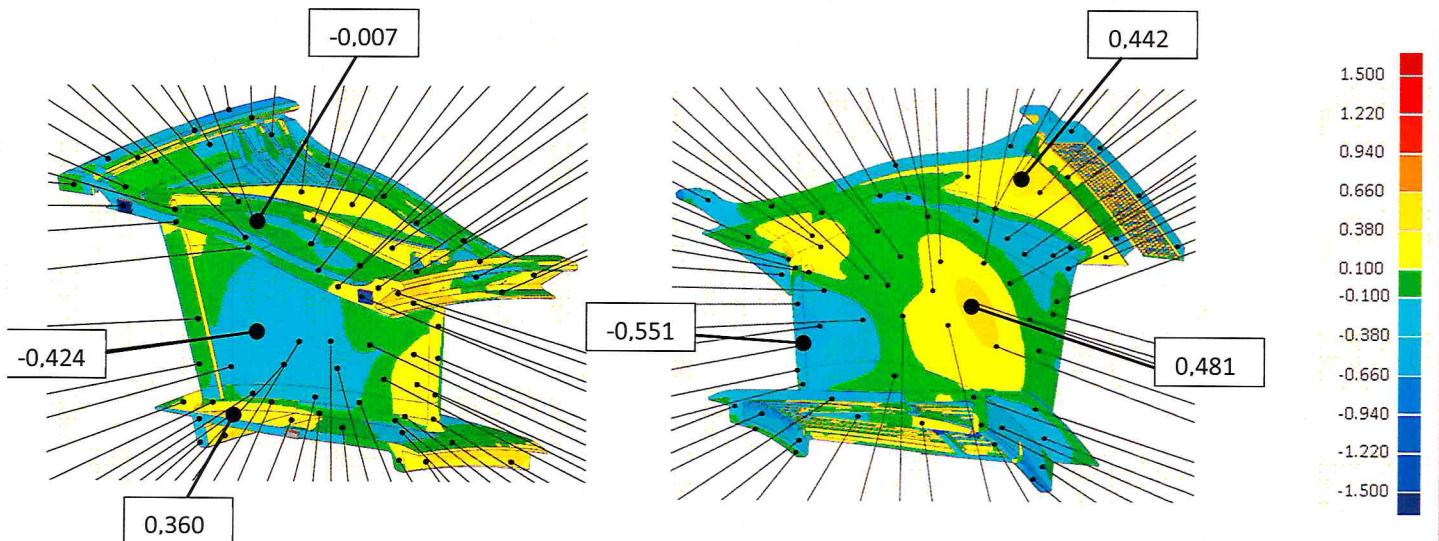


Рисунок 2.2 - Результаты измерения оптической системой ATOS сопловой лопатки ТНД

Рабочие лопатки ТНД дорабатывались с учетом минимизации построения поддержек, утолщались корневые и бандажные полки в связи с расположением на них базовых площадок для дальнейшей обработки. Максимальное отклонение по профилю составило 0,25 мм (рисунок 6).

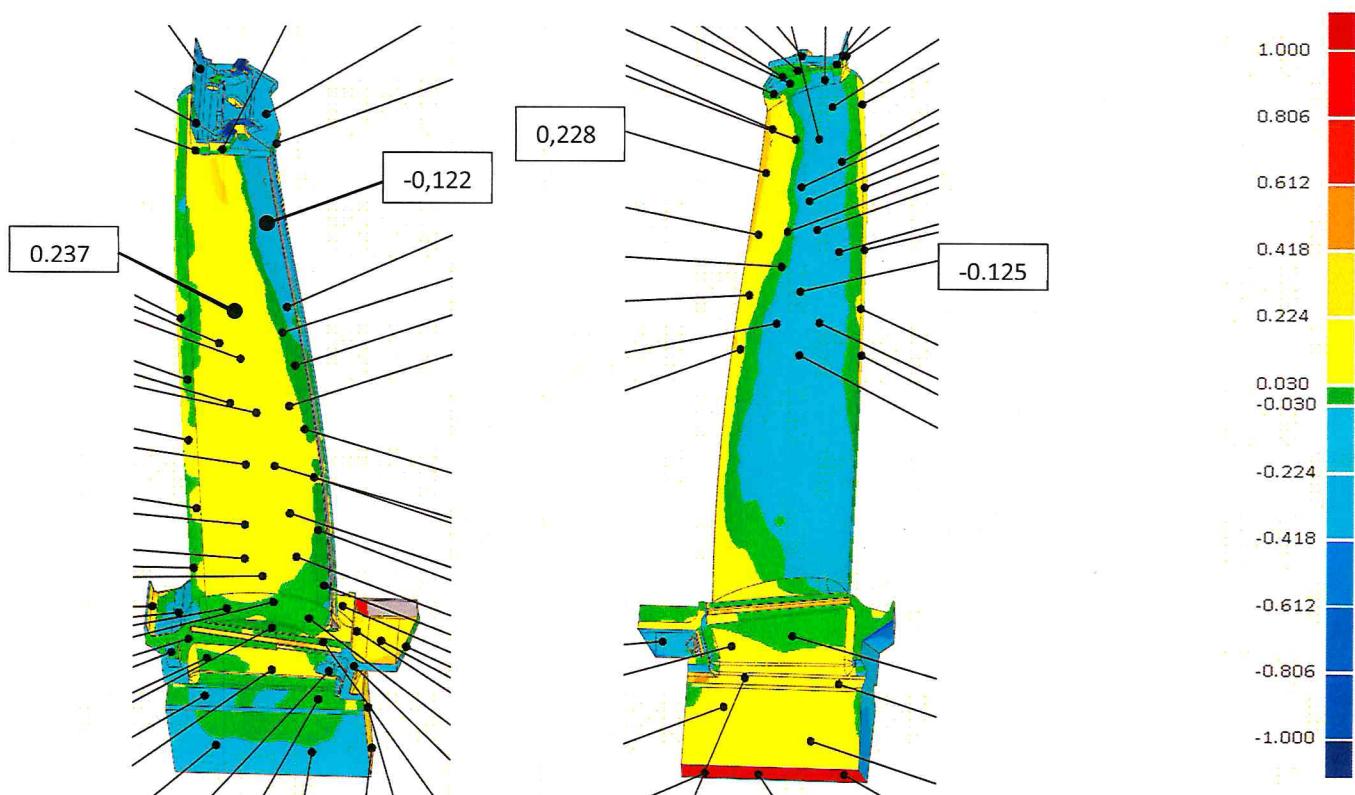


Рисунок 2.3 - Результаты измерения оптической системой ATOS рабочей лопатки ТНД

б) определение механических свойств используемого порошкового никелевого сплава и режима его термообработки (в т.ч. газоизостатическое прессование (ГИП)) для проведения оценки напряженно-деформированного состояния лопаток ТНД в условиях проведения испытаний. Определение механических свойств порошкового никелевого сплава выполнено на образцах-свидетелях, которые изготавливаются и проходят этапы термообработки одновременно с лопатками ТНД. Результаты механических испытаний и фотографии образцов-свидетелей после испытаний приведены в таблице 1 и на рисунке 2.4. Кроме этого, на рабочих лопатках ТНД провели испытания по определению предела их выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, по результатам которых лопатки, подвергшиеся ГИП, имеют наилучшие показатели по отношению к лопаткам со стандартной термообработкой (несмотря на уменьшившиеся пределы прочности и текучести).

Таблица 1 - Результаты механических испытаний порошкового никелевого сплава

Обработка	Предел прочности, σ_b , Мпа	Предел текучести σ_t , Мпа	Относительное удлинение δ , %	Сжатие ψ , %
Стандартная термообработка	1301,4	1205,4	18,0	48,4
Стандартная термообработка+ ГИП	1134,8	553,1	44,2	43,2

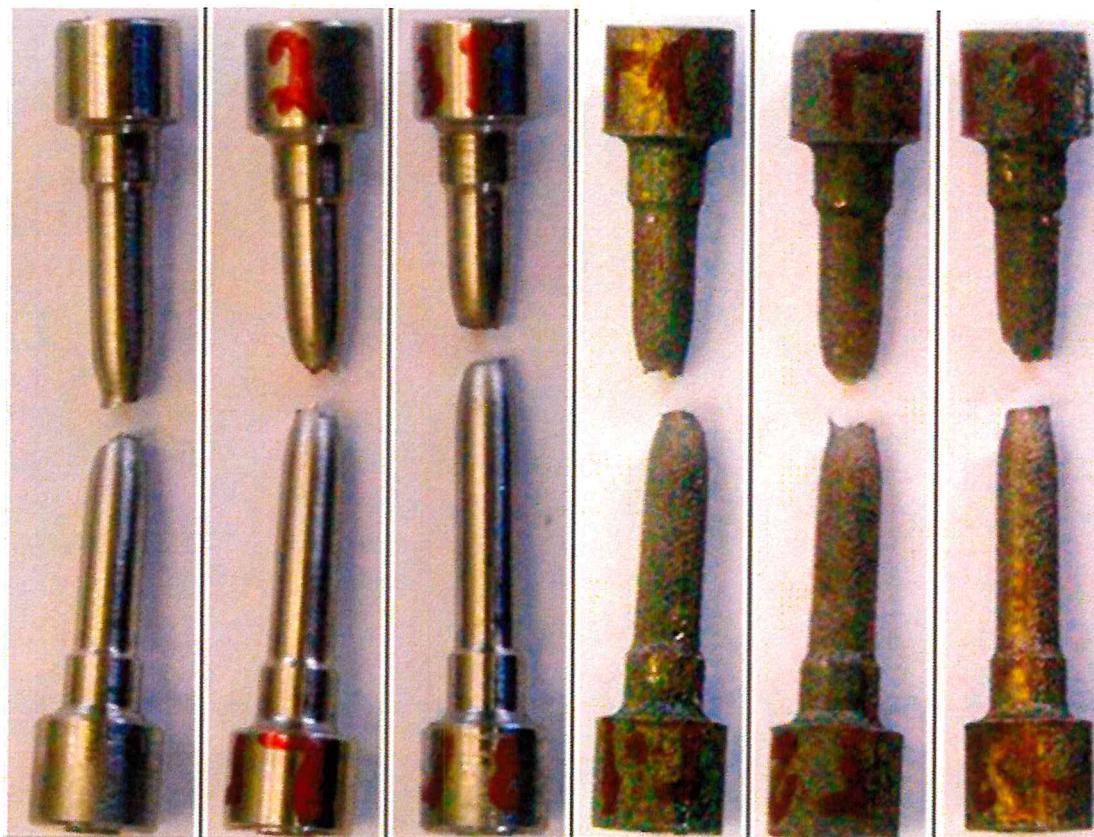


Рисунок 2.4 – Образцы-свидетели после испытаний

Полученные механические свойства порошкового никелевого сплава были использованы для оценки напряженно-деформированного состояния лопаток ТНД, по результатам которой запасы статической прочности на максимальном модельном режиме удовлетворяют нормам прочности ЦИАМ. Запасы статической прочности по рабочим лопаткам ТНД представлены на рисунке 2.5;

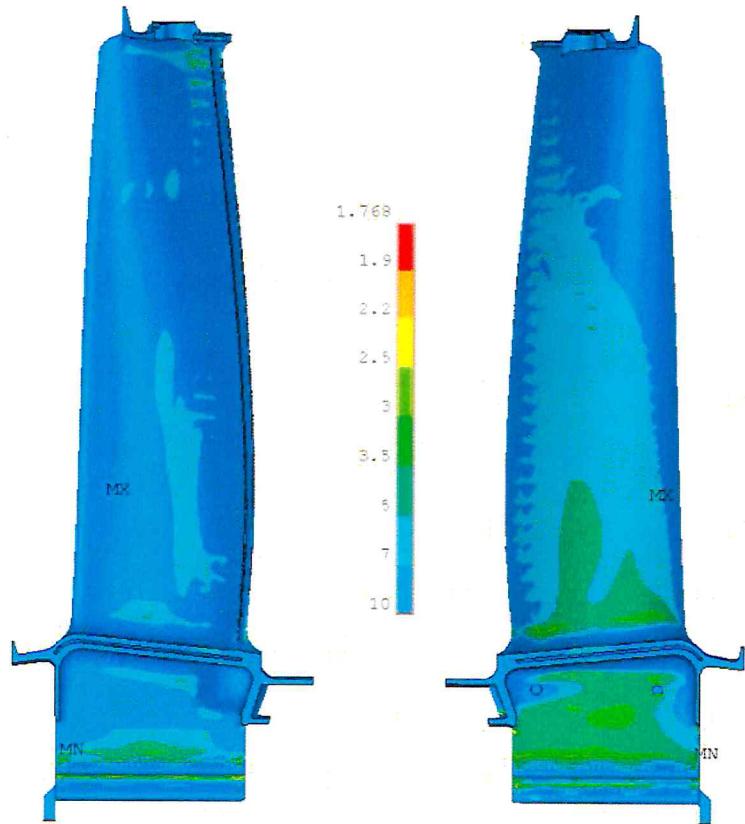


Рисунок 2.5 – Запасы статической прочности рабочих лопаток ТНД на максимальном модельном режиме

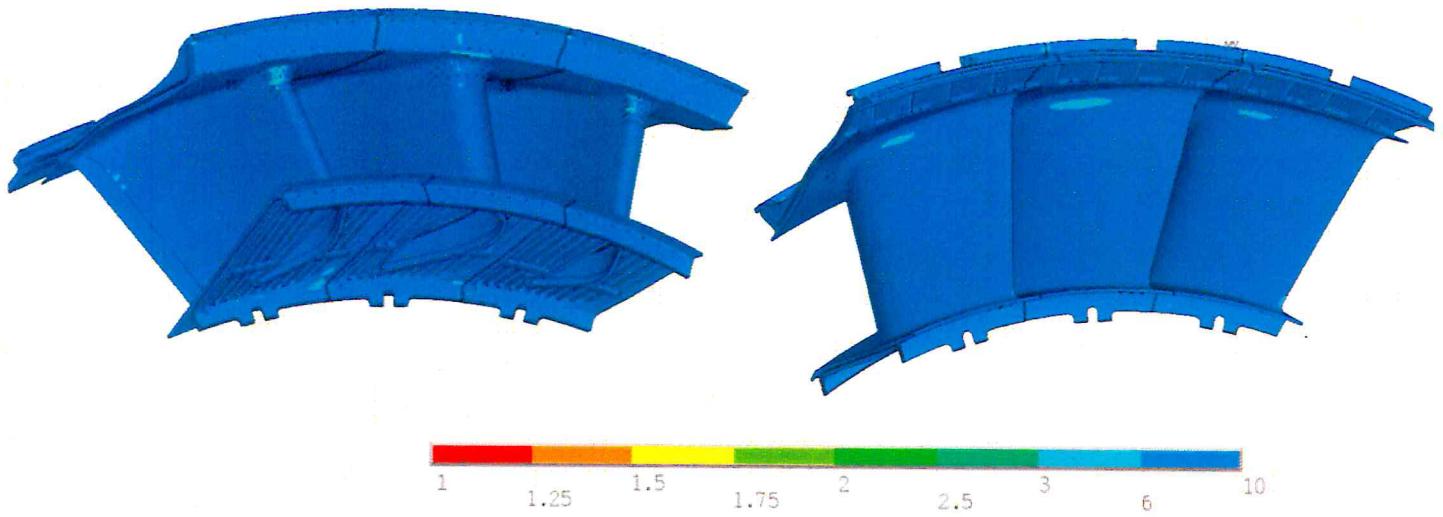


Рисунок 2.6 – Запасы статической прочности сопловых лопаток ТНД на максимальном модельном режиме

После выполнения перечисленных подготовительных работ, подтвердивших реализуемость принятого решения, был изготовлен комплект заготовок сопловых и рабочих лопаток ТНД для последующей механической его обработки.

2.3 Механическая обработка сопловых лопаток ТНД

В ТНД применены два типа сопловых лопаток с относительной толщиной профиля 18 и 25 %. Для каждой из лопаток были проанализированы технологические процессы механической обработки, данные по технологической оснастке для механической обработки и приборам для контроля геометрии пера. Требуется обработка стыковых и посадочных поверхностей, которые не отличаются от исходных сопловых лопаток ТНД.

В существующей технологической оснастке используются базовые точки исходных сопловых лопаток ТНД (на пере и полках), которые не совпадают с модифицированными профилями, что предопределило доработку заготовок сопловых лопаток ТНД (выполнение углублений в теле пера лопаток). На рисунках 2.7 и 2.8 представлен наиболее сложный вариант лопатки с относительной толщиной профиля 25 %, в которой необходима доработка всех базовых точек.

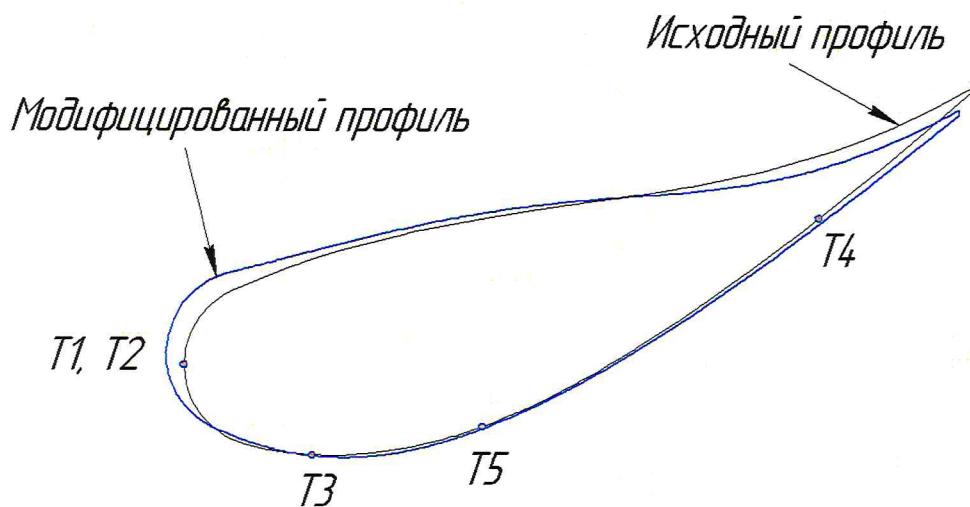


Рисунок 2.7 – Исходный и модифицированный профиль лопатки СА с относительной толщиной 25 %

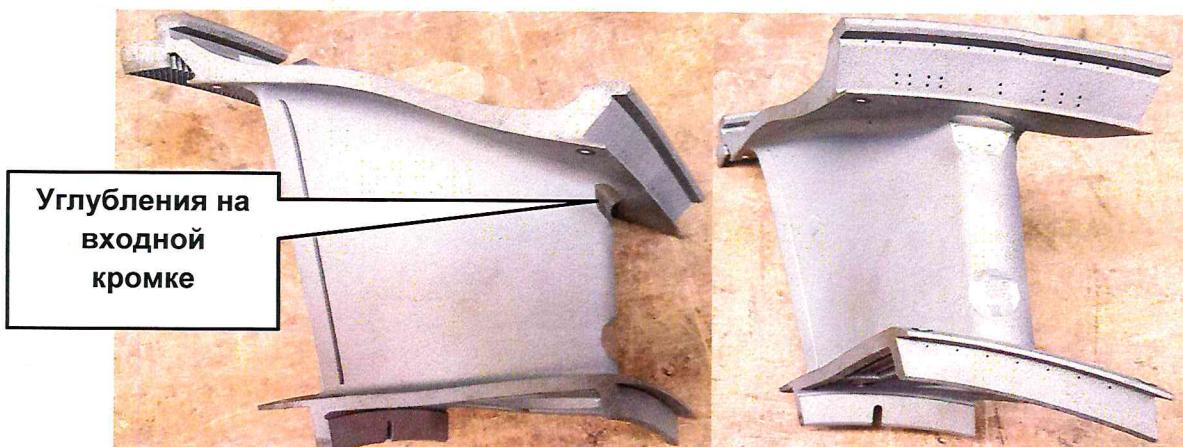


Рисунок 2.8 – Сопловая лопатка ТНД с относительной толщиной профиля 25 %

Для контроля геометрии модифицированных профилей сопловых лопаток ТНД был изготовлен комплект шаблонов. После совмещения базовых точек модифицированных сопловых лопаток ТНД с исходными выполняется механическая обработка стыковых и посадочных поверхностей.

На завершающем этапе углубления на поверхности профиля сопловых лопаток ТНД заполняются высокотемпературным припоем с последующим восстановлением геометрии посредством шлифования (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Сопловые лопатки ТНД с относительной толщиной профиля 18 и 25 % с восстановленными углублениями под базовые точки



Рисунок 2.10 – Сопловая лопатка ТНД после механической обработки

2.4 Механическая обработка рабочих лопаток ТНД

Для рабочей лопатки ТНД были проанализированы технологические процессы механической обработки, данные по технологической оснастке для механической обработки и приборам для контроля геометрии пера. Требуется обработка стыковых и посадочных поверхностей, которые не отличаются от исходных рабочих лопаток ТНД.

В связи с существенными изменениями профиля, часть технологических операций, которые выполнялись с использованием всех базовых точек на профиле, были исключены. Заготовка рабочей лопатки ТНД была изготовлена в геометрических размерах исходной лопатки на операциях обработки замкового соединения, где используются три базовые точки на пере, а также поверхности корневой и бандажной полки.

Заготовка рабочей лопатки ТПД изготавливалась с припусками на механическую обработку в замковом соединении и бандажной полке (рисунок 2.11). Кроме этого, учтено требование минимизации поддержек при изготовлении с доработкой элементов корневой и бандажной полки, по которым происходит фиксация при обработке замка для минимизации их коробления.



Форма полки для фиксации в приспособлении для обработки замка

Рисунок 2.11 – Рабочая лопатка ТНД

Одна из базовых точек под бандажной полкой, которая обеспечивает высотное положение полки при обработке замкового соединения, располагалась в области поддержек, строящихся в процессе изготовления заготовок рабочих лопаток ТНД. После удаления поддержек данная поверхность с базовой точкой обрабатывалась слесарным способом. Для обеспечения положения базовой точки при обработке, данная операция контролировалась с использованием шаблона, который изготовлен посредством 3D печати (рисунок 2.12).

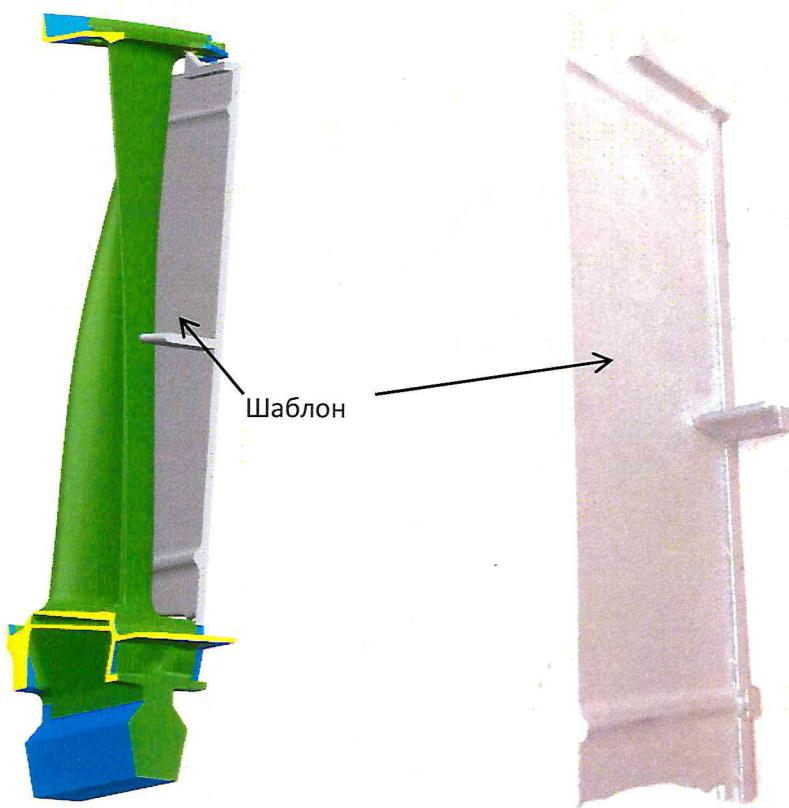


Рисунок 2.12 – Установка шаблона для обработки базовой точки на полке

Для двух шифров технологической оснастки, в которых используется базовая точка, расположенная на спинке лопатки, были изготовлены элементы, которые устанавливаются на обработанную поверхность замкового соединения и корректируют положение лопатки в приборе для контроля изготовления и в приспособлении для обработки бандажной полки. На одном из шифров технологической оснастки для обработки бандажной полки был изменен упор, который изготовлен посредством 3D печати с последующей его механической

обработкой. Фотография рабочих лопаток ТНД после механической обработки представлена на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Рабочие лопатки ТНД после механической обработки

2.5 Проведение испытаний ТНД

После изготовления комплекта сопловых и рабочих лопаток ТНД были собраны сопловой аппарат и рабочее колесо ТНД для комплектования экспериментальной установки

При автономных испытаниях ТНД в составе экспериментальной установки на стенде ТС-2 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» были подтверждены требуемые параметры по ТЗ

2.6 Оценка экономического эффекта

Оценка экономической эффективности примененной инновационной методологии и технологии автономной стендовой газодинамической доводки ТНД газотурбинного двигателя показала, что временные затраты на изготовление обновленной материальной части сократились в 3 раза, а материальные затраты сокращены в 8 раз.

Выводы

Применение разработанной и апробированной «Инновационной методологии и технологии автономной стендовой газодинамической доводки компрессора и турбины низкого давления» обеспечивает:

1. Получение достоверных результатов автономных испытаний КНД и ТНД, подтверждающих высокий уровень заложенных проектных решений;
2. Прохождение контрольных рубежей в соответствии с дорожной картой программы создания газотурбинного двигателя путем сокращения сроков изготовления материальной части для автономных стендовых испытаний в 2...3 раза;
3. Бездефицитное выполнение бюджета программы создания газотурбинного двигателя путем сокращения затрат на изготовление лопаточных деталей для автономных стендовых испытаний в 2...8 раз.