

На правах рукописи

Сироткин Игорь Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД
ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском авиационном институте (государственном техническом университете).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Ивкин Евгений Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Петушко Игорь Викторович

кандидат технических наук
Рухман Андрей Александрович

Ведущая организация: **ОАО ММП им. В.В. Чернышева**

Защита диссертации состоится "___" мая 2011 г. в ___ на заседании диссертационного совета Д 212.125.08 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Автореферат разослан "___" _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н, профессор



Ю.В. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Ресурс газотурбинных двигателей во многом зависит от надежности работы лопаток турбины. Лопатки турбины подвергаются действию высоких динамических и циклических нагрузок при воздействии на них термических напряжений в условиях агрессивной газовой среды.

При изготовлении охлаждаемых лопаток ТВД выполняется более 100 операций, причем в большинстве случаев после обработки (выщелачивания литниковой формы после операции литья, шлифования, гидроабразивной обработки, электроэрозионной обработки, рентгенографического анализа и т.д.) требуется очистка внутренних поверхностей лопаток. Как правило, это осуществляется за счет подачи жидкости или воздуха под давлением в систему охлаждающих каналов. На сегодняшний день, выход годных деталей по засорам 10-15%, поэтому необходим поиск новых технологических решений, которые позволят очищать лопатки, как при изготовлении, так и при их ремонте.

Для очистки прецизионных изделий широко применяются ультразвуковые ванны, которые работают на частоте 20-40кГц при интенсивности излучения в моющую среду до 2,5 Вт/см². Ультразвуковая очистка в таких ваннах эффективна в основном для наружных поверхностей деталей.

Очистка внутренних полостей и глубоких отверстий требуют более интенсивных акустических полей с соответствующими им явлениями кавитации и турбулизации жидкости, которые позволяют значительно интенсифицировать очистку сложнофасонных деталей и узлов.

Решение задачи очистки охлаждающих каналов лопаток турбины может быть осуществлено посредством применения принципиально нового метода ультразвуковой очистки, который позволит резко снизить количество брака по засорам охлаждаемых лопаток.

Цель работы. Разработка принципиально новой технологии очистки системы охлаждающих каналов лопаток турбины, которая будет применена в серийном производстве газотурбинных двигателей для снижения процента

брака по засорам. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- проведение предварительного анализа высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД и определение диапазона оптимальных параметров процесса;
- разработка экспериментальной установки для высокоинтенсивной направленной очистки охлаждаемых лопаток ГТД;
- разработка методики контроля качества процесса высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых каналов лопаток ГТД;
- проведение экспериментов по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке охлаждаемых каналов лопаток ГТД;
- получение зависимостей качества очистки от параметров процесса высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых каналов ГТД;
- разработка методических рекомендаций по подбору режимов высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых каналов лопаток ГТД.

Методы исследований. В работе использованы научные основы технологии машиностроения, теории обработки материалов давлением и ультразвуковой обработки деталей машин, а также современные методики и оборудование исследования охлаждающих каналов лопаток турбин.

Научная новизна работы заключалась в разработке концепции определения технологических режимов высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых каналов лопаток ГТД путем:

- аналитического исследования процесса высокоинтенсивной направленной очистки охлаждаемых каналов лопаток ГТД, учитывающего давления в зоне обработки и геометрические особенности конструкции лопаток турбины;
- построения алгоритма подбора режимов высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД, основанного на проведении аналитического определения эффективных диапазонов обработки и экспериментального получения технологических режимов ультразвуковой очистки.

Достоверность результатов и выводов подтверждена серией проведенных экспериментов, подтверждающих полученные аналитические заключения.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты ее работы использованы в:

- в понижении количества брака по засорам внутренних охлаждающих каналов лопаток турбины высокого давления изд. 99 (АЛ-31Ф и его модификации);
- разработке специализированной установки высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки;
- разработке технологических рекомендаций по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке охлаждающих каналов ГТД;
- при выборе экспериментально обоснованного метода контроля качества очистки охлаждаемых каналов ГТД.

Результаты работы позволили уменьшить количество брака по засорам внутренних охлаждающих каналов лопаток турбины высокого давления изд. 99 (АЛ-31Ф и его модификации) на 30 – 35% после операции хромалитирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика подбора технологических режимов высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД, основанная на расчете давлений в зоне обработки и учитывающая геометрические особенности системы охлаждающих каналов;
2. Метод контроля качества высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых каналов лопаток ГТД, включающий в себя проведение рентгеновского анализа и тепловизионного контроля качества очистки;
3. Техническое обоснование и доведение до реализации технологического процесса высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД, обеспечивающее получение высокого уровня качества очистки.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) и легла

в основу разработки серии ультразвукового оборудования для очистки деталей ГТД, таких как форсунки, коллектора, лопатки турбины.

На основе полученных в работе данных и алгоритмов на ФГУП ММПШ «Салют» отработана и внедрена в серийное производство технологическая операция высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД.

Личное участие автора. В диссертационной работе представлены результаты, полученные автором самостоятельно. Соискателем формулировались цели и задачи работы, разрабатывались методики, планировались эксперименты, обрабатывались и анализировались результаты исследований.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на:

1. Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России 2008" в г. Москве.
2. Всероссийской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2008" в г. Москве.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы из них 1 в рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка использованной литературы, изложена на 136 страницах, содержит 42 рисунка, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется современное состояние проблемы очистки охлаждаемых лопаток ГТД, и обосновывается актуальность работы. Сформулированы научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе производится анализ видов загрязнений, возникающих на серийном производстве авиационных двигателей и при ремонтных операциях, а также анализ мощных сред и методов контроля качества очистки. Формулируются цели и задачи исследования.

Анализ существующих методов очистки показал, что изучению вопроса очистки сложнофасонных деталей в машиностроении не придавалось особого значения, очистка проводится, как правило, только на финишных операциях производства, а в процессе ремонта перед входным контролем и на финишных операциях соответственно, что часто приводит к отбраковыванию деталей по причине несвоевременной очистки.

Производство охлаждаемых лопаток турбины охватывают большой спектр технологических операций, таких как литье по выплавляемым моделям, многочисленные операции механической обработки (протягивание, шлифование, фрезерование), электроэрозионная обработка отверстий входной кромки, а также большой спектр операций по улучшению поверхности и внутренних охлаждающих каналов лопаток турбины. Наряду с этим можно отметить, что на контрольных операциях может происходить засорение внутренних каналов специфическими элементами (рентгеновская фотосъемка охлаждающих каналов).

Сегодня известно три наиболее распространенных направления развития ультразвуковой очистки (рис. 1):

- ультразвуковая очистка в ваннах;
- направленная ультразвуковая очистка;
- контактная ультразвуковая очистка.

Наибольшее распространение получила ультразвуковая очистка в ваннах из-за ее универсальности.

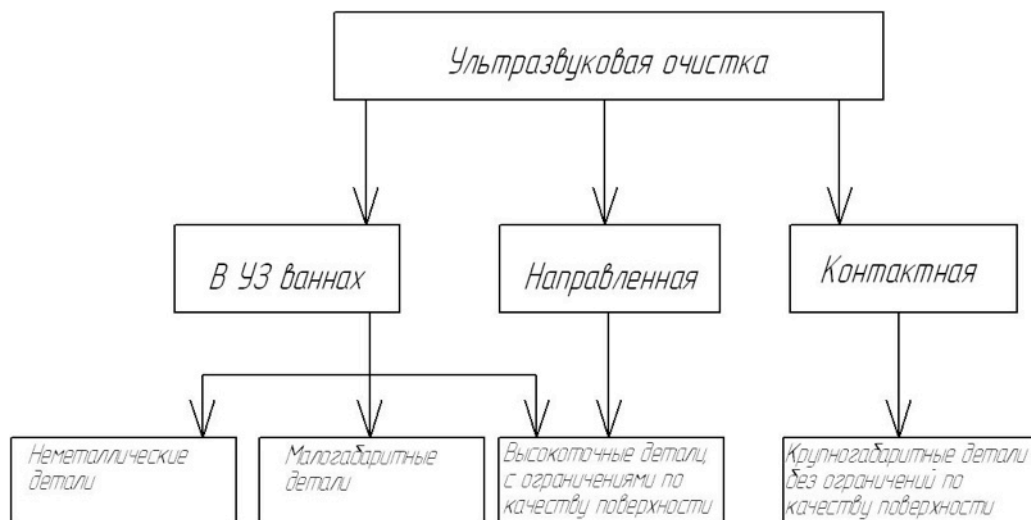


Рис. 1. Классификация методов ультразвуковой очистки.

Загрязнения можно подразделить на следующие типы:

1. Производственные, которые проявляются в процессе производства, и отличаться друг от друга в зависимости от тех операций, которые предшествовали обнаружению данного загрязнения;
2. Эксплуатационные, проявляющиеся на этапах ремонта ГТД.

На производстве и в процессе ремонта, как правило, сталкиваются с композицией различных типов загрязнений. Это связано, в большей мере, с тем, что в процессе изготовления деталей, каждая операция обработки включает в себя множество факторов воздействия на деталь, а на этапах ремонта, сталкиваются с загрязнениями, в основном, биологического характера (мелкие частицы песка, солевых отложений и т.п., в зависимости от характера эксплуатации ГТД), процесса износа деталей (стружка), использования специальных жидкостей (масла, консервационные жидкости, топлива и т.д.). Это вносит необходимость анализа большинства производственных операций, а также загрязнений, вызванных условиями эксплуатации.

Исходя из физико-химических свойств загрязнений, их можно классифицировать по трем основным признакам:

1. По способности загрязнения противостоять воздействию микроударных нагрузок.
2. По прочности связи пленки загрязнений с очищаемой поверхностью.
3. По характеру химического взаимодействия загрязнения с моющей жидкостью.

Проанализировав имеющуюся научно-техническую информацию можно сделать вывод о том, что в настоящее время нет технологической операции очистки охлаждаемых лопаток турбины, полностью удовлетворяющей условиям серийного производства и критериям качества очистки. Также следует отметить отсутствие методики контроля качества очистки лопаток турбины.

Во второй главе описана технология производства литых охлаждаемых лопаток по выплавляемым моделям, представлены физические основы ультразвука и ультразвуковой очистки, проведен анализ моющих сред

применяемых для ультразвуковой очистки деталей, произведен расчет и анализ воздействия давлений, вызванных ультразвуковыми колебаниями в моющей среде.

Производство литых охлаждаемых лопаток турбины является одним из наиболее сложных технологических процессов в машиностроении. Практически каждая операция их производства вносит специфические загрязнения (табл. 1).

Таблица 1 – Маршрутный технологический процесс обработки рабочей лопатки турбины.

№ п/п	Операция	Оборудование
1	Отливка без припуска на механическую обработку по трактовым поверхностям	Технологический комплект оборудования
2	Электроэрозионная обработка отверстий	Электроэрозионный станок
3	Гидроабразивная обработка трактовых поверхностей, внутренней полости	Гидроабразивная установка
4	Шлифование базовых поверхностей	Электрохимический станок
6	Нанесение защитных покрытий	Циркуляционная установка
10	шлифование клина хвостовика	Электрохимический станок
11	Шлифование «елочного» профиля хвостовика	Шлифовальный станок
16	Сборка комплекта лопаток в технологический диск	Слесарный верстак
18	Отжиг	Вакуумная печь СЭВ 5,5/11,5
20	Контроль методом ЛЮМ-А	Специальная установка

Частицы среды, в которой распространяется ультразвук, совершают колебательные движения около своих положений равновесия. Колеблются также значения их скоростей и ускорений. Можно поэтому считать, что в области, где существует ультразвуковая волна, одновременно распространяются волны смещений, скоростей и ускорений. Ультразвуковое поле в жидкости характеризуется в классической акустике звуковым давлением и интенсивностью колебаний:

$$P_{зв} = \rho c \omega \epsilon \cos(\omega t - kx) = P_m \cos(\omega t - kx); \quad (1)$$

$$J = P_m^2 / 2\rho c, \quad (2)$$

Ультразвуковая волна, как и любая другая. Временной период и длина волны связаны между собой следующим соотношением:

$$\lambda = cT = c / f \quad (3)$$

Участок среды обладает потенциальной и кинетической энергией соответственно:

$$W_{\text{п}} = \frac{kV}{2} \frac{\omega^2 A^2}{\tilde{n}^2} \cos^2 \omega (t - x / c); \quad (4)$$

$$W_{\text{к}} = \frac{\rho V}{2} \omega^2 A^2 \cos^2 \omega (t - x / c). \quad (5)$$

К ультразвуковым аппаратам для очистки деталей газотурбинных двигателей предъявляются следующие требования:

1. Аппарат должен обеспечивать большой переход акустической энергии излучателя в энергию кавитационных пузырьков.
2. Аппарат должен работать на частотах ниже 40 кГц, обеспечивающих сравнительно большие (сотни микрометров) размеры пульсирующих кавитационных пузырьков.
3. Обрабатываемый объем в аппарате должен быть невелик. Для обеспечения большой плотности энергии, что, в свою очередь, должно способствовать образованию большего количества кавитационных пузырьков в единице объема.

Ультразвуковые колебания, вызывающие кавитацию в жидкой среде интенсифицируют процесс очистки, отделяя загрязнения микроударами частиц технической моющей среды об очищаемую поверхность, а также вынос загрязнения из зоны очистки. Химическое воздействие возможно интенсифицировать посредством повышения температуры моющей среды.

На технологические моющие среды, применяемые для ультразвуковой очистки, накладывается множество ограничений:

1. Наличие хорошей смачиваемости загрязнений и очищаемой поверхности.

2. Разрушение связи загрязнений с поверхностью и перевод загрязнений в раствор.
3. Стабилизация загрязнений в моющем растворе с целью предотвращения их ресорбции.
4. Минимальное воздействие на человека.
5. Моющая среда не должна вступать в химическое взаимодействие с материалом очищаемой детали.
6. Моющая среда должна быть полностью биоразлагаемой.

Проанализировав существующие технические моющие среды и характерные виды загрязнений, для проведения экспериментов по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке были выбраны жидкости на основе неионогенных поверхностно-активных веществ.

Для проведения аналитического исследования процесса высокоинтенсивной ультразвуковой очистки необходимо получение численного значения давления в зоне обработки. Давление в зоне обработки будет формироваться из трех составляющих:

1. Давления рабочей жидкости, p

$$p = p_1 + p_2 - 2 \frac{\sigma}{R}$$

2. Ударного давления, захлопывающихся пузырьков, p_3

$$p_3 = p_2 \left[(-1 + k_1) \times \frac{p}{p_2} \right]^{k_1 - 1}$$

3. Звукового давления, p_4

$$p_4 = \rho_0 \cdot c_0 \cdot \omega \cdot \xi \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Исходными данными для расчета давления на срезе ультразвукового концентратора послужили:

$\rho = 1.255$	плотность невозмущенной среды, кг/м ³ ,
$c_0 = 1450$	скорость распространения звуковой волны, м/с ,
$\lambda = 2.2 \cdot 10^{-3}$	длина волны, м,
$c_p = 4.19 \cdot 10^3$	теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кгК,
$T = 293$	температура, К,

$\sigma = 7.35 \cdot 10^{-2}$	коэффициент поверхностного натяжения, Н/м ,
$R = 50 \cdot 10^{-6}$	радиус пузырька воды, м,
$R_t = 461.5$	универсальная газовая постоянная, Дж/(кг*К),
$V = 0.01$	объем УЗ ванны, м ³ ,
$f = 22000$	частота, Гц.

В конечном счете, было получено общее давление на поверхность, Па:

$$P = p + p_3 + p_4$$

$$P = 1.347 \cdot 10^7$$

Полученные данные были проанализированы в расчетном модуле программы Solidworks – Floworks для оценки распределения давлений в охлаждающих каналах лопатки (рис. 2), для чего была выполнена 3-мерная модель лопатки турбины высокого давления изд. 99 (АЛ-31Ф).

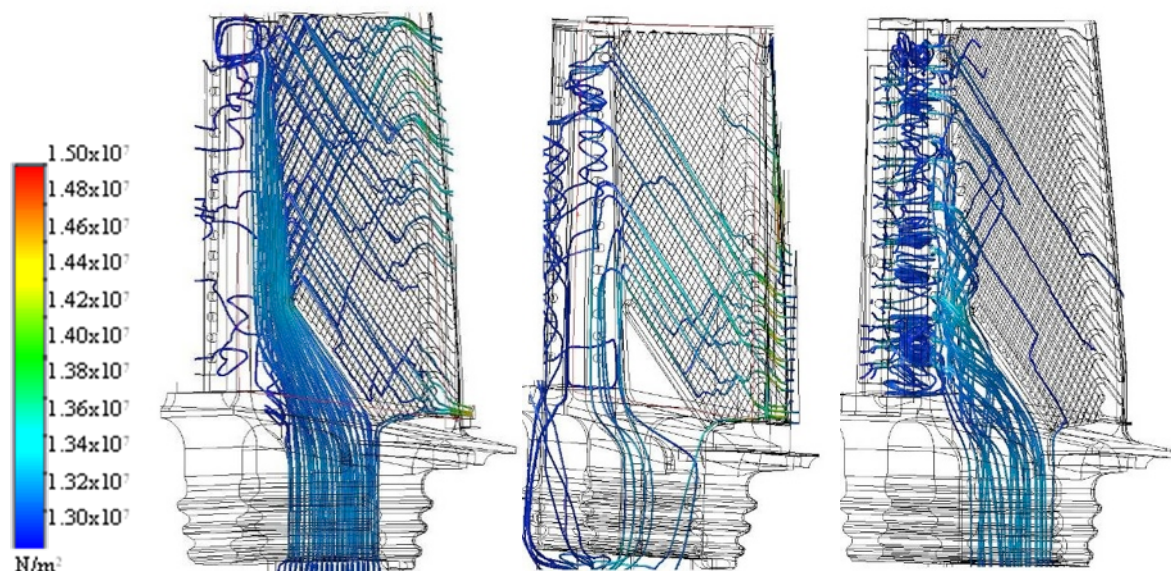


Рис. 2. Предварительный анализ высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки при обработке со стороны замка, выходной и входной кромки соответственно

Результатом анализа распределения давлений в охлаждающих каналах лопатки турбины в приложении Solidworks Floworks явилось увеличение давлений к выходной кромке лопаток вне зависимости от стороны обработки. При обработке со стороны выходной кромки, максимальное давление будет формироваться внутри лопатки в прикромочной области, а по мере

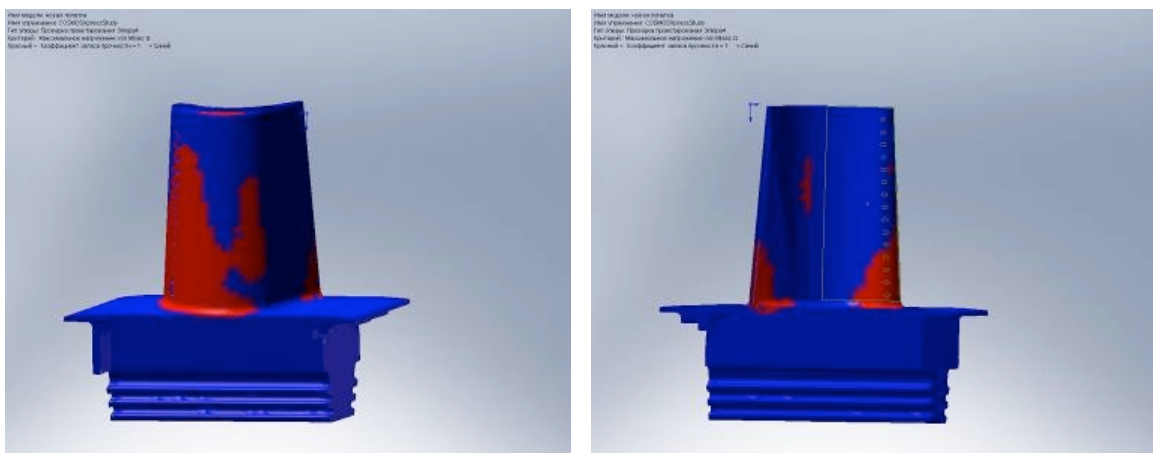
прохождения волны по каналам, давление будет уменьшаться. Данный аспект говорит о том, что при обработке основная часть загрязнений будет вымываться через отверстия выходной кромки. Поэтому при разработке технологических рекомендаций было принято решение начинать обработку с замковой части (на этом этапе происходит взрыхление, отслоение загрязнения и частичный его выход через выходное отверстие), затем необходимо производить очистку со стороны входной кромки (это решит задачу очистки наиболее сложного участка лопатки- пересекающихся каналов) и завершающим этапом очистки будет воздействие на выходную кромку (это позволит вытеснить загрязнения через каналы большого сечения в замке и произвести очистку охлаждающей области входной кромки).

Также на данном этапе работы подбирался оптимальный зазор между торцом волновода и обрабатываемой поверхностью лопатки, который составил от 2 до 7 мм. При уменьшении указанного зазора происходит резкое увеличение давлений в области между концентратором ультразвуковых колебаний и поверхностью лопатки. При этом скорость кавитирующего потока жидкости резко уменьшается в указанной области, в следствие чего будет происходить снижение эффекта очистки. При увеличении зазора между ультразвуковым концентратором и входными отверстиями более 7мм, наблюдается эффект обтекания лопатки потоком кавитирующей жидкости, в следствие чего будет происходить очистка только наружных поверхностей лопатки.

Затем, полученные данные расчета давлений и параметры материала лопатки (ЖС-6У) были проанализированы в программе Solidworks для нахождения деформируемых поверхностей под действием ультразвуковых колебаний в жидкости. На рисунке 3 представлены результаты расчета деформируемых поверхностей по видам (спинка, корыто, замок) и по месту воздействия ультразвуковых колебаний (отверстия на входной кромке пера лопатки, отверстия на выходной кромке пера лопатки, отверстия в замковой части лопатки).

Результаты предварительных теоретических исследований показывают, что критическими будут являться корыто и спинка лопатки

турбины при обработке ее со стороны отверстий на входной кромке. Для исследования деформации под действием кавитационного потока были проведены эксперименты. Образец из материала ЖС-6У был подвергнут действию кавитационного потока в течение 10 минут при заданных параметрах. После обработки образец был исследован на предмет изменения геометрии (деформация) и изменения поверхностного слоя. Результаты анализа показали, что изменений геометрии и поверхностного слоя в результате указанной обработки не происходит.



Деформируемые поверхности при ультразвуковом воздействии на отверстия входной кромки (спинка, корыто)

Рис. 3. Анализ деформируемых областей в программе Solidworks.

Третья глава посвящена постановке экспериментов по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке охлаждаемых лопаток турбины. Описываются экспериментальные исследования по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке охлаждающих каналов лопаток турбины.

Для оценки загрязненности внутренних каналов лопаток турбины были выбраны следующие методы контроля:

1. Рентгенографические снимки.
2. Тепловизионные испытания.

Рентгенографический анализ лопаток показывает места залегания и характер загрязнений. Анализ результатов рентгенографического анализа

(рентгеновские снимки) позволяет получить максимальную информацию о последовательности очистки каждой конкретной лопатки.

Тепловизионные испытания обнаруживают области залегаания всех видов загрязнений, нарушения во внутренних каналах, а также возможные загрязнения, не выявленные путем рентгенографического анализа.






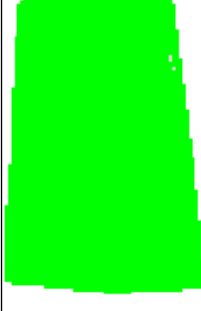
По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- во внутренней полости присутствуют загрязнения, снижающие эффективность охлаждения лопаток (табл. 2);
- лопатки со стороны хвостовика практически не имеют загрязнений;
- наибольшее загрязнение приходится на внутренние каналы пера лопатки, в особенности на выходную кромку лопатки (табл. 2);
- на ряде лопаток количество загрязнений изменяется от минимального к максимальному значению от центральной части к входной и выходной кромке.

В процессе очистки были получены следующие результаты:

- средняя масса удаленных из одной лопатки загрязнений – 50-110гр при времени обработки до 2мин;
- оптимальный зазор от торца волновода до зоны обработки от 2 до 7мм;
- при обработке лопатки со стороны замка выделяется в 2-2,5 раза загрязнений больше, но качество очистки повышалось при последовательной обработке со всех сторон.

Таблица 2 – Результаты рентгенографических и тепловизионных исследований качества высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины

Рентгеновский снимок до очистки	Тепловизионный снимок до очистки	Тепловизионный снимок после очистки	Краткие выводы
			1. Охлаждение затруднено в центральной части лопатки и области выходной кромки. 2. После очистки охлаждение лопатки удовлетворяет ТУ.
			1. Охлаждение затруднено в центральной части лопатки и области выходной кромки. 2. После очистки охлаждение лопатки удовлетворяет ТУ.

Технология может решить проблему очистки лопаток, как при их изготовлении, так и при ремонте при выполнении следующих условий:

- при изготовлении необходимо очищать лопатки после каждой выполненной операции, тогда общее время очистки (сейчас 6 минут) можно снизить в 4 – 5 раз;
- после операции электроэрозионной перфорации отверстий наблюдаются смолистые отложения. Для более качественной очистки после указанной операции необходимо проведение предварительной замочки лопаток в технической моющей среде при температуре 60⁰С. Для ускорения данного процесса необходимо производить замочку деталей в ультразвуковых ваннах объемного действия;
- очистку проводить в подогретой до 60⁰С дистиллированной воде;
- для предотвращения вторичного загрязнения лопаток рекомендуется очистку каждой лопатки осуществлять в профильтрованной жидкости;

- очищенные с помощью ультразвука лопатки необходимо промывать проточной водой и подвергать сушке.

Разработана установка на базе пьезокерамических ультразвуковых преобразователей с воздушным охлаждением и ультразвукового генератора с выходной мощностью до 1000Вт с программатором (рис. 4, 5).

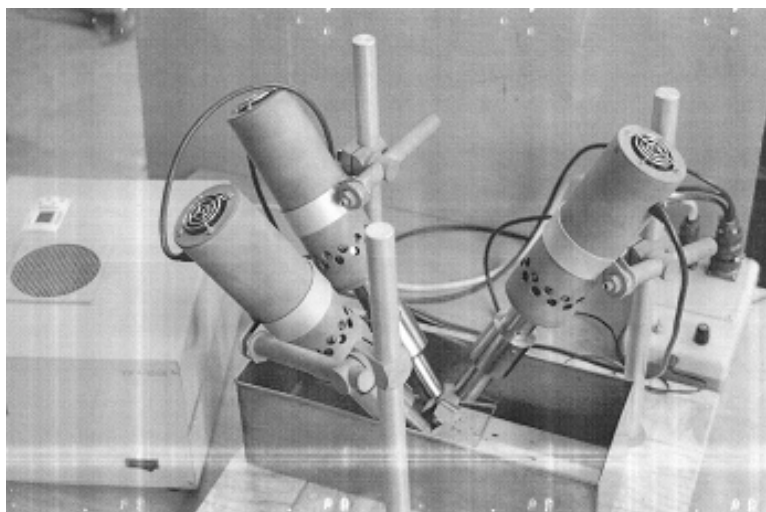
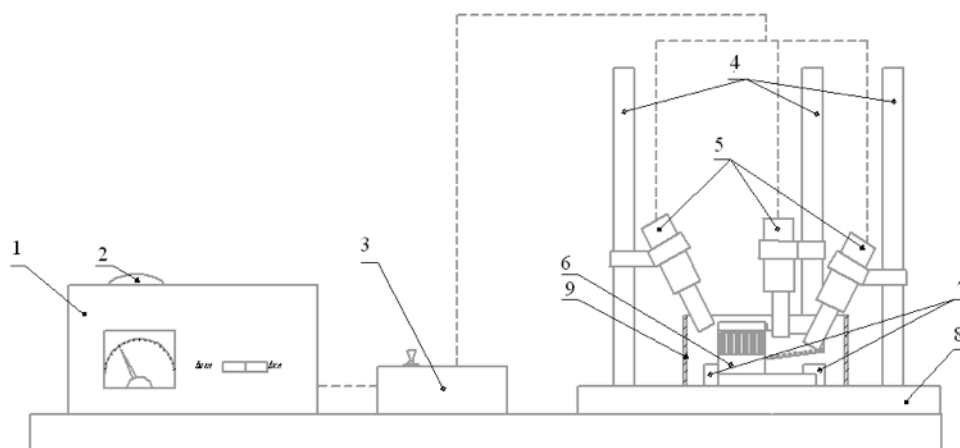


Рис. 4. Общий вид установки высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины:

1- генератор; 2- программатор; 3- коммутатор; 4- стойки;
5- преобразователи; 6- приспособление для фиксации и ориентирования лопатки; 7- направляющие; 8- стол; 9- ванна.

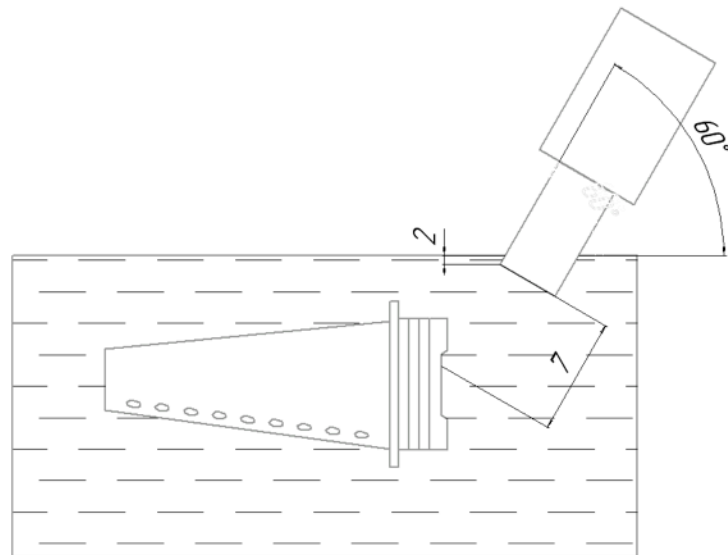
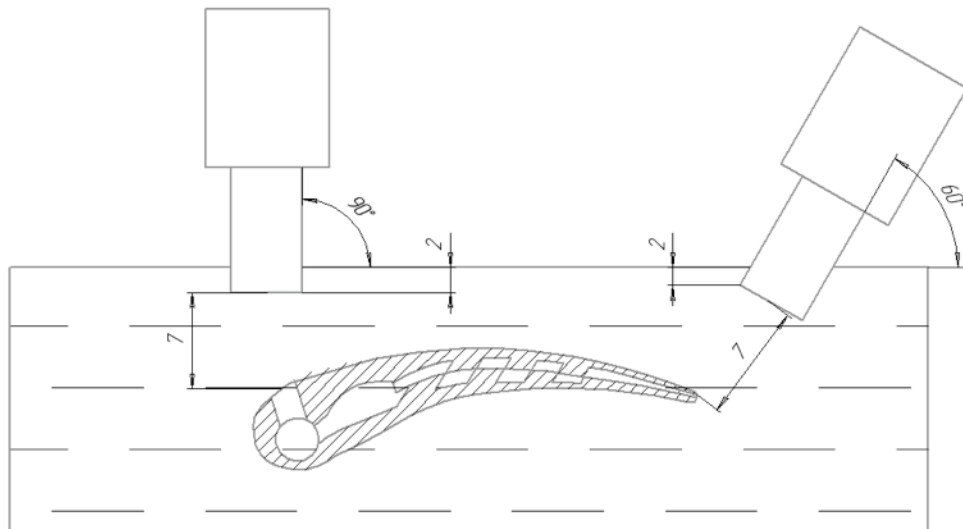
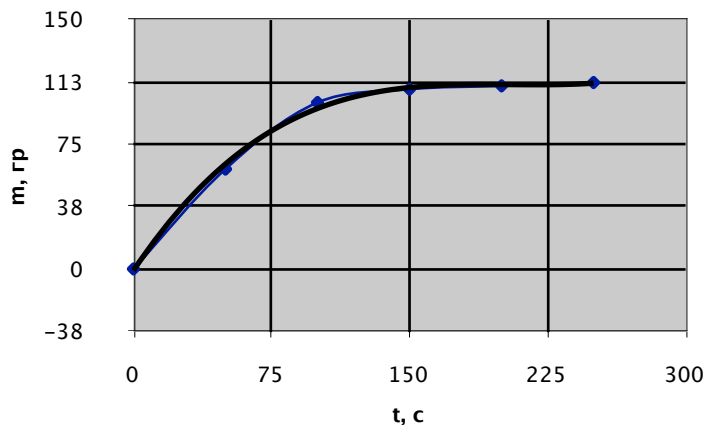


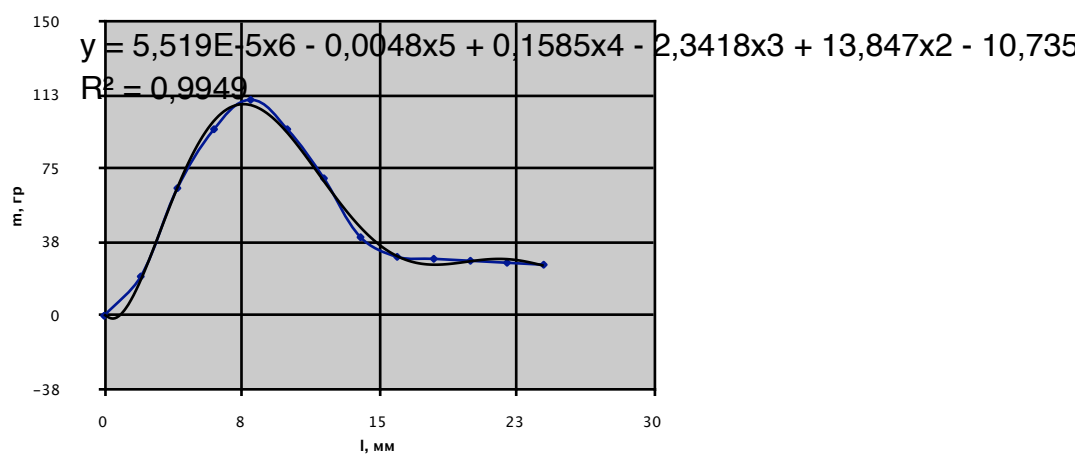
Рис. 5. Расположение концентраторов относительно сторон лопатки.

В результате проведенной работы были экспериментально получены зависимости массы вымываемого из системы охлаждающих каналов лопаток турбины от времени обработки и расстояния от отверстия до торцевой части концентратора (рис. 6, 7). Данные зависимости были проанализированы и получены функции $m(t)$ и $m(l)$.



$$m(t) = 10^{-5} \cdot t^3 - 0,0081 \cdot t^2 + 1,6512 \cdot t - 0,873$$

Рис. 6. Зависимость массы (m) загрязнения вымываемого из системы охлаждаемых каналов лопаток турбины от времени обработки (t).



$$m(l) = 6E-05 \cdot l^6 - 0,0048 \cdot l^5 + 0,1585 \cdot l^4 - 2,3418 \cdot l^3 + 13,847 \cdot l^2 - 10,735 \cdot l + 0,5954$$

Рис. 7. Зависимость массы (m) загрязнения вымываемого из системы охлаждаемых каналов лопаток турбины от расстояния от торца концентратора до соответствующего отверстия лопатки (l).

Четвертая глава посвящена разработке на основе экспериментов технологических рекомендаций по выбору режимов высокоинтенсивной направленной очистки охлаждаемых лопаток турбины.

При разработке технологии ультразвуковой очистки необходимо было учитывать факторы, обусловленные спецификой производства. Тем не менее, можно выделить некоторые общие принципы:

1. Анализ свойств загрязнений.

2. Учет ограничений, накладываемых на технологический процесс очистки материалом обрабатываемой детали, особенностями конструкции детали, условиями эксплуатации.
3. Определение необходимой производительности процесса ультразвуковой очистки.
4. Определение критерия качества очистки и выбор метода контроля.
5. Выбор технологических моющих сред.
7. Устранение причин повторного загрязнения обрабатываемой детали.
8. Разработка или выбор технологического ультразвукового оборудования.

В результате серии проведенных экспериментов можно сформулировать технологические рекомендации по высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистке охлаждаемых лопаток ГТД.

1. После операций электроэрозионной обработки и хромалитирования лопаток необходимо проводить:

1.1. Замочку лопаток в ультразвуковой ванне в течение 30 мин с применением поверхностно-активного вещества «ТМ- Унилан-Карбон» при температуре 60°C;

1.2. Последовательную ультразвуковую очистку на разработанной установке с расположением концентраторов относительно осей входных отверстий под углом $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, расстояние от торца концентратора до поверхности лопатки 7мм, глубина погружения торца концентратора в жидкость- не более 2мм.

1.3. Просушка деталей сжатым воздухом.

1.4. Тепловизионный контроль качества охлаждения лопаток турбины.

2. После операций механообработки (протягивание, полирование, шлифование и т.д.) исключается операция предварительной замочки лопаток.

Пятая глава посвящена вопросам промышленного применения высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины.

Процесс ультразвуковой очистки лопаток необходимо проводить практически после каждого типа операции производства лопаток:

1. Выщелачивание керамического стержня.
2. Механической обработки.
3. Хромалитирования поверхности пера.

4. Рентгеновский анализ внутренних охлаждающих каналов лопаток турбины.

В процессе ремонтных работ необходимо:

1. Проводить очистку всех поступающих в ремонт лопаток.
2. Проводить отбраковку лопаток, не подлежащих восстановлению, на основе рентгенографического анализа и тепловизионных испытаний.
3. Проводить повторную очистку после рентгенографического анализа и ориентироваться на результаты тепловизионных испытаний.

На основе установки разработанной в рамках диссертации была спроектирована и изготовлена роботизированная установка с использованием одного ультразвукового концентратора (рис. 8).



Рис. 8. Общий вид установки для очистки сопловых блоков.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе проведенных исследований определен алгоритм подбора режима высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД, который состоит из расчетной части, когда определяются давления в зоне обработки и диапазоны параметров обработки, и экспериментальной части, когда в полученных диапазонах подбираются рабочие параметры технологической операции очистки. Это позволяет снизить количество проводимых экспериментов на этапе внедрения операции очистки в серийное производство.

2. Доказана необходимость проведения очистки системы охлаждающих каналов после операций механической, электроэрозионной обработок, хромалитирования и т.д. Это вызвано тем фактом, что каждая из операций по изготовлению лопаток вносит свои специфические загрязнения в систему охлаждающих каналов лопаток турбины. В конечном счете, при совмещении типов загрязнений усложняется процесс подбора технологической моющей среды.

3. Полученные в 3 главе зависимости массы (m) загрязнения вымываемого из системы охлаждаемых каналов лопаток турбины от времени обработки и расстояния от торца концентратора до соответствующего отверстия лопатки позволяют без проведения предварительных расчетов назначать режимы технологической операции высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД.

4. На основании проведенного эксперимента установлено, что в процессе высокоинтенсивной ультразвуковой очистки в кавитационном поле может происходить процесс упрочнения поверхностного слоя обрабатываемой детали.

5. В результате применения разработанного технологического процесса на производстве количество брака по засорам охлаждаемых лопаток ГТД снизилось на 60%.

6. На разработанном в рамках диссертации оборудовании для высокоинтенсивной ультразвуковой очистки, в создаваемом кавитационном поле не происходит разрушения поверхности обрабатываемой лопатки в пределах заданного времени обработки.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. **Сироткин И.А.** Особенности высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждающих каналов лопаток турбины // Сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России". М.: Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. 2008. - С. 53.

2. **Сироткин И.А.** Ультразвуковая очистка охлаждающих каналов лопаток турбины газотурбинных установок // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2008". М.: Российский гос. технологический ун-т им. К.Э. Циолковского, МАТИ. 2008. - С. 47-48.
3. **Сироткин И.А.** Елисеев В.Н. Ультразвуковое упрочнение моноколес ГТД из материала ВТ-6 // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2008". М.: Российский гос. технологический ун-т им. К.Э. Циолковского, МАТИ. 2008. С. 48-49.
4. Ивкин Е.И. **Сироткин И.А.** Методы контроля качества очистки охлаждаемых лопаток турбины в процессе их производства и ремонтных операций // Вестник Московского авиационного института. Т. 16, №4. 2009. С. 37-40.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сироткин Игорь Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД
ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ**