

# **ВВЕДЕНИЕ**

**В** современном машиностроении при окончательном изготовлении деталей машин широко применяются абразивные инструменты различных характеристик и конструкций. Объемы абразивной обработки деталей машин составляют в общем объеме металлообработки от 25 до 60%. Особенно велика доля абразивной обработки в точном машиностроении при обработке подшипников, приборов, авиационных и автомобильных двигателей, прецизионных станков, деталей топливной аппаратуры, режущих инструментов.

На современном этапе развития промышленного производства четко проявляется тенденция интенсификации процессов отделочной обработки, определяющей выходные параметры деталей машин. При этом основным критерием оптимизации процесса шлифования является максимальная производительность с ограничением по качеству обработанной поверхности (уровень шероховатости, глубина распространения прижогов, наличие трещин и т. д.) и допустимым режимам эксплуатации оборудования и абразивного инструмента. Часто применение абразивных инструментов является единственным возможным методом обработки таких труднообрабатываемых материалов, как жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе. К основным технологическим операциям с применением абразивного инструмента относятся различные виды шлифования: круглое наружное и внутреннее, плоское периферийное и торцевое, профильное врезное и с помощью копиров, бесцентровое, глубинное, ленточное; хонингование, суперфиниширование, полирование, притирка, заточка и доводка режущих инструментов, вибрабрассивная обработка, турбоабразивная, гидроабразивная, пескоструйная

и др. Несмотря на все преимущества перед лазерной обработкой, шлифованию присущ ряд недостатков, главный из которых — высокая теплонапряженность. Поверхностные слои материала толщиной 5–10 мкм могут разогреваться в зоне обработки до 1400°C, при этом скорость нагрева и охлаждения может достигать десятков тыс. °С в секунду. Значительные величины температурных и силовых градиентов приводят к изменениям дислокационной структуры материала, искажению кристаллической решетки, формированию остаточного напряженно-деформированного состояния. Кроме того, высокая скорость нагрева материала в зоне обработки в сочетании с пластической деформацией вызывает изменение энергии активации диффузионных процессов, смещение критических точек фазовых переходов, что в еще большей степени усложняет картину распределения остаточных напряжений.

За прошедшее столетие в области абразивной обработки и шлифования выполнено огромное количество научных исследований, установлены основные закономерности процесса шлифования, разработаны новые высокоэффективные абразивные материалы и новые конструкции абразивного инструмента, создано необходимое оборудование. Дальнейшее развитие процесса шлифования и абразивного инструмента связано с решением задач обработки прецизионных деталей для новых высокоэффективных конкурентоспособных на внутреннем и внешнем рынках машин и механизмов, имеющих более высокие эксплуатационные параметры и изготавливаемых из новых более труднообрабатываемых материалов. Сегодня это наиболее актуально для такого особого класса сложнейших машин и механизмов, как газотурбинные двигатели (ГТД) для авиации, наземных энергетических и газоперекачивающих установок, например, для обработки огромной номенклатуры деталей и узлов нового авиационного двигателя ПС-90А (рис. 1) для самолетов гражданской авиации ИЛ96-300, ТУ204 и ИЛ76, а также модификации двигателя для газоперекачивающих и энергетических установок.

В процессе механической обработки деталей ГТД, помимо видоизменения формы и размеров заготовки, происходит

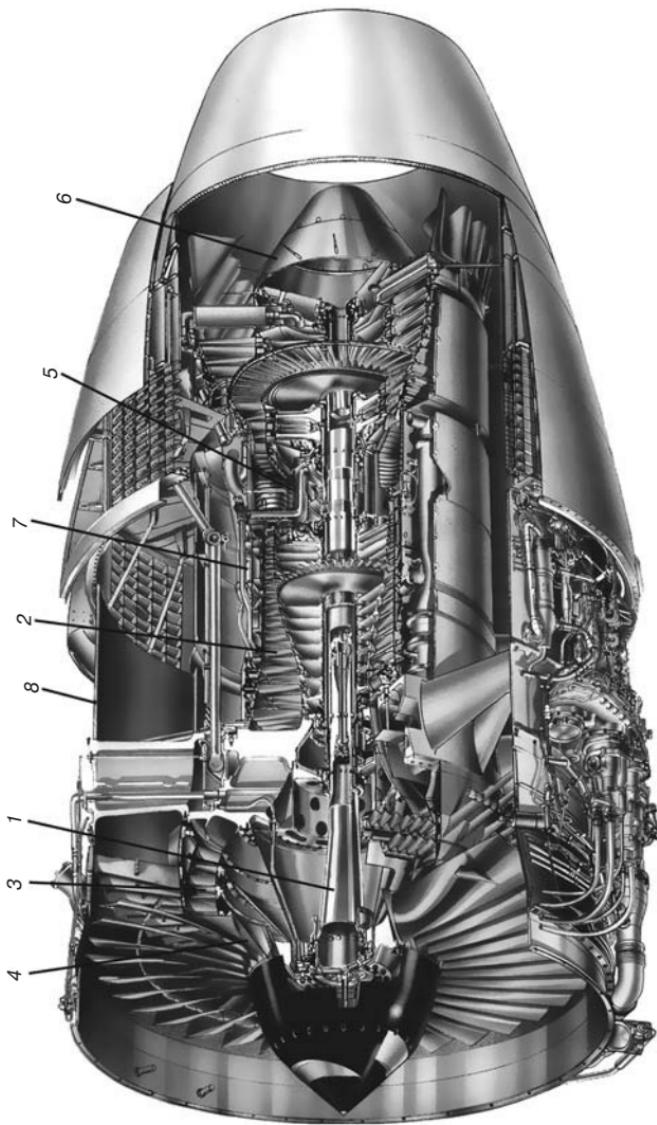


Рис. 1  
Двигатель ПС-90А:

1 — ротор низкого давления; 2 — ротор высокого давления; 3 — компрессор низкого давления; 4 — колесо вентилятора;  
5 — внутренний кожух камеры сгорания; 6 — задняя опора; 7 — корпус внутреннего контура; 8 — наружный корпус.

формирование особых свойств поверхностного слоя, его макро- и микроструктуры, что непосредственным образом влияет на усталостную прочность, долговечность деталей и, в конечном счете, на надежность и ресурс работы ГТД. Окончательное формирование основных параметров качества поверхностного слоя и усталостной прочности деталей ГТД происходит на чистовых финишных операциях механической обработки, к которым относятся процессы абразивной обработки.

При этом на чистовых окончательных операциях обработки деталей ГТД, к которым относятся все операции абразивной обработки, требуется стабильно обеспечить повышенную точность сложных профилей в пределах 0,005–0,01 мм, малую величину шероховатости в пределах  $R_a = 0,16\text{--}1,25$  мкм, незначительную величину наклена и остаточных напряжений в поверхностном слое, отсутствие в нем микротрешин и структурно-фазовых превращений, высокую усталостную прочность, повышенную надежность и ресурс работы.

В связи с этим кафедрой «Технология машиностроения» совместно с лабораторией шлифования ОАО «Пермский моторный завод» (ОАО «ПМЗ») проведены работы по обеспечению высокого и стабильного качества и усталостной прочности поверхностного слоя деталей ГТД путем научного и практического исследования, разработки и назначения наиболее рациональных методов и оптимальных режимов различных видов абразивной обработки, подбора характеристик, разработки и внедрения новых конструкций абразивного инструмента, подбора эффективной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и т. д.

В проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов под руководством автора активное участие принимали инженеры-исследователи лаборатории шлифования ОАО «ПМЗ» В. П. Кирchanов, Г. П. Юрова, Н. К. Кочепанова, А. Н. Попов, В. В. Семиколенных и аспиранты Е. Н. Бычина, А. В. Виноградов и другие сотрудники экспериментально-технологического цеха, которым автор выражает глубокую благодарность.

При разработке новых конкурентоспособных изделий требования к качеству и точности обработки постоянно

возрастают. В свою очередь это приводит к росту трудоемкости, повышению себестоимости обработки. Поэтому перед технологами, инженерами-исследователями процессов шлифования сегодня ставится задача значительного повышения производительности труда, сокращения материальных затрат на производство новых изделий. Одновременное решение задач повышения качества и производительности обработки при снижении ее себестоимости — это и есть путь интенсификации процессов абразивной обработки. В настоящем учебном пособии рассмотрены некоторые современные направления интенсификации процессов абразивной обработки, прошедших производственную апробацию и внедрение на заводе, в двух разделах — процессы абразивной обработки и абразивный инструмент.

Пособие предназначено для специалистов машиностроительных предприятий, связанных с технологической подготовкой производства, для аспирантов и магистров при подготовке диссертаций.

Книга поможет расширить знания студентов старших курсов о чистовых методах обработки материалов и относится к дисциплинам «Процессы формообразования», «Резание материалов», «Технология машиностроения» в цикле СД и федеральному компоненту рабочего учебного плана. Оно взаимосвязано с такими специальными дисциплинами, как «Проектирование металлорежущего инструмента», «Металлорежущие станки», «Проектирование приспособлений», «Автоматизация производственных процессов» и другими специальными дисциплинами учебного плана подготовки бакалавров, специалистов и магистров по направлению 151900 — «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства».

# НОВЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

При разработке и внедрении технологических процессов изготовления деталей для новых газотурбинных двигателей (ГТД), имеющих более высокие эксплуатационные параметры и изготавливаемых из новых более труднообрабатываемых материалов, требуется проведение дополнительных научно-исследовательских работ. Особен-но это важно при внедрении новых процессов шлифования. В этой главе представлены результаты проведенных совместных научно-исследовательских работ кафедры «Технология машиностроения» ПГТУ и лаборатории шлифования ОАО «Пермский моторный завод» (ОАО «ПМЗ») при внедрении новых процессов шлифования деталей двигателя ПС-90А.

## 1.1. ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Одним из новых прогрессивных процессов абразивной обработки является процесс глубинного шлифования. Глубинное шлифование обеспечивает большую глубину резания и малую продольную подачу детали. По скорости съема металла этот метод часто превосходит другие методы абразивной и лезвийной обработки, но сохраняет при этом все преимущества шлифования — высокую геометрическую точность, малую шероховатость и т. д. Величина

слоя металла, удаляемого при глубинном шлифовании за один проход, достигает 5–10 мм, а величина продольной подачи детали изменяется от 50 до 2000 мм/мин и более и зависит от типа обрабатываемого материала, глубины резания, характеристики абразивного инструмента, вида смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и способа ее подачи, требований к качеству обрабатываемых поверхностей.

На ОАО «ПМЗ» глубинное шлифование применяется главным образом для обработки плоских и сложно фасонных поверхностей хвостовиков и полок лопаток турбин ГТД. Схема обработки елочного профиля замка лопатки одновременно с двух сторон двумя кругами изображена на рисунке 2.

В качестве оборудования для глубинного шлифования сложного «елочного» профиля на хвостовиках лопаток турбин применяются специальные станки-автоматы с ЧПУ модели SS 13L фирмы ELB-Shcliff («ЭЛБ-Шлифф», Германия) (рис. 3).

К ним относятся системы высоконапорной подачи СОЖ, охлаждения и очистки СОЖ, автоматического поддержания

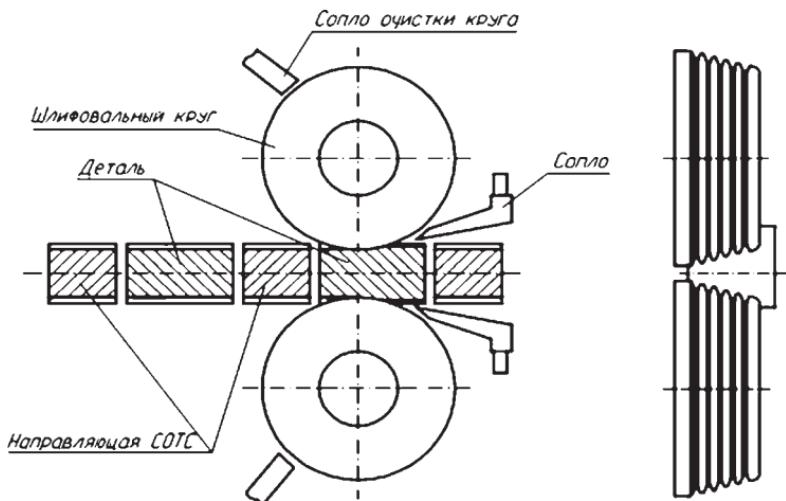


Рис. 2

Схема обработки «елочного» хвостовика лопатки на станке SS 13L

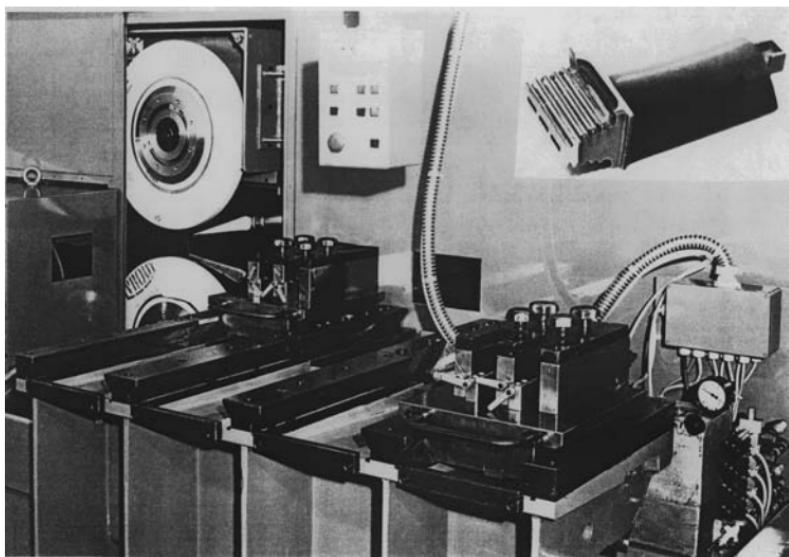


Рис. 3

Рабочая зона станка модели SS 13L для глубинного шлифования «елочных» замков лопаток турбин

постоянной скорости резания, динамической балансировки и автоматической правки кругов и т. д.

Кроме того, на предприятии применяются плоскошлифовальные станки-автоматы с ЧПУ для глубинного шлифования плоских и канавочных поверхностей модели ЛШ-220 (рис. 4) Липецкого станкозавода. Станки оснащены многокоординатными системами ЧПУ, а также рядом систем и устройств, стабилизирующих технологический процесс.

Станки фирмы ELB-Shcliff обладают большей надежностью работы, чем



Рис. 4

Специальный  
плоскошлифовальный  
полуавтомат с ЧПУ  
для глубинного шлифования  
модели ЛШ-220

ЛШ-220, особенно по системам ЧПУ. Конструкции этих станков (рис. 3) предусматривают одновременную обработку «елочного» профиля замков четырех лопаток с двух сторон двумя шлифовальными кругами. В результате производительность обработки замков при глубинном шлифовании в несколько раз выше, чем при фрезеровании или маятниковом шлифовании. Верхний и нижний шлифовальные

круги настраиваются с помощью встроенного командного компьютера и электронного пульта на нужный размер замка. Этот размер сохраняется с учетом постоянного износа кругов с помощью компьютерной системы ЧПУ. Направление шлифования предусмотрено попутное. Периодически, по мере износа кругов, выполняется попутная автоматическая правка кругов алмазным фасонным роликом, установленным на столе станка. По команде от ЧПУ к алмазному ролику подводятся последовательно верхний и нижний круги. Правка производится методом врезного шлифования с соотношением скоростей ролика  $V_p$  и круга  $V_k$ , равным 0,7–0,8. Большинство фирм, выпускающих станки, алмазные ролики и круги для глубинного шлифования рекомендуют применять попутную правку кругов. Общий вид правки шлифовального круга алмазным роликом приведен на рисунке 5. Отличительной особенностью абразивных инструментов, работающих врезным методом, является переменная глубина резания, функционально зависящая от соотношения оборотов шлифующего круга (правящего ролика) и обрабатываемой детали (абразивного круга).

В целом же процесс правки алмазным роликом характеризуется такими важнейшими параметрами, как соотношение скоростей  $q_d$  и поперечная подача  $a_d$  на один оборот круга:

$$q_d = v_r/v_s,$$

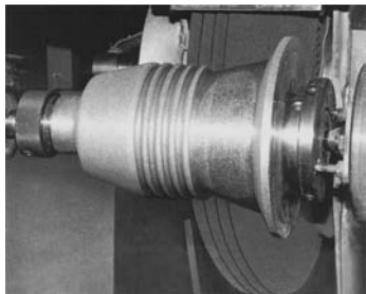


Рис. 5  
Общий вид правки шлифовального круга алмазным роликом

где  $v_r$  — окружная скорость ролика;  $v_s$  — окружная скорость круга.

При выборе соотношения скоростей следует различать два случая: попутное вращение (знак «+») и встречное вращение (знак «-») алмазного ролика и шлифовального круга (рис. 6).

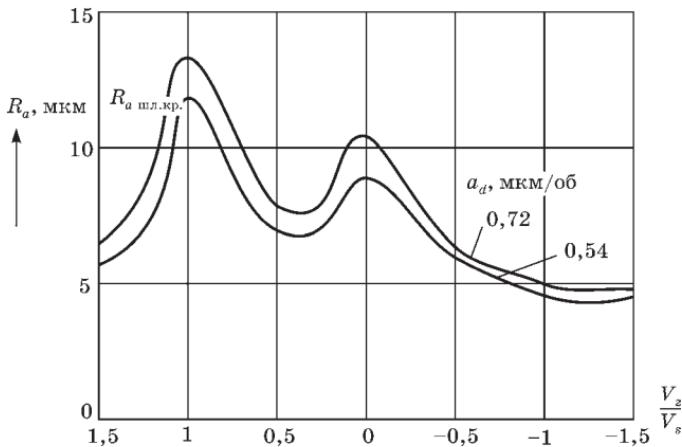


Рис. 6  
Зависимость шероховатости поверхности круга от выбора соотношения скоростей круга и ролика

В то время как при попутном вращении вследствие более крутой эффективной траектории движения алмазного ролика достигается более высокая эффективная шероховатость рабочей поверхности шлифовального круга, при встречном вращении круга и ролика силы, возникающие при правке, и износ алмазного ролика ниже.

Как показано на рисунке 6, в первом случае ( $q_d > 0$ ) с уменьшением  $q_d$  от 1 до 0 шероховатость проправленного круга снижается. При  $q_d < 0$  изменение  $q_d$  от 0 до -1 также приводит к снижению  $R_a$  шлиф. кр. При правке попутным методом кривая  $R_a$  шлиф. кр. =  $f(q_d)$  сильно искривлена; при правке встречным методом эта кривая более пологая. В случае  $q_d > 0$   $R_a$  шлиф. кр. выше, чем в случае  $q_d < 0$ .

Шероховатость поверхности круга максимальна при  $q_d = 1$  и  $q_d = 0$ . В первом случае ввиду отсутствия

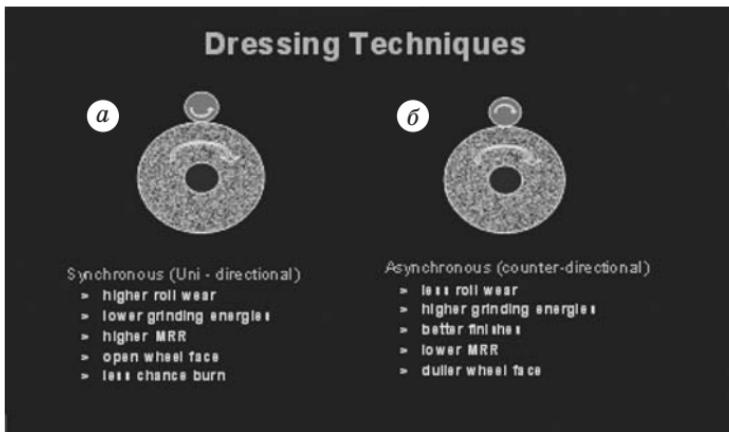


Рис. 7

Основные факторы применения различных методов правки:

*a* — попутная; *b* — встречная правка.

относительной скорости между шлифовальным кругом и роликом резания не происходит. Вместо этого имеет место накатка поверхности круга, при которой происходит разрушение абразивных зерен и связки круга. При этом, хотя поверхность круга сильно загрублется, на зернах образуются острые режущие кромки, что обуславливает высокую режущую способность шлифовального круга. Во втором случае ролик не вращается и только алмазы на ролике, находящиеся в контакте с кругом, прорезают на его поверхности круговые канавки.

Такие экстремальные случаи не применяются на практике (рис. 7). Во всех других случаях траектории зерен проходят по всей поверхности шлифовального круга и положение этих зерен в ролике в основном определяет шероховатость поверхности круга, равно как и шероховатость шлифованной поверхности детали.

Отношение скоростей  $v_r/v_s$ , как утверждают авторы работ, оказывает влияние на количество энергии, затрачиваемой на процесс правки и получение необходимой топографии поверхности шлифовального круга. По их мнению, оптимальный диапазон, из которого необходимо выбирать отношение  $v_r/v_s$ , таков:  $0,55 < v_r/v_s < 0,85$ .

К преимуществам попутной правки относятся низкая вероятность прижогов, меньшая энергоемкость, более острые кромки режущих зерен. К недостаткам попутной правки относятся более высокий износ круга и более высокая шероховатость.

Прямым следствием обработки с большой глубиной резания является увеличенная длина дуги контакта шлифовального круга с деталью, что приводит к возрастанию мощности и сил резания, общей тепловой напряженности в зоне резания. Поэтому большое внимание уделяется интенсивному отводу тепла из зоны резания с помощью высоконапорной подачи СОЖ. В качестве СОЖ используется 3%-ный раствор эмульсона Пермол-6 производства завода смазок и СОЖ (г. Пермь).

Для глубинного шлифования применяются специальные высокопористые шлифовальные круги диаметром 450–500 мм отечественных и зарубежных фирм (рис. 8).

Крупные поры в кругах образуются в процессе изготовления при выгорании или выплавлении специальных порообразователей (перлит, фруктовая косточка, нафталин и др.). В порах круга собираются стружка и шлам, которые затем вымываются наружу под действием высоконапорной

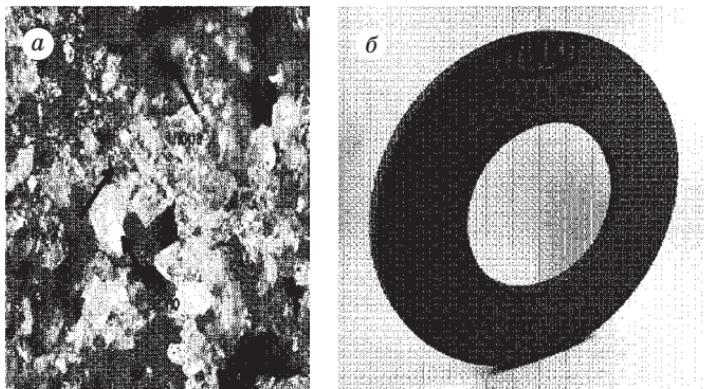


Рис. 8

Структура и внешний вид высокопористого круга фирмы Tyrolit  
(**«Тиролит»**, Австрия):

*a* — взаимодействие «Зерно — связка»; *б* — круги с внешним диаметром до 710 мм и шириной до 250 мм.

струи СОЖ и центробежной силы при вращении кругов.

Правка кругов производится с помощью алмазных роликов, которые изготавливаются с высокой точностью корпуса, посадочных отверстий, наружного профиля (рис. 9). Так, биение торцов корпуса и наружного диаметра профиля допускается в пределах 0,002–0,005 мм. Стойкость правящих роликов зависит от метода изготовления, применяемых искусственных или естественных алмазов, режимов правки и др. и составляет 1500–2500 правок. Ролики изготавливаются на специальном участке инструментального цеха. В последнее время за счет совершенствования технологии изготовления стойкость опытных алмазных роликов повысилась до 18 000 правок.

Для контроля твердости высокопористых кругов совместно с ВНИИАШ (г. Санкт-Петербург) разработан прибор «Звук 202-02», на котором измеряется частота собственных колебаний круга, возбуждаемых ударом (молотком) (рис. 10). Возникающие в круге свободные колебания воспринимаются датчиком (микрофоном), усиливаются и поступают на систему фильтров. Из спектра частот выделяется сигнал с частотой, соответствующей выбранному виду шлифовального круга. Полученное значение измеряется частотомером и выводится на цифровое табло. Разработана таблица звуковых индексов (ЗИ), где определенному диапазону частот соответствует свой звуковой индекс. Данный прибор позволяет точнее и быстрее, чем пескоструйный



Рис. 9  
Общий вид правящего алмазного ролика для правки кругов на станках модели SS 13L



Рис. 10  
Прибор «Звук 202-02» для контроля твердости высокопористых кругов акустическим методом

прибор, определять твердость шлифовальных кругов. В результате имеется возможность подбирать круги с заданными физико-механическими свойствами для конкретных операций глубинного шлифования, а также исключить на ответственных операциях кругов с повышенной или пониженной твердостью.

В ОАО «ПМЗ» проведен широкий комплекс научно-исследовательских работ по внедрению вместо фрезерования процесса глубинного шлифования «елочных» замков лопаток турбин различных авиационных двигателей и наземных установок из жаропрочных литейных сплавов ЖС26, ЖС32, ЧС70, ЖС6К, ЖС6У-ВИ и деформируемых сплавов ЭИ437БУ-ВД и ЭИ787-ВД.

При оптимизации процесса глубинного шлифования, в отличие от работ ученых РГАТА, НПО «Сатурн» и НИИД, в качестве основного критерия принято обеспечение установленного предела усталостной прочности обработанных деталей.

Разработаны специальные инструкции для каждого изделия по периодической проверке сопротивления усталости как профильной части пера, так и замковой части рабочих лопаток турбин. На других предприятиях моторостроения требование проведения усталостных испытаний замковой части лопаток отсутствует из-за малого ресурса выпускаемых изделий. Периодические усталостные испытания позволяют судить о стабильности технологии изготовления лопаток турбин. Испытания проводятся согласно ОСТ 1.00870-77.

Доминирующими критериями при оценке прочности лопаток турбин являются уровень вибранапряжений в лопатках, замеренный на изделии, и фактический предел выносливости «елочного» замка лопатки. Предел выносливости  $\sigma_{-1}$  по «елочному» замку рабочих лопаток определяется обычно на первых ступенях турбин. Так, для лопаток двигателя Д30Ф6 из сплава ЖС6У-ВИ допустимый предел выносливости  $\sigma_{-1} = 140$  МПа, для лопаток двигателя ПС-90А из сплава ЖС26  $\sigma_{-1} = 110$  МПа. Величины допустимых значений  $\sigma_{-1}$  выбираются из расчета обеспечения запаса прочности по замку в пределах нормы прочности  $K_n$ , установленной Центральным институтом авиационного моторостроения (ЦИАМ) по результатам замера фактических

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)