

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Ресурс и надежность современных авиационных двигателей определяются выносливостью дисков, валов, а также лопатками, являющихся наиболее массовыми деталями ГТД [1, 2]. Профильная часть пера лопатки, поверхности хвостовиков, бандажных и антивибрационных полок испытывают действие высоких контактных напряжений от центробежных и газовых сил, а также от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах. Кроме того, лопатки компрессора подвержены эрозионному разрушению. Воздействие на лопатки твердых и жидких частиц, находящихся в воздухе, приводит к механическому повреждению и способствует ухудшению аэродинамических и прочностных характеристик компрессора, а также к досрочному выходу изделия из строя. Эти повреждения проявляются в виде питтинга и срезания передней и задней кромок лопаток, а также увеличения шероховатости поверхности. Таким образом, исследования, посвященные методам повышения ресурса деталей ГТД, актуальны и заслуживают внимания.

1. Формулирование проблемы

Одним из направлений технологического обеспечения высокой эрозионной стойкости лопаток, упрочнения и повышения износостойкости контактных поверхностей является создание высокоэффективных материалов и покрытий со специальными свойствами. Формирование фазового состава, структуры и свойств функциональных покрытий для деталей авиационных газотурбинных двигателей представляет собой основное направление исследований в области инженерии поверхности.

Развитие технологий нанесения детонационно-газовых покрытий на детали во многом определяется решением проблем подготовки и активации обрабатываемых поверхностей, которые совмещаются с технологическим циклом нанесения покрытий. Выбор рационального способа предварительной отделочно-упрочняющей обработки позволит формировать покрытия высокого качества и стабильно получать высокие значения адгезионной прочности покрытия с подложкой. В связи с этим возникает необходимость проведения анализа существующих способов отделочно-упрочняющей обработки и оценки их эффективности.

2. Анализ способов обработки поверхности свободным абразивом

Необходимость обработки сложных пространственных форм деталей ГТД и ужесточение требований к качеству поверхности привели к развитию методов, характеризующихся отсутствием непосредственного механического контакта инструмента с заготовкой. В этих методах в качестве инструмента выступает направленный ударный поток различных материалов на заготовку, ультразвуковое поле либо концентрированные потоки энергии.

Процессы, использующие эффект удара абразивных частиц об обрабатываемую поверхность заготовки, осуществляются следующими способами:

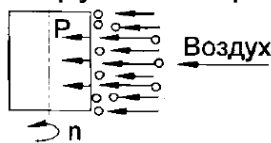
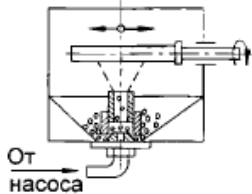
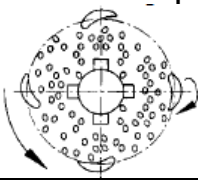
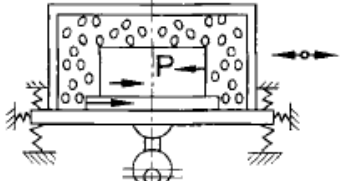
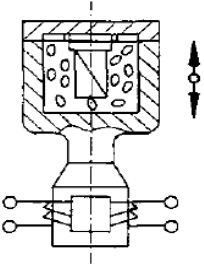
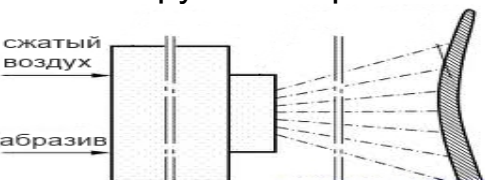
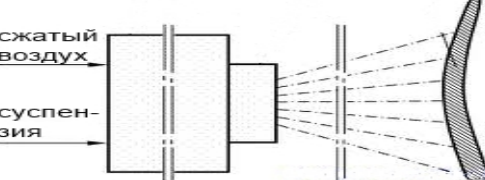
- удар собственно абразивной частицей (пескоструйная обработка);
- удар абразивно-жидкостной струей (струйная гидроабразивная обработка);
- воздействие на обрабатываемую поверхность взвешенных абразивных частиц, находящихся под повышенным статическим давлением (ультразвуковая, виброабразивная обработка).

При сравнении способов отделочно-упрочняющей обработки поверхности (табл. 1) оказалось, что сами процессы пескоструйной обработки (ПО) и гидроабразивной обработки (ГО) очень схожи, различие заключается только в том, что гидроабразивная обработка – непрерывного действия, а пескоструйные методы – периодического (возможно, аperiodического) действия. Частицы в воздушно-абразивном потоке перемещаются с разной плотностью и с разной равномерностью заполнения в объеме газа. В обоих случаях работа по удалению металла производится за счет кинетической энергии абразивной частицы.

Способ ПО [3] заключается в использовании эффекта удара частиц абразивного материала об обрабатываемую поверхность. Физическая картина процесса аналогична изнашиванию материалов, находящихся под действием потока частиц. Кроме съема металла с поверхности наблюдаются ее упрочнение и изменение микрогеометрии, а в тонких поверхностных слоях возникают остаточные напряжения сжатия.

Процесс ГО заключается в направлении струи суспензии, состоящей из воды и частиц абразивных материалов, на обрабатываемую поверхность заготовки. Эта струя подвергается воздействию потока сжатого воздуха, который увеличивает скорость истечения суспензии из сопла. В результате [4] создается матовая поверхность без направленных следов обработки, прижогов и микротрещин с равномерно распределенными углублениями. Этот процесс повышает износостойкость, усталостную прочность и стойкость деталей к коррозии.

Таблица 1 – Технологические схемы способов обработки свободным абразивом

Схема процесса	Суть метода
Дробеструйная обработка 	Удары дробы по деформируемому металлу.
Гидродробеструйная обработка 	В зависимости от источника кинетической энергии (гравитационная сила, струя газа, жидкость, газ с жидкостью, вращение ротора) обработка называется:
Дробеметная обработка 	дробеструйной; гидропневмодробеструйной; дробеметной
Вибрационная обработка 	Удары рабочими телами (шарики) в замкнутом объеме при вибрации
Ультразвуковая обработка 	Под воздействием ультразвуковых колебаний, возбуждаемых магнитострикционным преобразователем, металлические шарики, совершая колебательное движение между деталью и излучающей поверхностью, ударяют ее
Пескоструйная обработка 	Использование эффекта удара частиц абразивного материала об обрабатываемую поверхность
Гидроабразивная обработка 	Воздействие высокоскоростной ($v = 30 \dots 70$ м/с) струи абразивно-жидкостной смеси на поверхность обрабатываемой заготовки

Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются, их рабочие грани скругляются, что приводит с течением времени к снижению общей абразивной способности. Хотя разрушение абразивных частиц при ГО протекает в десятки раз медленнее, чем при пескоструйной обработке, что объясняется демпфирующим действием рабочей жидкости, срок службы суспензии также невелик и в предельных случаях выдерживает до 10 циклов или до 100 часов. Малое время и незначительные контактные усилия ударного взаимодействия зёрен с обрабатываемой поверхностью, а также унос тепла из зоны обработки потоком жидкости обуславливают низкотемпературный характер процесса. При этом полностью исключается возможность тепловых и механических деформаций детали [1].

Состояние поверхностного слоя после механических и физико-механических методов обработки характеризуется в основном параметрами шероховатости, остаточными напряжениями и наклепом (глубиной и степенью упрочнения). Основные параметры различных видов обработки свободным абразивом представлены в табл. 2.

Шероховатость поверхности после струйной обработки главным образом зависит от исходной шероховатости; скорости, угла атаки и размера абразивных частиц; времени обработки. Исследования [5, 6] показали, что зависимость шероховатости обработанной поверхности от размеров абразивных частиц является линейной. С увеличением давления воздуха на входе в активное сопло от 0,1 до 0,5 МПа значения R_a увеличиваются примерно на 30...60 % независимо от зернистости абразива. С увеличением расстояния от среза смесительного сопла до обрабатываемой поверхности в интервале 50...150 мм шероховатость уменьшается примерно на 40...45 %, что объясняется снижением скорости движения абразивных частиц. Зависимость шероховатости поверхности от угла атаки носит ступенчатый характер. С увеличением угла атаки от 15 до 45 град шероховатость поверхности увеличивается, а затем не изменяется.

Авторами работы [6] было установлено, что при любых сочетаниях варьируемых технологических параметров в поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия без подслоного максимума. Общая глубина распространения остаточных напряжений не превышает 50...60 мкм. С увеличением размеров абразивных частиц величина и глубина залегания напряжений увеличиваются. Максимум напряжений находится на поверхности, причем наблюдается резкое снижение этих напряжений в слое толщиной 5...15 мкм. Характер распространения остаточных напряжений при обработке различных материалов не изменяется.

Таблица 2 – Основные параметры способов обработки свободным абразивом

Методы обработки		Струйно-абразивная	Гидроабразивная	Ультразвуковая
Параметры обработки	Абразив	Песок, кварцевый песок, стальная, чугунная дробь	Порошки и микропорошки электрокорунда и карбида кремния, кварцевый песок	Карбид бора, карбид кремния, электрокорунд
	Размер абразива	до 3,5 мм	до 3,5 мм	3...200 мкм
	Концентрация абразива		50 %	$20...100 \cdot 10^3/\text{см}^3$
	Рабочая среда	Сжатый воздух	Вода и сжатый воздух	Воздух, вода и водные растворы
	Рабочее давление	0,6-1,2 МПа	0,1...300 МПа	0,2-0,5 МПа
	Амплитуда и частота колебаний (для УО)	-	-	10-60 мкм 16-30 кГц
	Время обработки			20 с...30 мин
	Скорость потока	до 400 м/с	50...100 м/с	-
	Угол падения потока	60...90°	25...40°	-
	Расстояние до поверхности	60...70 мм	5...100 мм	-
Технологические показатели обработки	Шероховатость	0,56...90 мкм	0,16...1,25 мкм	0,14...0,25 мкм
	Остаточные напряжения сжатия	до 100 мкм	5...60 мкм	
	Степень и глубина наклепа	2...10 % (30...40 мкм)	4...6% (5...7 мкм)	-
	Износостойкость абразивного инструмента	1 цикл	1–10 циклов	1–2 цикла
	Износостойкость оборудования	20...1000 ч	300...1000 ч	
	Производительность обработки	до 37 м ² /ч	до 15 м ² /ч	
	Экономичность	Высокая стоимость износостойкого сопла	Высокая стоимость оборудования, обеспечивающего давление струи до 300 МПа	
Литературный источник		[8,12-14]	[1-5,7,10,11]	[1,9,14]

Наличие значительных остаточных напряжений сжатия при малой степени деформационного упрочнения обуславливает повышенную стойкость поверхностного слоя деталей к образованию микротрещин в условиях повышенных температур и знакопеременных нагрузок.

Производительность пескоструйной очистки зависит от объёма воздуха и давления на сопле, а также от характеристик и свойств абразивного материала.

Стремление к интенсификации процесса очистки заставляет применять сопла большего диаметра и более высокие давления [7]. При этом увеличение диаметра сопла и расхода при сохранении давления приводит главным образом к увеличению производительности очистки, а увеличение давления и расхода – к повышению качества очистки. Необходимо поддерживать рациональную дозировку абразива. Однако такая интенсификация процесса ведет к повышению шероховатости и быстрому изнашиванию оборудования, поэтому материалы, из которых изготавливают сопла, должны иметь повышенную износостойкость. В настоящее время для изготовления сопел струйных аппаратов широко используют твердые сплавы и металлокерамику. Стойкость таких сопел составляет около 100 часов. В несколько раз большую стойкость имеют сопла из карбида вольфрама и карбида бора, однако их стоимость весьма высока.

Можно отметить следующие преимущества ГО перед остальными способами: удаление загрязнений без разрушения исходной поверхности с вымыванием их из микропор и микротрещин; очистка тонких листов (до 0,3 мм) без коробления, отсутствие шаржирования.

Ультразвуковая очистка [8, 9] поверхности основана на эффекте увеличения эрозионной и кавитационной активности звукового поля при добавлении в жидкость мелких абразивных зерен, размер которых соизмерим с радиусом действия ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационной полости (1...100 мкм). Кроме чисто кавитационного разрушения наиболее слабых участков деталей происходит дополнительная их обработка абразивными зернами.

Производительность ультразвуковой обработки в значительной степени зависит от физико-механических свойств материалов, частоты и амплитуды колебаний рабочего инструмента, зернистости абразива, циркуляции и смене абразива в рабочей зоне и нагрузки на инструмент.

Основной недостаток ультразвукового способа обработки – существенное уменьшение производительности процесса по мере увеличения глубины обработки, большой износ инструмента и малая производительность при обработке заготовок из твердых сплавов.

Виброабразивная обработка осуществляется вследствие низкочастотных колебаний рабочей камеры, что вызывает интенсивное взаимное перемещение обрабатываемых деталей и рабочей среды, движущихся с переменными по знаку ускорениями. Очистка поверхности

происходит путем проскальзывания частиц рабочей среды по поверхности деталей с определенным давлением, при микроударах наблюдается частичное вдавливание металла и местное упрочнение в местах контакта абразивных зерен с поверхностью деталей.

Основными недостатками данного метода являются: ограниченные энергетические возможности (вибромашины работают при виброускорениях не более 15g и виброскоростях 1,0...1,2 м/с); значительная продолжительность упрочнения; сложность в реализации эффективной виброобработки крупных деталей ГТД; низкая стойкость рабочих сред; возможность появления эллипсности обработанных поверхностей тонкостенных деталей, превышающей допуск на размеры.

Термоабразивная очистка [10] является аналогом струйно-абразивной (пескоструйной) обработки, отличие – в температуре и скорости газового потока. Это технология воздействия на очищаемую поверхность высокотемпературной сверхзвуковой струей, несущей частицы абразивного материала.

В настоящее время в литературе описаны следующие методы, использующие нагрев воздушного потока: сверхзвуковой высокотемпературный поток продуктов сгорания керосина (дизельного топлива) в воздухе, газодинамическая, газопламенная и парогазовая обработки.

Характерные значения скорости и температуры газовой фазы потока в выходном сечении разгонного канала составляют 1250 м/с и 1400 К соответственно. При этом скорость абразивных частиц составляет 100...300 м/с в зависимости от их фракции и происхождения. Скорость частиц в 2,5 – 3,5 раза превосходит скорость при традиционной струйно-абразивной обработке, а энергия соударения с поверхностью – соответственно в 6 – 10 раз. Именно высокая кинетическая энергия абразивных частиц определяет уникальную эффективность технологии термоабразивной очистки.

При термоабразивном способе очистки одновременно обеспечиваются обезжиривание, обеспыливание и активация поверхности, что исключает необходимость каких-либо дополнительных операций перед нанесением покрытий любого типа. Задается необходимая шероховатость поверхности, которая определяется главным образом типом и дисперсностью абразива и находится в диапазоне значений $R_z20...R_z80$. После очистки с использованием термоабразивной технологии поверхность становится равномерно подогретой до температуры 50...60°C и химически активной.

Температура напыляемых изделий оказывает большое влияние на эффективность последующего напыления. С ее увеличением возрастает температура в пятне напыления и контакта частиц, увеличивается и время активного взаимодействия напыляемых частиц. Неравномерность температуры приводит к возникновению

напряженного состояния и, как следствие, к отслаиванию покрытия.

Учитывая рассмотренные способы отделочно-упрочняющей обработки, можно выделить преимущества термоабразивного метода очистки поверхностей по сравнению с рассмотренными способами:

- производительность термоабразивного метода очистки выше в 2–3 раза;
- возможность выполнять очистку фасонных поверхностей;
- подогрев, обезжиривание и активирование поверхности при очистке;
- необходимая равномерная шероховатость поверхности;
- снижение расхода абразива в 3 - 4 раза.

Несмотря на несомненные преимущества данного способа подготовки поверхности металла, есть недостатки:

- невозможность очистки изделий из тонколистового металла (1...2 мм), изделий из листового алюминия и др. Мощная газоабразивная струя провоцирует в металле внутреннее напряжение (наклеп), которое приводит к деформации;
- высокий износ оборудования.

Выводы

1. Сформулирована проблема выбора рационального способа предварительной отделочно-упрочняющей обработки.
2. Проанализированы способы отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей ГТД свободным абразивом.
3. Проведенный анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о перспективности применения термоабразивного метода очистки.

Список использованных источников

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД [Текст] / В.А. Богуслаев., Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – Ч. 1. – 396 с.
2. Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К. И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
3. Тамаркин, В.О. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Тамаркин Михаил Аркадьевич. – Ростов-на-Дону, 1995. – 285 с.
4. Проволоцкий, А.Е. Обработка свободным зерном со шлифованием [Текст] / А.Е. Проволоцкий, Мохеб Мохаммад // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Донецьк: ДонНТУ,

2010. – Вип.39. – С. 161–166.

5. Шманев, В.А. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД [Текст] / В.А. Шманев, А.П.Шулепов, А.В. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с.

6. Струйная гидроабразивная обработка поверхностей [Электронный ресурс] / <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=135446>.

7. Козлов, Д.Ю. Бластинг. Гид по высокоэффективной абразивоструйной очистке [Текст] / Д.Ю. Козлов. – Екатеринбург, 2007. – 220 с.

8. Носков, А.А. Прогрессивные технологические процессы в производстве и эксплуатации газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / А.А. Носков, О.Н. Третьякова. – М.: МАИ, 2003. – 397 с.

9. Ультразвуковая технология [Текст] / под. ред. д-ра техн. наук проф. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 503 с.

10. Термоабразивная очистка [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http:// anticor-directory.ru/?p=224](http://anticor-directory.ru/?p=224) – 02.02.2009.

11. Павлюкова, Н.Л. Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами [Текст] / Н.Л. Павлюкова, В.А. Полетаев, М.Ю. Волкова. – Иваново, 2010. – 100 с.

12. Влияние струйно-абразивной и магнито-абразивной обработок на состояние рабочих поверхностей и режущих кромок сверл из быстрорежущей стали [Текст] / А.А. Беляев, Б. Карпушевский, Л.Г. Дюбнер, В.С. Майборода // Вестник двигателестроения. – №2. – 2007. – С. 90–94

13. Андилахай, А.А. Теоретический анализ параметров струйно-абразивной обработки деталей [Текст] / А.А. Андилахай // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 1.

14. Григорьев, С.Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст] / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М.А. Волосова. – М.: Тонкие наукоемкие технологии, 2011. – 268 с.

Поступила в редакцию 5.11.2013.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Сорокин,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*