

На правах рукописи

Толкачев Александр Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ВИБРАЦИОННОГО ПОЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД
АБРАЗИВНЫМИ ГРАНУЛАМИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Рыбинском государственном авиационном техническом университете имени П. А. Соловьева.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Волков Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет».

Макаров Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет».

Защита диссертации состоится 29 декабря 2015 года в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.rsatu.ru федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Автореферат разослан 28 октября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Надеждин Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД) происходит постоянная интенсификация режимов работы и увеличение сроков эксплуатации отдельных деталей, сборочных единиц и двигателя в целом. Данная тенденция в полной мере относится и к лопаткам компрессора, которые являются самыми многочисленными деталями в газотурбинном двигателе.

В конструкторской документации к лопаткам компрессора современных ГТД закладываются высокие требования к состоянию поверхности и геометрической точности наружного контура деталей.

Для обеспечения соответствующих характеристик лопаток значительное внимание уделяется отделочным (финишным) операциям. Большую долю данных операций занимает ручная обработка. Использование ручного труда накладывает существенные ограничения на достижение требуемой производительности и качества изготавливаемых лопаток компрессоров. С целью замены ручной полировальной обработки в производстве ГТД используются такие методы обработки как центробежное и планетарное полирование. Однако, наиболее широко используется автоматизированная вибрационная полировальная обработка абразивными гранулами в специальных вибрационных установках. Вибрационное полирование – это высокоэффективный метод обработки. К его достоинствам относятся высокая производительность, отсутствие риска образования прижогов и исключение влияния ручного труда полировщиков и слесарей на результат обработки. Для лопаток компрессора вибрационное полирование является завершающей операцией технологического процесса. На этом этапе окончательно формируются: геометрические размеры наружного контура лопаток, параметры качества поверхностного слоя.

В настоящее время существует большое количество работ, в которых даются рекомендации по назначению режимов и условий вибрационного полирования деталей абразивными гранулами. Большинство авторов для назначения технологических условий полирования используют довольно сложные зависимости, требующие большого количества справочных, расчётных и экспериментальных данных. В реальных производственных условиях назначение режимов вибрационного полирования производится, в большей степени, на основе существующего опыта изготовления и эксплуатации лопаток компрессоров. Это обусловлено тем, что существующие модели вибрационного полирования абразивными гранулами в полной мере не учитывают конструктивных особенностей лопаток компрессоров ГТД.

Цель работы. Повышение производительности вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД за счёт оптимизации режимов и условий обработки.

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

1) Определить факторы, влияющие на производительность вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД абразивными гранулами.

2) Провести исследования по определению допустимой величины загрузки рабочей камеры вибрационного станка торового типа.

3) Разработать математическую модель, описывающую траекторию движения рабочей среды и обрабатываемых деталей в виброполировальной установке.

4) Разработать динамическую модель, описывающую контактное взаимодействие цепочки колеблющихся гранул.

5) Разработать математическую модель для расчёта составляющих силы микро-резания единичным абразивным зерном.

6) Разработать методику и алгоритм назначения технологических параметров процесса вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились с использованием теории колебаний, теории резания, теории вероятности, а также на основе общих положений технологии машиностроения. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях на специальном оборудовании. При этом применялся метод статистической обработки результатов. Экспериментальные исследования проводились с использованием современной аппаратуры, методик и пакетов компьютерных программ: Microsoft Office, Mathcad и др.

Научная новизна. Разработана математическая модель вибрационного полирования наружных поверхностей лопаток компрессоров ГТД абразивными гранулами, учитывающая геометрические особенности лопаток компрессора и динамические характеристики движения рабочей среды.

Получены зависимости, позволяющие определить параметры процесса обработки, необходимые для достижения требуемой геометрической точности размеров радиусов кромок лопаток, а также интенсивности съёма металла с наружных поверхностей, с учётом исходного состояния поверхности, габаритов и массы лопаток.

Получены экспериментальные и теоретические зависимости для определения минимально необходимого уровня загрузки рабочей камеры для начала процесса резания и максимально допустимого уровня загрузки рабочей камеры, при достижении которого происходит процесс пластической деформации кромки лопатки.

Практическая значимость работы заключается в разработке комплексной методики назначения технологических условий вибрационного полирования лопаток ГТД, реализованной в виде руководящих технических материалов. Использование руководящих материалов позволяет технологам сократить процесс назначения режимов вибрационного полирования и определить технологические условия, приводящие к получению требуемого результата обработки с максимально возможной производительностью.

Реализация результатов работы. Основные положения диссертации прошли проверку при внедрении процессов вибрационного полирования на «НПО «Сатурн». На основании результатов, полученных в работе, был разработан руководящий технологический материал (РТМ) «Виброполировальная обработка лопаток ГТД». Также на

основании результатов работы создано учебное пособие, используемое в учебном процессе РГАТУ им. П. А. Соловьёва по курсу «Технология машиностроения».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях: «Теплофизика технологических процессов» (РГАТА, Рыбинск), «Проблемы создания перспективных авиационных двигателей» (ЦИАМ, Москва) и международной школе-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов им. П. А. Соловьёва и В. Н. Кондратьева «Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений» (РГАТА, Рыбинск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе: 4 в рецензируемых научных журналах и изданиях, 6 в других изданиях.

Личный вклад автора. Проведение обзора современного состояния технологических возможностей вибрационного полирования абразивными гранулами. Разработка математической модели вибрационного полирования лопаток ГТД. Доработка математической модели определения составляющих силы резания в соответствии с условиями вибрационного полирования. Разработка методики назначения технологических условий вибрационного полирования. Проведение экспериментальных исследований.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 136 страниц, 82 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 120 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цель и методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и её структуре.

В первой главе произведён анализ современного состояния вибрационного полирования, рассматриваются технологические возможности методов вибрационного полирования, для чего проводится обзор представленных на российском рынке конструкций оборудования и типов рабочих тел. Выявлено, что существует несколько наиболее распространённых типов установок, производимых рассмотренными компаниями: торовые, лотковые, спиральные.

Определено, что наиболее эффективной при вибрационном полировании лопаток компрессора газотурбинного двигателя является торовая установка. Применение данного типа оборудования позволяет вести обработку в автоматическом цикле, минимизировать участие человека в процессе полировальной обработки. Торовая установка позволяет обеспечить наибольшую производительность обработки лопаток ГТД в незакреплённом состоянии и механизировать их выгрузку после завершения процесса обработки. Данный тип оборудования легко встраивается в технологически цикл производства, не требует отдельного помещения и легко переналаживается при необходимости изменения условий обработки.

В ходе анализа закономерностей лежащих в основе процесса вибрационного полирования рассмотрены работы таких учёных как А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, С.Н. Шевцов, Сергиев А.П., Ю.В. Димов, В.Г. Санамян, производивших моделирование процесса вибрационного полирования. Большинство предлагаемых моделей базируются на том, что работа установок всех типов основана на процессе вибробункеризации. Сам процесс вибробункеризации основан на явлении виброперемещения или вибротранспортирования. Изучению этого явления посвящены работы многих авторов: Блехмана И.И., Гончаревича И.Ф., Повидайло В.А. и других.

В работах Бабичева А.П., Тамаркина М.А., Клименко А.А., Трилисского В.О., Зверовщикова В.З., Сергиева А.П. разработаны методики расчёта технологических параметров процесса обработки абразивными гранулами, основанные на моделях контактного взаимодействия абразивного инструмента с поверхностью детали с учётом свойств обрабатываемого материала.

Указанные модели учитывают основные особенности процесса взаимодействия абразивной гранулы и детали при вибрационном полировании. Вместе с тем, данные модели требуют дополнения для описания процессов контактного взаимодействия абразивной гранулы с аэродинамическими поверхностями деталей ГТД, в том числе лопаток ГТД.

Проведенный анализ известных источников позволил определить современные направления развития вибрационного полирования и его использования в промышленности и сделать выводы о том, что вопросы эффективного применения вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД изучены недостаточно. Процесс вибрационного полирования лопаток компрессора имеет свои особенности, связанные с геометрической формой, размерами и массой деталей, а также механизмом воздействия абразивных гранул на обрабатываемую поверхность.

Во второй главе определены факторы, влияющие на производительность вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД. К данным факторам относятся: силы воздействия абразивной гранулы на лопатку, траектории движения абразивных гранул и лопаток, форма, размер, плотность и зернистость абразивных гранул, уровень загрузки абразивных гранул, амплитуда и частота колебаний установки.

Произведена разработка математической модели вибрационного полирования лопаток ГТД. Рассмотрен принцип работы торовой установки, проанализировано движение абразивных гранул и обрабатываемых лопаток в рабочем контейнере установки.

Установлено, что при вибрационном полировании в торовых установках лопатка компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) занимает в среде колеблющихся абразивных гранул такое положение, при котором вектор движения абразивных гранул направлен по касательной к поверхности пера лопатки, как это показано на рисунке 1. Именно при таком положении лопатки все силы, действующие на неё, находятся в сбалансированном состоянии. Специфика формы лопатки компрессора заключается в том, что толщина пера лопатки значительно меньше его высоты и ширины.

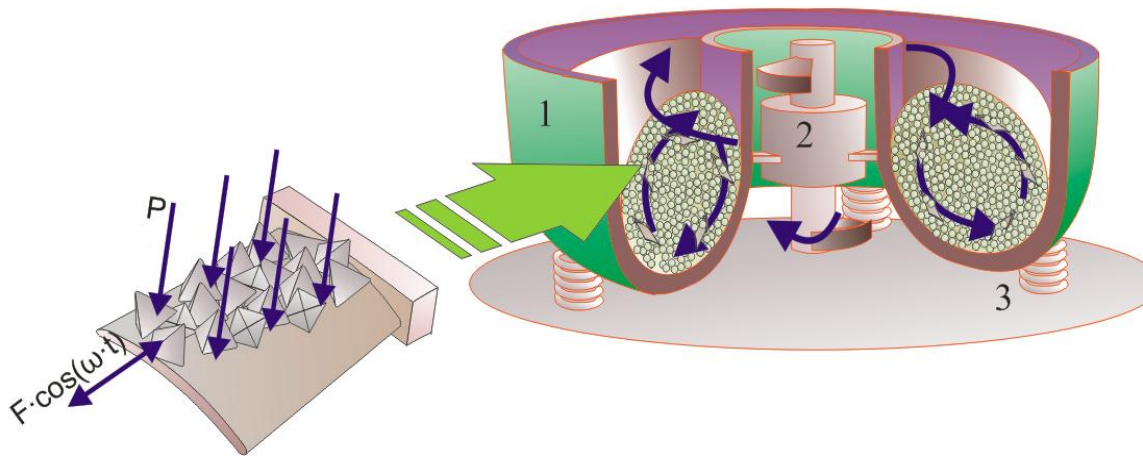


Рисунок 1 – Схема взаимодействия абразивных гранул и лопаток компрессора ГТД в торовой виброполировальной установке

На рисунке 1 (1) – рабочая камера; (2) – привод; (3) – пружинная подвеска; P – давление со стороны абразивных гранул; $F \cdot \cos(\omega \cdot t)$ – колебательное движение абразивных гранул и функция, определяющая закон изменение силы, возбуждающей колебания.

Сила, которая действует со стороны абразивной гранулы на деталь, складывается из двух составляющих: F_n – нормальная и F_τ – тангенциальная.

Предложены зависимости для определения составляющих силы. Относительное движение стенки установки с абразивными гранулами и воздействие на лопатки происходят через приведенную массу детали и абразивных гранул, определяющих их инерционные свойства. Зависимость для определения тангенциальной составляющей силы может быть представлена в следующем виде

$$F_\tau = f(m_0, m, A, \omega), \quad (1)$$

где F_τ – тангенциальная составляющая силы, Н; m_0 – масса детали, кг; m – масса абразивной гранулы, кг; A – амплитуда колебаний установки, м; ω – частота колебаний установки, рад/с;

С целью определения изменения динамических характеристик абразивных гранул по мере их удаления от стенки установки предложена модель цепочки колеблющихся абразивных гранул, представленная на рисунке 2.

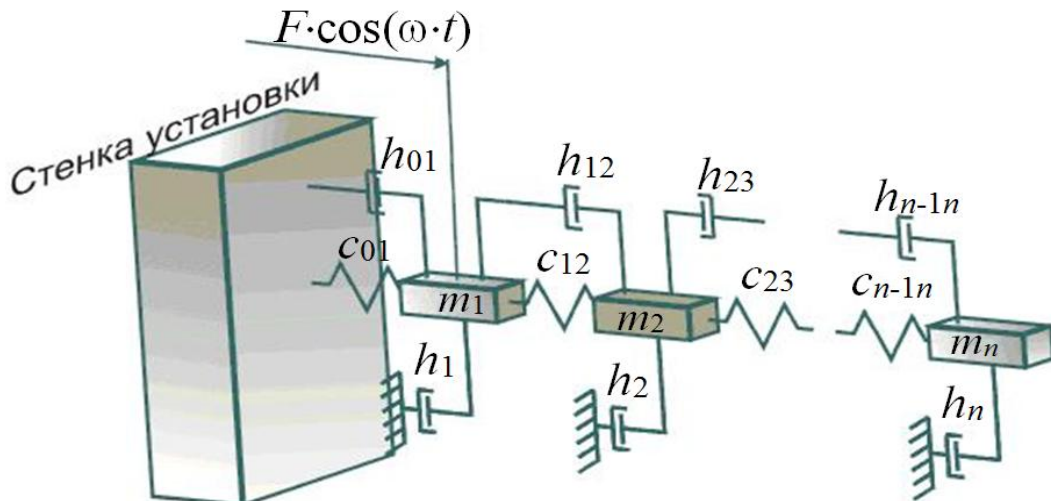


Рисунок 2 – Модель цепочки колеблющихся абразивных гранул

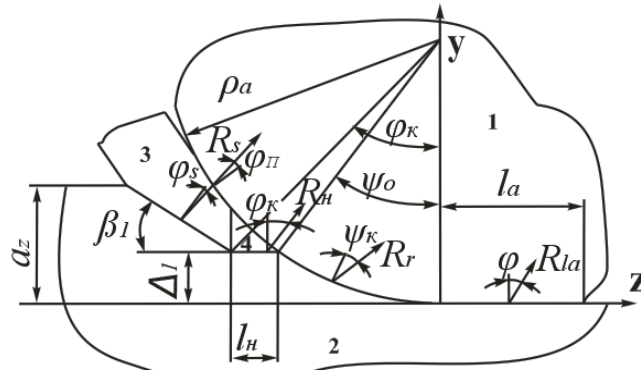


Рисунок 3 – Схема расчета сил резания для единичного зерна

На рисунке 3: (1) – абразивное зерно; (2) – обрабатываемая деталь; (3) – срезаемый материал; (4) – застойная зона.

при $a_z \leq \Delta_1$

$$P_{z.ед} = \tau_p B a \rho_a \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left[(1 - \cos \psi_0') + \mu \left(\frac{l_a}{2\rho_a} + \sin \psi_0' \right) \right]; \quad (5)$$

$$P_{y.ед} = \tau_p B a \rho_a \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left[\left(\frac{l_a}{2\rho_a} + \sin \psi_0' \right) + \mu (1 - \cos \psi_0') \right];$$

при $a_z > \Delta_1$

$$P_{z.ед} = \tau_p B a \rho_a \left\{ \frac{a_{z.эф}}{\rho_a} \cdot \frac{2}{B} + \frac{l_n}{\rho_a} + \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left[(1 - \cos \psi_0) + \mu \left(\frac{l_a}{2\rho_a} + \sin \psi_0 \right) \right] \right\}; \quad (6)$$

$$P_{y.ед} = \tau_p B a \rho_a \left\{ \frac{a_{z.эф}}{\rho_a} \left(\frac{1}{B^2} - 1 \right) + \frac{l_n}{\rho_a} \operatorname{ctg} \varphi_\kappa + \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left[\left(\frac{l_a}{2\rho_a} + \sin \psi_0 \right) + \mu (1 - \cos \psi_0) \right] \right\};$$

где a_z – глубина врезания абразивного зерна, м; Δ_1 – подминаемый слой, м; $P_{y.ед}$ – вертикальная составляющая силы, Н; $P_{z.ед}$ – горизонтальная составляющая силы, Н;

$\psi_0' = \arccos \left(1 - \frac{a_z}{\rho_a} \right)$ – угловая координата, определяющая верхнюю точку контакта; $a_{z.эф}$ –

срезаемый в виде стружки слой, м; τ_p – сопротивление пластическому сдвигу, Па; B_a –

ширина зоны реза абразивного зерна, м; l_n – длина задней поверхности застойной зоны, м;

φ_κ – угол трения, возникающий на задней поверхности застойной зоны, град.; ρ_a – радиус

режущей кромки, м; μ – коэффициент трения для контактирующих поверхностей; ψ_0 –

угловая координата, определяющая точку перехода внешнего трения во внутреннее, град.; l_a – длина площадки износа на режущем абразивном зерне, м; B – тангенс угла, определяющего наклон условной плоскости сдвига.

Зависимости для расчёта составляющих силы резания единичным абразивным зерном учитывают все особенности стружкообразования, характерные для вибрационного полирования. Основной особенностью является то, что абразивное зерно лишь часть

времени режет, а в остальное время происходит только подмятие материала. При геометрии среза, характерной для виброполирования, это означает, что происходит упругая или пластическая деформация обрабатываемой поверхности. Глубина внедрения абразивного зерна в металл, пропорционально зависит от величины P_y . Для начала резания глубина внедрения абразивного зерна должна стать больше подминаемого слоя.

Четвёртая глава посвящена экспериментальным исследованиям вибрационного полирования. Рассмотрены оборудование и рабочие тела, использованные для экспериментальных исследований. Для проведения экспериментов использовалась тороидальная виброполировальная установка R420 EC и абразивные гранулы RMB/D1 15/18 S и RSG 03/05 ZS фирмы RQSLER.

Установлено, что требуемая для начала резания величина тангенциальной составляющей силы достигается при минимальном уровне погружения лопатки в рабочую среду, а требуемая величина нормальной составляющей силы достигается только на определённой глубине погружения лопатки.

Произведены экспериментальные исследования величины съёма материала. Эксперименты проведёны на образцах в виде плоских пластин и на лопатках компрессора с габаритами от 50 мм до 150 мм. В результате экспериментов установлено, что величина и интенсивность съёма материала с плоскости значительно меньше, чем с кромки. По результатам экспериментов, проведенных на лопатках компрессора из материала ВТ6, построен график зависимости съёма материала от глубины погружения лопатки в абразивные гранулы, графики представлены на рисунке 4.

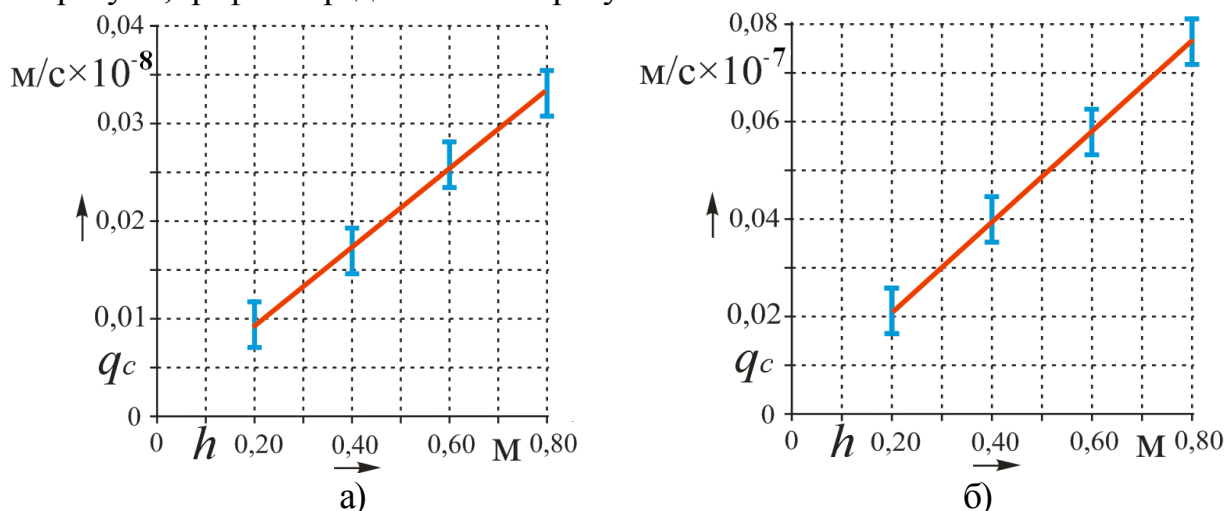


Рисунок 4 – Графики зависимости скорости съёма материала от глубины погружения лопатки в абразивные гранулы для пера (а) и кромки(б)

При критических уровнях загрузки абразивных гранул произведено исследование забоин, которые являются недопустимыми на кромках лопаток. Для опыта были взяты лопатки компрессора из сплава ВТ6. Входная кромка у лопаток была выполнена с толщиной 0,6 мм, выходная кромка была выполнена с толщиной 0,25 мм. Использовались абразивные гранулы RMB/D1-15/18, уровень загрузки был 0,4 м; амплитуда колебаний – 1,5 мм, частота колебаний – 50Гц. На рисунке 5 представлено состояние входной и выходной кромок после 300 секунд обработки.

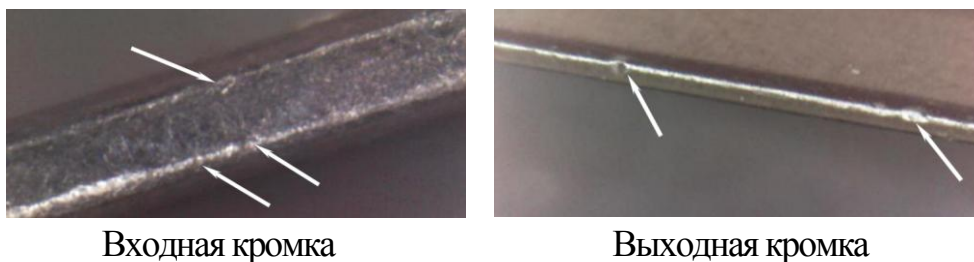


Рисунок 5 – Состояние входной и выходной кромок лопатки компрессора после вибрационного полирования

На рисунке 5 стрелками показаны забоины. На входной кромке величина забоин является несущественной и при визуальном контроле невооружённым глазом не воспринимается как дефект. На выходной кромке величина забоин сопоставима с толщиной кромки, что трактуется как дефект.

Данный опыт подтверждает зависимость наличия деформации кромки лопатки при вибрационном полировании от её толщины и других параметров обработки.

В пятой главе представлена методика назначения технологических условий вибрационного полирования. Предлагается производить подбор условий вибрационного полирования лопаток ГТД в следующей последовательности:

1) Выбор формы и габаритов абразивных гранул. Форма гранул выбирается исходя из геометрии наименее доступного участка лопатки, подлежащего обработке. При этом выбирается гранула максимально возможных габаритов.

2) Выбор зернистости абразивных гранул. Основным принципом при этом является возможность достижения требуемой шероховатости.

3) Определение минимально необходимой глубины погружения обрабатываемой лопатки производится исходя из величины вертикальной составляющей силы, необходимой для обеспечения процесса резания, которая рассчитывается по следующей формуле

$$P_{yN} = N_a \tau_p B_a \rho_a \left\{ \frac{a_{z,эф} \left(\frac{1}{B^2} - 1 \right) + \frac{l_n}{\rho_a} \operatorname{ctg} \varphi_\kappa +}{+ \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left[\left(\frac{l_a}{2\rho_a} + \sin \psi_0 \right) + \mu(1 - \cos \psi_0) \right]} \right\} \quad (7)$$

где P_{yN} – вертикальная составляющая силы необходимая для обеспечения процесса резания, Н; N_a – число абразивных зёрен одновременно участвующих в резании.

Минимально необходимая глубина погружения

$$h_{min} = P_{yN} / (g \cdot \rho_{az} \cdot S_{cp}), \quad (8)$$

где h_{min} – минимально необходимая глубина погружения обрабатываемой лопатки, м.

4) Определение максимально допустимой глубины погружения обрабатываемой лопатки определяется выражением вида

$$h_{max} = (c^2 \cdot \sigma_T - m_\partial \cdot g) / (S_{nl} \cdot g \cdot \rho_{az}), \quad (9)$$

где h_{max} – максимально допустимая глубина погружения обрабатываемой лопатки, м.; c – толщина кромки лопатки, м; m_∂ – масса детали, кг; σ_T – предел текучести, Па; S_{nl} – площадь лопатки в плане, м².

5) Выбор амплитуды и частоты колебаний виброполировальной установки. Выбранные значения должны обеспечивать интенсивное перемещение потока рабочих тел и лопаток по спиральной траектории.

б) Определение времени обработки и съёма материала. В течение четырёх часов проводится эксперимент по определению величины съёма материала с поверхности спинки и корыта лопатки за единицу времени обработки. С учётом экспериментальных данных, время, необходимое для достижения установившейся шероховатости, определяется следующим выражением

$$t_{yct} = (Rz_{ucx} - Rz_{ycm}) / q_c, \quad (10)$$

где t_{yct} – время обработки, необходимое для формирования установившейся шероховатости, с; Rz_{ucx} – величина исходной шероховатости, м; Rz_{ycm} – величина установившейся шероховатости, м; q_c – съём материала в единицу времени с поверхности лопатки со стороны спинки и со стороны корыта, м/с.

Съём материала в единицу времени с поверхности лопатки со стороны спинки или со стороны корыта составляет

$$q_c = Q_o / t_o, \quad (11)$$

где Q_o – съём материала за время эксперимента, м; t_o – продолжительность эксперимента, с.

Основываясь на зависимости (11), съём материала в единицу времени с поверхности кромки лопатки соответствует следующему выражению

$$q_k = q_c (d_1 + d_2) / (2c), \quad (12)$$

где q_k – съём материала в единицу времени с поверхности кромки лопатки, м/с; d_1 и d_2 – габариты рабочего тела в плане, м; c – толщина кромки лопатки, м.

Для расчёта времени, необходимого для получения на кромке радиуса требуемой величины, определена следующая зависимость

$$t_k = 0,41 \cdot r_k / q_k, \quad (13)$$

где t_k – время, требующееся для получения на кромке радиуса требуемой величины, с; r_k – радиус на кромки лопатки, который должен быть получен в результате обработки, м.

За время обработки принимается наибольшее из двух значений t_k и t_{ycm}

$$t_{обp} = \max(t_{ycm}, t_k), \quad (14)$$

где $t_{обp}$ – время необходимое для достижения требуемых параметров обработки, с

Использование представленной последовательности позволяет выбрать все необходимые условия виброполировальной обработки. Для определения оптимального сочетания данных параметров была сформулирована задача оптимизации

$$t_{обp} = f(F_n, Rz_{ucx}) \rightarrow \min \quad (15)$$

при ограничениях:

$$R_{ep} = 0,2M_{ep} \leq R_{дем}; \quad (16)$$

$$Ra_{ycm} \leq Ra_{КД}; \quad (17)$$

$$h_{min} \leq h \leq h_{max}, \quad (18)$$

где R_{zp} – наименьший радиус рабочей грани гранулы, м; M_{zp} – наименьший из габаритных размеров гранулы, м; $Ra_{КД}$ – шероховатость, в соответствии с требованиями конструкторской документации, м;

Алгоритм определения оптимальных параметров процесса вибрационного полирования, обобщающий все пункты методики, представлен на рисунке 6. Данная методика позволяет определить основные параметры процесса вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД, обеспечив при этом максимально возможную производительность.

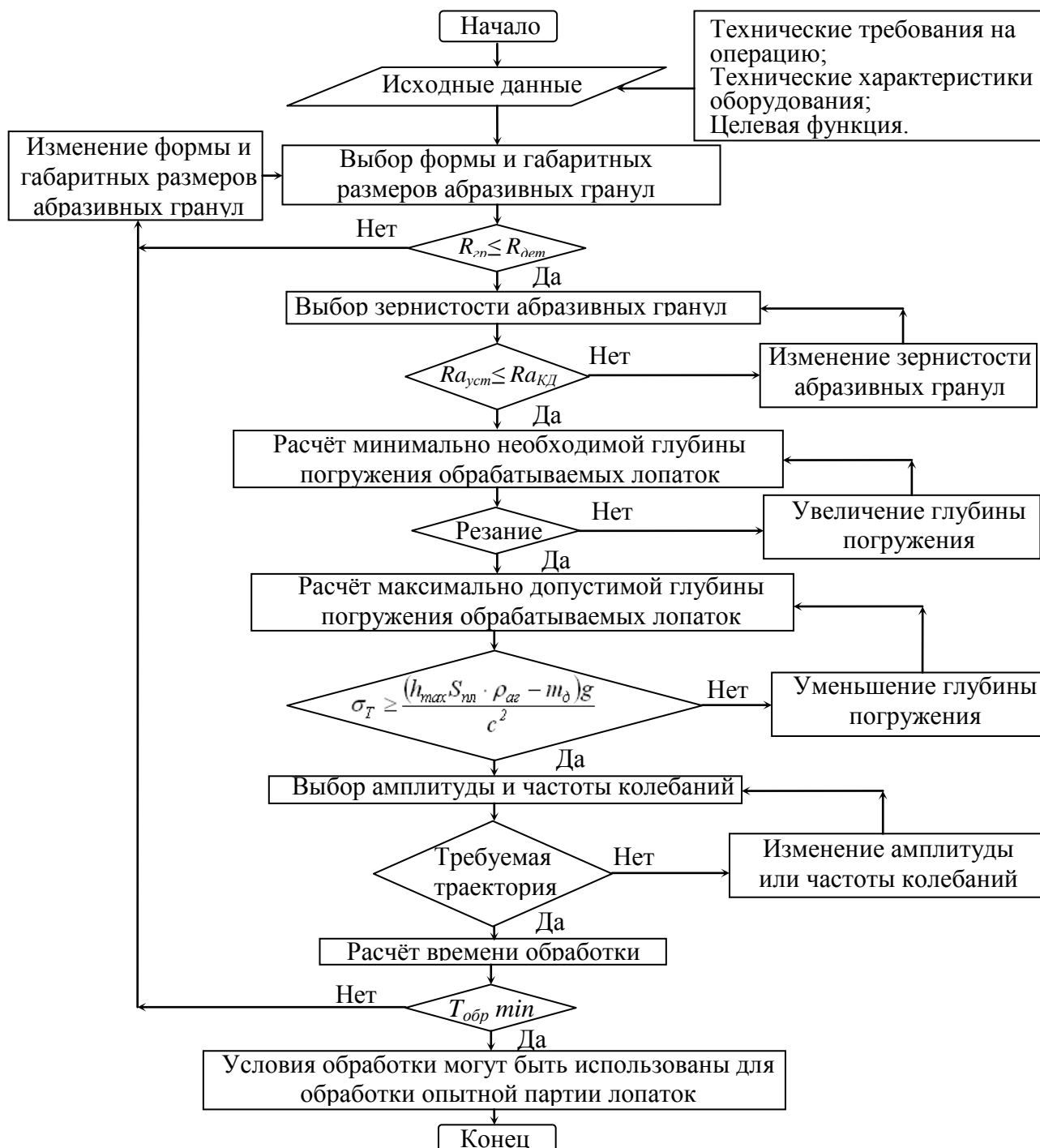


Рисунок 6 – Алгоритм определения оптимальных параметров процесса вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД

Заключение

1) На основании выполненного анализа литературы, выявлено, что процесс вибрационного полирования лопаток имеет свои особенности, связанные с геометрией деталей, подлежащих обработке, и механизмом воздействия абразивной гранулы и детали. Существующие методы назначения условий вибрационного полирования не позволяют назначать наиболее производительные условия обработки, так как не учитывают особенности геометрии таких специфических деталей, как лопатки компрессора ГТД.

2) Определены основные факторы, влияющие на производительность вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД в торовых виброполировальных установках, а именно: силы воздействия абразивной гранулы на лопатку; траектория движения абразивных гранул и лопаток; форма, размер, плотность и зернистость абразивных гранул; уровень загрузки абразивных гранул; амплитуда и частота колебаний установки.

3) Разработана модель движения абразивных гранул и лопаток ГТД, которая позволила определить траекторию, скорость и ускорение движения абразивных гранул в виброполировальных установках торового типа на произвольном расстоянии от стенки камеры.

4) Динамическая модель процесса обработки позволила определить тангенциальную и нормальную составляющие силы воздействия абразивной гранулы на лопатку компрессора. Установлено, что нормальная составляющая силы зависит от статического давления рабочей среды, тангенциальная составляющая силы зависит от динамических характеристик колебательного движения абразивных гранул, а также от массы абразивной гранулы и лопатки.

5) Разработана модель изменения величины съёма материала на пере и кромках лопатки, которая позволила определить время обработки, требующееся для достижения заданных параметров шероховатости, в зависимости от исходного состояния поверхности, габаритов и массы лопаток.

6) Выявлено, что скорость резания порядка 0,4-0,5 м/с не оказывает существенного влияния на величину нормальной составляющей силы резания, что позволило упростить модель для расчёта силы резания с учётом реальных условий вибрационного полирования.

7) Результатами проведённых экспериментов подтверждена справедливость теоретических зависимостей. Также, в результате экспериментов получены недостающие параметры для оптимизации процесса вибрационного полирования.

8) Предложены модели, позволяющие определить минимально необходимый и максимально допустимый уровень абразивных гранул при процессе вибрационного полирования. Использование данных моделей позволило опре-

делить соответствующие граничные условия при оптимизации процесса вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД.

9) На основе разработанных моделей, создан алгоритм определения оптимальных параметров процесса вибрационного полирования лопаток компрессора ГТД.

10) Разработан руководящий технологический материал «Виброполировальная обработка лопаток ГТД», который используются для разработки технологических процессов вибрационной полировальной обработки на «НПО «Сатурн».

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 **Макеев, Р. И.** Виброполировальная обработка в современном технологическом процессе [Текст] / Р. И. Макеев, А. В. Толкачёв // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №4 (16). – С.49-50.

2 **Волков, Д. И.** Снятие нагара с направляющих аппаратов газотурбинного двигателя с использованием виброабразивной обработки [Текст] / Д. И. Волков, А. В. Толкачёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – №1 (174). – С.32-35.

3 **Волков, Д. И.** Упрочняющий эффект виброполировальной обработки [Текст] / Д. И. Волков, А. В. Толкачёв // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №7 (127). – С.10-12.

4 **Волков, Д. И.** Методика определения параметров динамического взаимодействия абразивной гранулы и пера лопатки в круговых виброполировальных установках [Текст] / Д. И. Волков, А. В. Толкачёв // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьёва. – 2015. – №1 (32). – С.94-98.

Публикации в прочих изданиях и сборниках трудов:

5 **Толкачёв, А. В.** Математический аппарат, описывающий колебательные движения стенок рабочей зоны круговой виброполировальной установки [Текст] / А. В. Толкачёв // Материалы Всероссийской научно-технической конференции Теплофизика технологических процессов. – Рыбинск: РГАТА, 2005. – С.78-80.

6 **Коряжкин, А. А.** Повышение эффективности использования нового оборудования в современном технологическом процессе [Текст] / А. А. Коряжкин, А. В. Толкачёв // Материалы конференции Проблемы создания перспективных авиационных двигателей. – Москва: ЦИАМ, 2005. – С.261-262.

7 **Толкачёв, А. В.** Место виброполировальной обработке в технологическом процессе производства лопаток ГТД [Текст] / А. В. Толкачёв // Материалы конференции Проблемы создания перспективных авиационных двигателей. – Москва: ЦИАМ, 2005. – С.321-322.

8 **Толкачёв, А. В.** Разработка математической модели потока гранул для круговых виброполировальных установок [Текст] / А. В. Толкачёв // Мате-

риалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и молодёжь» – Барнаул: АГУ, 2005. – С.55-56.

9 **Толкачёв, А. В.** Зависимость шероховатости пера лопатки от его геометрии [Текст] / А. В. Толкачёв // Материалы международной школы-конференции Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений – Рыбинск: РГАТА, 2006. – С.191-192.

10 **Волков, Д. И.** Определение силового воздействия абразивных гранул на деталь при вибрационном полировании [Текст] / Д. И. Волков, А. В. Толкачёв // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Межвузовский научный сборник / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 179-187.