УДК621.923.01

Обработка деталей с различным наружным профилем уплотненным шлифовальным материалом

В.А. СКРЯБИН[1*], д-р техн. наук, проф., А.Г. СХИРТЛАДЗЕ[2], д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф., Н.В. СОРОКИНА[1], канд. техн. наук, доц.

[1]ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация.
[2]ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», Москва, 127055, Российская Федерация.

[*]E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2024-0-12-

Статья поступила в редакцию 26.06.2023
Принята после доработки 21.08.2023
Принята к публикации 07.02.2024

Приведены особенности обработки поверхностей деталей с различным наружным контуром незакрепленным шлифовальным материалом. Представлено схемное решение метода и результаты его практической реализации. Исследованы динамические характеристики процесса. Приведены математические модели по определению давления уплотненной абразивной среды на поверхность обрабатываемой детали и скорости резания.

Ключевые слова: *поверхности с различным профилем, незакрепленный шлифовальный материал, методы обработки, шероховатость поверхностей деталей, давление уплотненной абразивной среды, скорость резания, экспериментальные и теоретические исследования, точностные параметры обработанных поверхностей.*

Введение

Высокая эффективность финишной обработки деталей типа тел вращения со сложным профилем может быть достигнута обработкой деталей незакрепленным шлифовальным материалом, уплотненным в камере статическим давлением сжатого воздуха через эластичную оболочку [1–4, 7]. Исследования качества обработки деталей типа дисков и кулачков осуществлялись на экспериментальной установке. Обрабатываемые детали базировались и закреплялись на специальной оправке с эксцентриситетом, установленной в шпинделе установки, спроектированной на базе

вертикального или радиально-сверлильного станка. При этом, с целью повышения качественных показа-телей обрабатываемой поверхности детали, камера перемещалась возвратно-поступательно с определенной скоростью и амплитудой.

Материалы и методы

Исследования производительности и качества обработки деталей типа дисков и кулачков осуществлялись на экспериментальной установке, схема которой и общий вид показаны на рис. 1 и 2 соответственно [3, 6].

Экспериментальными и теоретическими исследованиями метода обработки установлено, что большое влияние на производительность и качество финишной операции оказывает кинематика относительного движения эксцентричной оправки с деталью относительно неподвижной абразивной обрабатывающей среды, а также площадь их контактирования.

Вся установка жестко закреплена на столе вертикально-сверлильного станка или радиально-сверлильного станка и соединена с его шпинделем. Работа такого устройства осуществляется следующим образом. Обрабатываемую деталь *2* закрепляют на оправке *3*, которая устанавливается на вал ротора *10*. Перемещение оси оправки относительно оси ротора обеспечивается шарнирным поводком *9* с шариками *8*. Ротор помещают в камеру *7* с эластичными стенками *6*, заполненную абразивной средой *5*, и сообщают ему вращение со скоростью $\omega = V/(E+R)$. Максимальная величина угловой скорости равна 10 рад/с. В кольцевую полость камеры *4* подают воздух под давлением, в результате чего рабочая среда *5* уплотняется, причем уплотненная абразивная среда точно копирует форму профиля погруженной в нее детали. Камере *7* посредством зубчатой передачи *1* сообщается вращательное движение от приводного вала *11*. При этом она совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси вращения, перемещаясь относительно неподвижных кулачков *13*, входящих в

зацепление с кулачковой прорезью *14* камеры. Для уменьшения нагрузки на кулачки используется демпфирующая пружина *12*.

Время выравнивания давления (заполнения возникшего зазора между поверхностью детали и абразивной средой) зависит от инерционности среды. Для эффективной обработки всего контура, имеющего отклонение от круглости, требуется обеспечить равномерную интенсивность воздействия на все его точки. Для этого необходимо определить эксцентриситет E оси оправки относительно оси ротора. Эксцентриситет определяется следующим образом (см. рис. 1):

$$E = 0{,}5D - r, \quad (1)$$

где D – диаметр описанной окружности детали, м·10^{-3}; r – радиус смещения, м·10^{-3}.

Необходимо отметить, что угловую скорость выбирают в зависимости от твердости материала детали. Однако при высокой угловой скорости вращения детали этого недостаточно, чтобы гарантировать равномерность обработки всего контура. В этом случае на качество обработки начинает оказывать влияние даже незначительное отклонение контура от круглости, а инерционность абразивной среды не позволяет уменьшить время выравнивания давления до определенной величины.

Для обеспечения непрерывности контакта поверхности детали с абразивной средой предлагается крепить деталь на роторе посредством эксцентричной оправки, самоустанавливающейся под воздействием сил резания. Конструкция такой оправки приведена на рис. 2.

В ее корпусе *1* монтируется хвостовик *2* с тарельчатыми пружинами *3*. В пазах поводка *4* оправки установлены два ряда шариков *5* перпендикулярно друг другу, которые входят в пазы оправки, на которой крепится деталь. Такая конструкция обеспечивает перемещение оси оправки относительно оси ротора и контакт поверхности детали с абразивной средой *6*. Необходимо отметить, что процесс обработки протекает стабильно при

условии непрерывного контактирования абразивной среды и участка контура с отклонением от круглости в течение времени, которое необходимо для оборота вокруг собственной оси ротора с деталями (или большего времени). Эксперименты обработки незакрепленным абразивом деталей с различным профилем (деталей типа кулачков) свидетельствуют о том, что ударный характер взаимодействия поверхности кулачка и уплотненной абразивной среды не проявляется при ограничении угловой скорости ротора в пределах 10 рад/с, скорости возвратно-поступательного движения относительно оси вращения детали $V_п$ = (0,1–0,5)·10^{-3} м/с и применении самоустанавливающейся эксцентриковой оправки [5, 7, 8]. Изменение величины подводимого давления сжатого воздуха осуществлялось редукционным пневмоклапаном 122-12-У4 ГОСТ 18468- 79. Регистрация давления осуществляется манометром МВТПСд-100-ОМ-2 ГОСТ 12733-79 с ценой деления 0,005 МПа. Описанная экспериментальная установка позволяет обрабатывать широкую номенклатуру деталей, начиная от дисков и кулачков и заканчивая плоскими деталями, при соответствующей модернизации установки. Образцы деталей для исследования производительности и шероховатости обработки приведены на рис. 3 и 4. Образцы изготавливались из сталей 12ХНМА и 18Х2Н4МА с твердостью 57–63 *HRC* и исходной шероховатостью поверхности R_a = 0,6–0,8 мкм. В качестве абразивных сред использовались порошки электрокорунда марки 14А различных зернистостей с объемной влажностью 20%. Жидкой составляющей среды служил 2% водный раствор тринатрийфосфата. Производительность обработки оценивалась по величине массового съема металла с единицы площади обрабатываемой поверхности и измерялась путем сравнения массы детали до и после обработки. Взвешивание образцов производилось на микроаналитических весах АДВ-200М с точностью до 0,0001 г.

Исследования шероховатости поверхности детали выполнялись на

экспериментальной установке, общий вид которой показан на рис. 5.

Измерение высоты неровностей поверхности производилось по параметру R_a на профилометре модели 283 завода «Калибр».

Исследование производительности и шероховатости обработки осуществлялось с использованием методики многофакторного планирования эксперимента. На рис. 5 приведена схема для определения эксцентриситета E.

Предлагаемое устройство для полирования деталей камерным способом состоит из камеры, блока подготовки воздуха, шпинделя и эксцентричной оправки (рис. 6). Для обеспечения работы устройства требуется источник сжатого воздуха с давлением не ниже 0,2 МПа. Камера устанавливается на столе вертикально-сверлильного станка и крепится болтами. Камера через пневмораспределитель соединена с блоком подготовки воздуха. Блок подготовки воздуха включает в себя: вентиль муфтовый РУ16ДУ ГОСТ 9086-74, клапан 122-12 ГОСТ 18468-79, манометр МТ-1Ф60-10-74 ГОСТ 8628-77, фильтр-влагоотделитель 22-10-80 ГОСТ 17437-81, обратный клапан 10-2-УХЛ4 ГОСТ 21324-83. Блок подготовки воздуха монтируется на корпусе станка в месте, удобном для обслуживания, и соединяется с источником сжатого воздуха.

Основные технические параметры установки:

1. Класс точности станка — Н
2. Объем рабочей камеры, л — 2,5; 4,5; 7,0
3. Объем контейнера для сбора наполнителя, л — 2,5; 4,5; 7,0
4. Наибольшая масса обрабатываемых деталей, кг — 5,0
5. Суммарная масса обрабатываемых деталей, не более, кг — 5,0
6. Длина обрабатываемой детали,

наибольшая, мм	400
7. Диаметр цилиндрических деталей, не более, мм	300
8. Частота вращения ротора, мин$^{-1}$	68, 100, 140, 195, 275, 400, 530, 750, 1100
9. Давление воздуха в сети, МПа	0,4–0,6
10. Количество одновременно обрабатываемых деталей, шт.	1–80
11. Потребляемая мощность, кВт	1,5–3
12. Род тока	трехфазный, переменный
13. Напряжение, В	380
14. Масса установки, кг	25
15. Машинное время обработки, мин	1–5
16. Габаритные размеры, мм	415×300×670

При эксплуатации установок подобного типа перед началом работы необходимо проверить надежность крепления камеры на столе станка. Затем приготовить рабочую смесь и засыпать ее внутрь камеры, а также очистить оправку от загрязнений, установить и закрепить на ней деталь. В дальнейшем нужно опустить шпиндель станка вниз до упора, после чего зажать верхнюю крышку специальными поворотными рычагами. После этого следует установить с помощью клапана 122-12 ГОСТ 18468-79 и манометра МТ-1 (Ф-60-10-4) ГОСТ 8628-77 требуемую величину давления воздуха, подводимого к эластичной стенке камеры, и частоту вращения шпинделя. Установка давления воздуха и частоты вращения шпинделя производится перед началом каждой рабочей смены. После этого необходимо включить привод станка и произвести обработку деталей.

По окончании цикла обработки нужно отключить подачу воздуха, выключить вращение шпинделя станка, раскрыть крышку и освободить

деталь. Следует отметить, что отсчет времени обработки выполняется специальным реле времени.

Замена рабочей среды производится после сильного ее истирания или загрязнения. Для этого необходимо выдвинуть отсекатель, освободить окно в нижней части рабочей емкости и протолкнуть рабочую среду в выдвижной ящик, находящийся под камерой. После этого отсекатель задвигается и производится новая загрузка рабочей среды в камеру установки.

Результаты исследования

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что на качество формируемой поверхности детали при камерной обработке оказывают влияние в основном следующие параметры: давление воздуха, прикладываемое к эластичной оболочке, зернистость абразивного материала, твердость детали, соотношение диаметральных размеров детали и эластичной оболочки при обработке.

Уплотненный абразивный слой обладает определенной инерционностью. При взаимодействии с поверхностью детали типа кулачок, в первую очередь обрабатываются участки поверхности максимального диаметра, а участки поверхности минимального диаметра обрабатываются настолько, насколько позволяет инерционность уплотненной обрабатывающей среды. Исходя из того, что основное абразивное воздействие на деталь оказывается уплотненной обрабатывающей средой, для обеспечения всесторонней обработки поверхности необходимо при вращении детали осуществлять разрушение уплотненного абразивного слоя относительно контура детали.

Одной из основных динамических характеристик процесса обработки деталей в уплотненной обрабатывающей среде является давление среды на поверхности детали посредством эластичной оболочки. Оно определяет характер протекания абразивного воздействия. Поэтому исследование

динамических характеристик метода обработки необходимо начинать с определения давления абразивной среды на деталь.

Необходимо отметить, что для решения поставленной задачи в первом приближении могут быть применены уравнения теории упругости [9]. Это связано в первую очередь со спецификой свойств зернистых сред, которые при всестороннем сжатии ведут себя как упругодеформируемые твердые тела. При расчетах величин давлений уплотненной абразивной среды следует исходить из условий, что абразивная среда находится в состоянии предельного равновесия [10]. При исследовании напряжений в деталях типа колец, дисков, криволинейных стержней узкого прямоугольного поперечного сечения удобно использовать полярные координаты, которые определяются углом θ, радиус-вектором r и некоторой осью OX, фиксированной в рассматриваемой плоскости (рис. 7) [12–14].

Рассмотрим равновесие малого элемента 1234, вырезанного из пластинки радиальным сечением 04, 02, нормальными к пластинке, и двумя цилиндрическими поверхностями 3 и 1, также нормальными к плоскости пластинки.

Нормальную компоненту напряжений в радиальном направлении обозначим через σ_r, нормальную компоненту в окружном направлении – через σ_θ, а касательную компоненту напряжений – через $\tau_{r\theta}$.

При этом считаем, что каждый символ представляет напряжение в точке r, θ, которая находится в центре элемента точки P. С учетом изменения напряжения его значения посередине сторон 1, 2, 3, 4 не будут в точности равны σ_r, σ_θ, $\tau_{r\theta}$ и их можно обозначить через $(\sigma_r)_1$ и т.д., как показано на рис. 8. Радиусы сторон 3, 1 обозначим через ${}_3r$ и ${}_1r$.

Усилие, действующее в радиальном направлении по стороне 1, равно $(\sigma_r)_1 \cdot r_1 \cdot d\theta$, что можно записать также в виде $(\sigma_r \cdot r)_1 \cdot d\theta$. Усилие же, действующее в радиальном направлении по стороне 3, равно $(\sigma_r \cdot r)_3 \cdot d\theta$. Компонента нормального усилия, действующего по стороне 2 вдоль радиуса,

проходящего через точку P, равна $(\sigma_\theta)_2 \cdot (r_1 - r_2) \cdot \sin(d\theta/2)$ или $(\sigma_\theta)_2 \cdot dr \cdot (d\theta/2)$. Соответствующая компонента действующего по стороне 4 усилия равна $(\sigma_\theta)_4 \cdot dr \cdot (d\theta/2)$. Касательные усилия на сторонах 2 и 4 определяются следующим образом: $[(\tau_{r\theta})_2 - (\tau_{r\theta})_4] \cdot dr$ [14].

Предположим, кроме того, что объемная сила имеет в радиальном направлении компоненту R. Проектируя все силы на радиальное направление, получаем уравнение равновесия в виде:

$$(\sigma_r \cdot r)_1 \cdot d\theta - (\sigma_r \cdot r)_3 \cdot d\theta - (\sigma_\theta)_2 \cdot dr \cdot (d\theta/2) - (\sigma_\theta)_4 \cdot dr \cdot (d\theta/2) + [(\tau_{r\theta})_2 - (\tau_{r\theta})_4] \cdot dr + R \cdot r \cdot d\theta \cdot dr = 0.$$

После деления на $dr \cdot d\theta$ это уравнение имеет вид:

$$[(\sigma_r \cdot r)_1 - (\sigma_r \cdot r)_3]/dr - 1/2[(\sigma_\theta)_2 - (\sigma_\theta)_4] + [(\tau_{r\theta})_2 - (\tau_{r\theta})_4]/d\theta + R \cdot r = 0. \qquad (11)$$

Если размеры элемента уменьшаются и в пределе становятся равными нулю, первый член уравнения в пределе обращается в $d(\sigma_r \cdot r)/dr$. Второй становится равным σ_θ, третий – $d\tau_{r\theta}/d\theta$. Проецируя все силы на окружное направление, получим второе уравнение. Окончательно эти два уравнения равновесия имеют вид:

$$d\sigma_r/dr + (1/r) \cdot (d\tau_{r\theta}/d\theta) + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r + R = 0;$$

$$(1/r) \cdot (d\sigma_\theta/d\theta) + d\tau_{r\theta}/dr + 2\tau_{r\theta}/r + S = 0, \qquad (12)$$

где S – компонента объемной силы в кольцевом направлении (в сторону увеличения θ).

С определенными допущениями можно считать, что аналогичное упругое состояние имеет место при всестороннем сжатии обрабатывающей среды при камерном методе обработки. Если объемные силы (силы инерции) равны нулю, что характерно для камерного полирования поверхностей деталей, то в соответствии с уравнениями (10) можно получить зависимости для определения компонент напряжений в частных производных [14]:

$$\sigma_r = (1/r) \cdot (d\varphi/dr) + (1/r^2) \cdot (d^2\varphi/d\theta^2), \quad \sigma_\theta = d^2\varphi/dr^2,$$

$$\tau_{r\theta} = (1/r^2) \cdot (d\varphi/d\theta) - (1/r) \cdot (d^2\varphi/(dr/d\theta) = -(d/dr) \cdot [(1/r) \cdot (d\varphi/d\theta)], \qquad (13)$$

где φ – функция напряжений, зависящая от r и θ.

Функция напряжений должна удовлетворять следующему дифференциальному уравнению:

$$[d^2/dr^2 + (1/r)\cdot(d/dr) + (1/r^2)\cdot(d^2/d\theta^2)]\cdot[d^2\varphi/dr^2 + (1/r)\cdot(d\varphi/dr) + (1/r^2)\cdot(d^2\varphi/d\theta^2)] = 0. \quad (14)$$

Из различных решений этого дифференциального уравнения в частных производных можно получить решения двумерных задач в полярных координатах при различных граничных условиях.

Руководствуясь экспериментальными данными о равномерном характере распределения давления обрабатывающей среды на поверхность детали, можно предположить, что в данном способе обработки имеет место полярно-симметричное распределение напряжений. При этом функция напряжений φ зависит только от r и уравнение (13) примет следующий вид:

$$[d^2/dr^2 + (1/r)\cdot(d/dr)]\cdot[d^2\varphi/dr^2 + (1/r)\cdot(d\varphi/dr)] =$$

$$= d^4\varphi/dr^4 + (2/r)\cdot(d^3\varphi/dr^3) - (1/r^2)\cdot(d^2\varphi/dr^2) + (1/r^3)\cdot(d\varphi/dr) = 0. \quad (14)$$

Это дифференциальное уравнение решается методом Эйлера. После умножения на r^4 уравнение принимает вид:

$$r^4\cdot(d^4\varphi/dr^4) + 2r^3\cdot(d^3\varphi/dr^3) - r^2\cdot(d^2\varphi/dr^2) + r\cdot(d\varphi/dr) = 0.$$

Составляем характеристическое уравнение:

$$\lambda\cdot(\lambda - 1)\cdot(\lambda - 2)\cdot(\lambda - 3) + 2\lambda\cdot(\lambda - 1)\cdot(\lambda - 2) - \lambda\cdot(\lambda - 1) + \lambda = 0.$$

Раскрыв скобки и приведя подобные члены, получим:

$$\lambda^4 - 4\lambda^3 + 4\lambda^2 = 0;\ \lambda^2\cdot(\lambda^2 - 4\lambda + 4) = 0;\ \lambda^2\cdot(\lambda - 2)^2 = 0.$$

Находим корни уравнения (они будут кратными):

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0;\ \lambda_3 = \lambda_4 = 2.$$

Таким образом, получаем общее решение уравнения (14). Это решение содержит четыре постоянных интегрирования, которые должны быть определены. Общее решение запишем как

$$\varphi = (c_1 + c_2\cdot lnr)\cdot r^2 + c_3 + c_4\cdot lnr. \quad (15)$$

Из этого общего решения можно получить решение ряда задач о

полярно-симметричном распределении напряжений без учета объемных сил. Соответствующие компоненты напряжений, согласно уравнению (15), имеют вид:

$$\sigma_r = (1/r)\cdot(d\varphi/dr) = -c_4/r^2 + c_2\cdot(1 + 2lnr) + 2c_1;$$
$$\sigma_\theta = d^2\varphi/dr^2 = -c_4/r^2 + c_2\cdot(3 + 2lnr) + 2c_1; \qquad (16)$$
$$\tau_{r\theta} = 0.$$

Если в начале координат нет отверстия, постоянные c_4 и c_2 обращаются в нуль, поскольку в ином случае при $r = 0$ эти компоненты становятся неограниченно большими. Следовательно, для обрабатывающей среды, моделируемой твердым телом без отверстия в начале координат, и при отсутствии объемных сил, может существовать только одно полярно-симметричное распределение напряжений, при котором $\sigma_r = \sigma_\theta = const$, и данная среда находится в условиях однородного сжатия во всех направлениях в своей плоскости.

Определение давления абразивной среды на обрабатываемую деталь типа кулачка механизма газораспределения дизеля проведем по схеме (рис. 9) (рис. 9 отсутствует), исходя из уравнений равновесия элементарного объема среды и условий отсутствия деформаций в направлении оси *OZ*.

Разбив фигуру (см. рис. 8) на ряд областей, можно определить компоненты напряжений в радиальном направлении при соответствующих граничных условиях:

Область А: $u = 0$; $\tau_{r\theta 1} = 0$; $r = R_1'$; $0 \le \varphi_1 \le 220^\circ$; $\sigma_r = R_1' = \sigma_{\theta 1} = P_1'$.

Область Б: $u = 0$; $\tau_{r\theta 2} = 0$; $r = R_2'$; $0 \le \varphi_2 \le 20^\circ$; $\sigma_r = R_2' = \sigma_{\theta 2} = P_2'$.

Область В: $u = 0$; $\tau_{r\theta 3} = 0$; $r = R_3'$; $0 \le \varphi_3 \le 30^\circ$; $\sigma_r = R_3' = P_3'$.

Область Г: $u = 0$; $\tau_{r\theta 4} = 0$; $r = R_4'$; $0 \le \varphi_4 \le 30^\circ$; $\sigma_r = R_4' = P_4'$.

Область Д и Е: $u = 0$; $\tau_{r\theta 5} = 0$; $r = R_5'$; $0 \le \varphi_5 \le 40^\circ$; $\sigma_r = P_5'$,

где u – радиальная компонента перемещения упругой обрабатывающей среды.

По вышеприведенным зависимостям можно определить давление обрабатывающей среды на все участки поверхностей кулачка.

В качестве обрабатывающей среды принимаем шлифовальный порошок зернистостью 10 из электрокорунда белого марки 25А с параметрами зерна $2a$ = 100 мкм = 0,1 мм, $2c$ = 56 мкм = 0,056 мм. Материалом детали служит сталь 18Х2Н4МА твердостью 600 *HB*. Конечная шероховатость поверхности R_a = 0,07 мкм.

Для области А радиус детали R_1'= 45 мм, а радиус эластичной оболочки камеры установки R_2' = 225 мм. В этом случае сила, действующая на единичное абразивное зерно рабочей среды, определяется как [4]:

$$P_2 = [(\pi \cdot HB)/(2\sqrt{c})]\cdot(5\cdot R_a/1{,}3)^{3/2} \cdot (c + a - 0{,}67\sqrt{c\cdot a}) =$$

$$= [(3{,}1415\cdot 600)/(2\cdot\sqrt{0{,}028})]\cdot(5\cdot 5\cdot 10^{-5}/1{,}3)\cdot(0{,}028 + 0{,}05 - 0{,}67\cdot\sqrt{0{,}028\cdot 0{,}05})$$

$$= 15{,}54\cdot 10^{-3} \text{ кг } (15{,}54\cdot 10^{-2} \text{ Н}),$$

где a и c – соответственно большая и малая полуоси элементов абразивных зерен, моделируемых эллипсоидом вращения.

Давление обрабатывающей среды в данном случае определяется как:

$$P'_1 = P_2 \cdot \{1 - [(R'_1)^2 - R_2^2]/[(R'_1)^2 + ((1 + \nu)\cdot(1 - \nu))\cdot R_2^2]\} =$$

$$15{,}54\cdot 10^{-3}\cdot\{1 - [45^2 - 225^2]/[45^2 + ((1 + 0{,}2)\cdot(1 - 0{,}2))\cdot 225^2]\} = 0{,}095 \text{ МПа},$$

где ν – коэффициент Пуассона обрабатывающей среды.

Для области Б радиус $R'2$ = 58 мм, а R_2 = 225 мм.

$$P'_2 = 15{,}54\cdot 10^{-3}\cdot\{1 - [58^2 - 225^2]/[58^2 + ((1 + 0{,}2)\cdot(1 - 0{,}2))\cdot 225^2]\} = 0{,}093 \text{ МПа}.$$

Для областей В и Г радиусы $R'_3 = R'_4$ = 28 мм, R_2 =225 мм.

$$P'3 = P'4 = 15{,}54\cdot 10^{-3}\cdot\{1 - [28^2 - 225^2]/[28^2 + ((1 + 0{,}2)\cdot(1 - 0{,}2))\cdot 225^2]\} = 0{,}093 \text{ МПа}.$$

Необходимо отметить, что расчеты давлений для приведенных выше участков поверхности детали проводились при скорости вращения детали на нежесткой эксцентричной оправке ω = 7–10 рад/с (см. рис. 1).

При значениях угловой скорости ω = 7–10 рад/с процесс взаимодействия плоских участков с обрабатывающей средой не носит ударного характера, а значение шероховатости на этих участках выравнивается до значений шероховатости на других участках, т.е. до R_a = 0,05 мкм.

В этом случае абразивные зерна, моделируемые эллипсоидом вращения, ориентируются к обрабатываемой поверхности своей большой осью, и процесс обработки носит стабильный характер при минимальном количестве поворотов абразивных частиц.

При этом давление на плоских участках детали определяется следующим образом [4] :

$$\omega\cdot(R'_1 + \varepsilon) = N_{эфф}/[30{,}2\cdot S_k\cdot(20\cdot P'_5)^{1{,}18\text{-}1{,}28\lg HB}\ ],$$

где ω – угловая скорость вращения детали, рад/с; S_k – площадь контакта обрабатывающей среды с плоскими участками, м^2; $N_{эфф}$ – эффективная мощность резания, кВт; HB – твердость обрабатывающего материала, МПа; P'_5 – давление уплотненной обрабатывающей среды, МПа; ε – эксцентриситет оси шпинделя, м.

После соответствующих преобразований при значениях параметров: скорости ω = 10 рад/с, $R'_1 = 45\cdot10^{-3}$ м; $N_{эфф}$ = 0,4 кВт; HB = 6000 МПа; $S_k = 1200\cdot10^{-6}$ м^2; $\varepsilon = 21\cdot10^{-3}$ м, давление обрабатывающей среды определяется как: $P'_5 = 0{,}2\cdot\{[30{,}2\cdot\omega\cdot(R'_1 + \varepsilon)\cdot S_K]/N_{эфф}\}^{0.273} = 0{,}2\cdot\{[30{,}2\cdot10\cdot66\cdot10^{-3}\cdot1200\cdot10^{-6}]/0{,}4\}^{0.273}$ = 0,092 МПа.

Таким образом, давление обрабатывающей среды при заданном оптимальном диапазоне угловых скоростей вращения детали (ω = 7–10 рад/с) равномерно распределяется по всему контуру кулачка, что свидетельствует о стабильном качестве обработки всей поверхности кулачка. Известно, что помимо физико-механических свойств и шероховатости поверхности качество обработанных деталей характеризуется точностью их изготовления по отношению к заданным размерам. Для полирования наружных

поверхностей деталей типа колец, дисков, втулок, цилиндров со сложной формой поверхности наиболее эффективной является обработка данных деталей в статически уплотненной абразивной среде с планетарным вращением деталей [7, 8].

В рассматриваемом способе обработки уплотненный абразивный слой весьма податлив и поэтому точно копирует наружный профиль погруженной в него детали. При этом создаются условия для равномерного съема металла со всех участков профиля обрабатываемой поверхности. Для заданного материала детали с учетом ее термообработки выбирается скорость резания (полирования) $V_{рез}$, в зависимости от которой определяется угловая скорость вращения детали вокруг центральной оси ротора [3].

$$\omega_2 = V_{рез}/(A + R),$$

где R – радиус детали; A – расстояние между осями вращения ротора и оправки.

Для качественной обработки деталей угловая скорость корректируется в сторону уменьшения, если ее расчетное значение превышает величину 10 рад/с.

В соответствии с ранее проведенными теоретическими исследованиями величина круговой подачи вращения детали вокруг собственной оси определяется следующим образом:

$$S_1 = V_{рез} \cdot R/[2\pi(A + R)],$$

а угловая скорость:

$$\omega_1 = S_1/R.$$

По определенным таким образом угловым скоростям вращения детали ω_1 и ротора ω_2 настраивают планетарный механизм устройства для камерного полирования.

Под действием давления сжатого воздуха через эластичную оболочку обрабатывающая среда трансформируется в уплотненную массу. За время обработки (t = 3–4 мин) партии деталей (n = 10 шт.) в установке параметр

шероховатости снижается с R_a = 2,5–1,25 до R_a = 0,1–0,05 мкм. Поверхностные слои приобретают умеренное деформационное упрочнение и сжимающие остаточные напряжения, достигающие у поверхности детали 400–500 МПа. Как уже отмечалось выше, качество детали также характеризуется точностью ее изготовления по отношению к заданным размерам. Экспериментальное исследование точности обработки наружного профиля в поперечном сечении деталей (роликов механизма газораспределения дизеля Д-50) производилось сравнением профилей необработанных и обработанных деталей. Перед абразивной обработкой детали устанавливали на оправку и на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21 определяли в прямоугольных координатах положения точек профиля относительно необработанной базовой поверхности. Обработка роликов производилась по двум схемам: с планетарным вращением и с простым вращением деталей в случае, когда A = 0, при давлении P = 0,075 МПа.

Эффективная мощность резания при обработке деталей в соответствии с ранее проведенными исследованиями определяется следующим образом:

$$N_{эфф} = 30{,}2 \cdot S_к \cdot V_{рез} (20P)^{1{,}18 - 1{,}28 \lg HB}, \qquad (17)$$

где $S_к$ – площадь контактирования абразивной среды с обрабатываемой поверхностью; $V_{рез}$ – скорость резания; P – давление уплотненного абразивного слоя; HB – твердость поверхностного слоя обрабатываемой детали. Данное выражение справедливо при следующих интервалах измерения параметров:

$0{,}26 \le V_{рез} \le 1{,}96$ м/с; $0{,}05 \le P \le 0{,}20$ МПа; $100 \le HB \le 6000$ МПа.

При давлении P = 0,075 МПа экспериментально была определена эффективная мощность резания с помощью специального измерительного комплекса. Значение мощности составило:

$$N_{эфф} = 900 \text{ Вт} = 0{,}900 \text{ кВт}.$$

Из зависимости (17) можно определить скорость резания $V_{рез}$:

$$V_{рез} = N_{эфф} / 30{,}2 \cdot S_к \cdot (20P)^{1{,}18-1{,}28\,\mathrm{Lg}HB}. \quad (18)$$

Подставляя в формулу (2.64) значения: $N_{эфф}$ = 0,900 кВт; P = 0,075 МПа; HB = 600 кг/мм^2 (6000 МПа) для стали 45 с твердостью 55–60 $HRC_э$ или 570–618 HB, $S_к$ = 28·10^{-4} м^2, получим $V_{рез}$ = 0,53 м/с, что согласуется с экспериментальными значениями скоростей резания, находящихся в диапазоне 0,5–0,75 м/с.

Угловая скорость вращения детали вокруг центральной оси ротора:

ω_2 = 0,53/(0,021 + 0,023) = 5 рад/с.

Величина круговой подачи определяется как:

S_1 = 0,53·0,023/6,28(0,021 + 0,023) = 0,044 м/с.

Величина угловой скорости ω_1, определяется следующим образом:

$\omega_1 = S_1/P$ = 0,044/0,023 = 2 рад/с.

Точность обработки деталей характеризуется не только равномерностью съема металла с различных участков профиля, но и характером съема металла в продольном сечении. Исследование изменения макрогеометрии поверхности деталей производилось на роликах механизма газораспределения дизеля после операции окончательного полирования. Перед обработкой на приборе ТАЛЕРОНД-51 были измерены волнистость и огранка поверхности. После обработки роликов при указанных выше режимах вновь производились измерения перечисленных параметров. Анализ записанных круглограмм показал, что в результате обработки высота волнистости и огранка снижаются приблизительно с W = 0,34–0,96 мкм до W = 0,17–0,48 мкм и с Δr = 0,6 мкм до Δr = 0,35 мкм (рис. 10).

Выводы

Проведенные исследования показали, что при обработке деталей с планетарным вращением стабильное протекание процесса полирования обеспечивается при условии, что участок поверхности детали с отклонением от круглости имеет возможность контактировать с уплотненной абразивной

средой как минимум в течение времени, необходимого для полного поворота вокруг центральной оси ротора или большего времени. За это время уплотненная абразивная среда успевает среагировать на изменение формы профиля детали, что обеспечивает стабильное протекание процесса полирования. Сообщение детали планетарного вращения осуществляется при условии, что величину межцентрового расстояния *A* между осями вращения детали и ротора выбирают конструктивно, примерно в пределах размерного диапазона (0,8–1,0) *R*, что обеспечивает возможность взаимодействия всех участков детали с уплотненной абразивной средой.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

1. **А.с. 1579740 СССР**, МКИ B24B 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А.Н. Мартынов, В.А. Скрябин, В.М. Федосеев. Опубл. 23.07.90. Бюл. № 27.
2. **А.с. 1678581 СССР**, МКИ B24B 31/116. Способ абразивной обработки изделий / А.Н. Мартынов, В.А. Скрябин, В.А. Лемин, В.М. Федосеев, Г.В. Бабаджан. Опубл. 23.09.91. Бюл. № 35.
3. **Патент 1803308 (РФ)**, МКИ: B24B 31/104. Способ обработки деталей / В.А. Скрябин. // Опубл. 23.03.93. Бюл. №11.
4. **Скрябин В.А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом. Монография. Пенза: Изд-во ПВАИУ, 1992. 120 с. /author_items.asp?refid=313044370&fam=Скрябин&init=B+A.

5. **Скрябин В.А., Рыбаков Ю.В.** Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Машиностроитель. 2000. № 2. С. 16–17.
6. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Рыбаков Ю.В.** Камерный способ обработки сложнопрофильных деталей уплотненным мелкодисперсным абразивом // Технология металлов. 2003. № 1. С. 19–24. elibrary.ru/item.asp?id=20935710.
7. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами. Монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2015. 240 с. http://elibrary.ru/item.asp?id=25306901.
8. **Мартынов А.Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Монография. Саратов: Изд-во: Сарат. Гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.
9. **Корнараки В.В., Доманский Р.А.** Зависимость коэффициента трения и угла естественного откоса некоторых шлифовальных материалов от влажности // Абразивы: Экспресс-информация. 1981. № 9. С. 16–19.
10. **Мусхелишвили Н.И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 648 с.
11. **Голушкевич С.С.** Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды. Л.-М.: Гостехиздат, 1948. 148 с.
12. **Тимошенко С.П., Гудьер Д.Ж.** Теория упругости. М.: Наука, 1985. 576 с.
13. **Скрябин В.А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 3. С. 18–22. http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810.

14. **Скрябин В.А., Свечникова Г.И.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22. http://elibrary.ru/item.asp?id=22985053.
15. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами/В.А. Скрябин, А.Г. Схиртладзе// Монография.–Старый Оскол: Изд-во«Тонкие наукоемкие технологии»,2015.–240с. http://elibrary.ru/item.asp?id=25306901. Повтор п. 7. Проверить в тексте
16. **Скрябин В.А.** Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25. № 4. С. 72–89. http://elibrary.ru/item.asp?id=23338433.

ИЛЛЮСТРАЦИИ

Рис. 1. Схема установки, реализующей способ обработки:
1 – зубчатая передача; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – оправка; *4* – кольцевая полость камеры; *5* – абразивная среда; *6* – эластичная стенка; *7* – камера; *8* – шарик; *9* – шарнирный поводок; *10* – вал ротора; *11* – приводной вал; *12* – демпфирующая пружина; *13* – неподвижный кулачок; *14* – кулачковая прорезь камеры

Рис. 2. Конструкция самоустанавливающейся оправки:
1 – корпус; *2* – хвостовик; *3* – тарельчатая пружина; *4* – поводок оправки; *5* – шарики; *6* – абразивная среда

Рис. 3. Ролик механизма газораспределения дизеля

Рис. 4. Опытный образец детали (кулачек распредвала дизеля 1-517ПДГ.92.15), использованный при проведении исследований

Рис. 5. Схема для определения эксцентриситета оси оправки относительно оси ротора

Рис. 6. Общий вид варианта промышленной установки для полирования деталей предлагаемым камерным способом в уплотненной обрабатывающей среде

Рис. 7. Система полярных координат при равновесии малого элемента обрабатывающей уплотненной среды

Рис. 8. Схема для определения давления уплотненной абразивной среды на обрабатываемую деталь типа «кулачок»

Рис. 9. НЕТ

Рис. 10. Волнистость и огранка при обработке деталей уплотненной обрабатывающей средой:
а – до обработки; *б* – после обработки

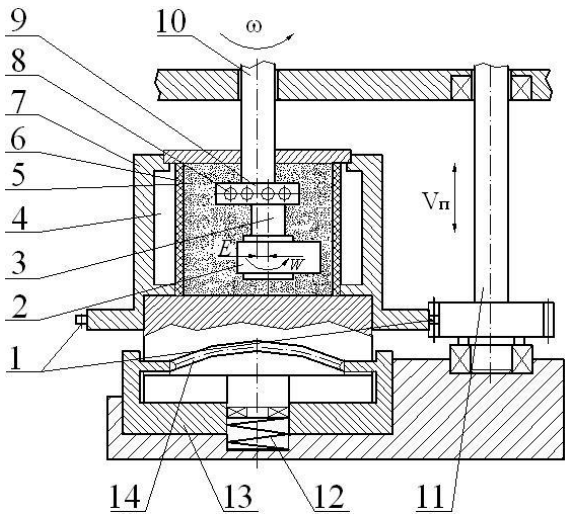


Рис. 1.

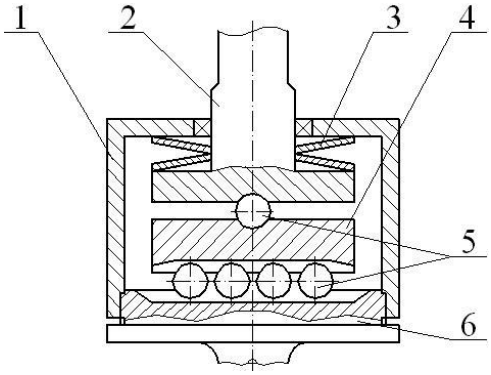

1
2
3
4
5
6

Рис. 2.

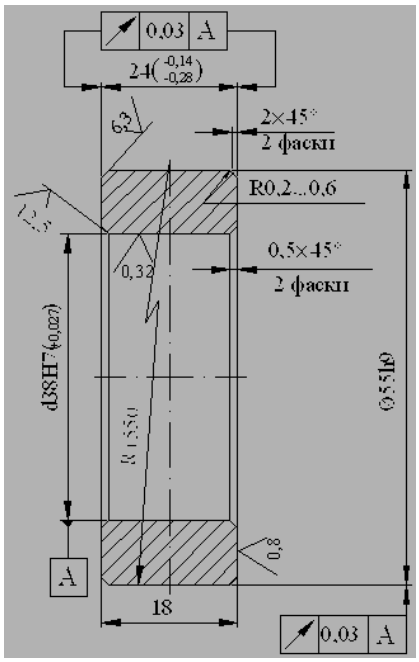

0,03 A
24(-0,14 -0,28)
6,3
2×45°
2 фаски
R0,2...0,6
0,5×45°
2 фаски
0,32
0,8
A
18
0,03 A

Рис. 3.

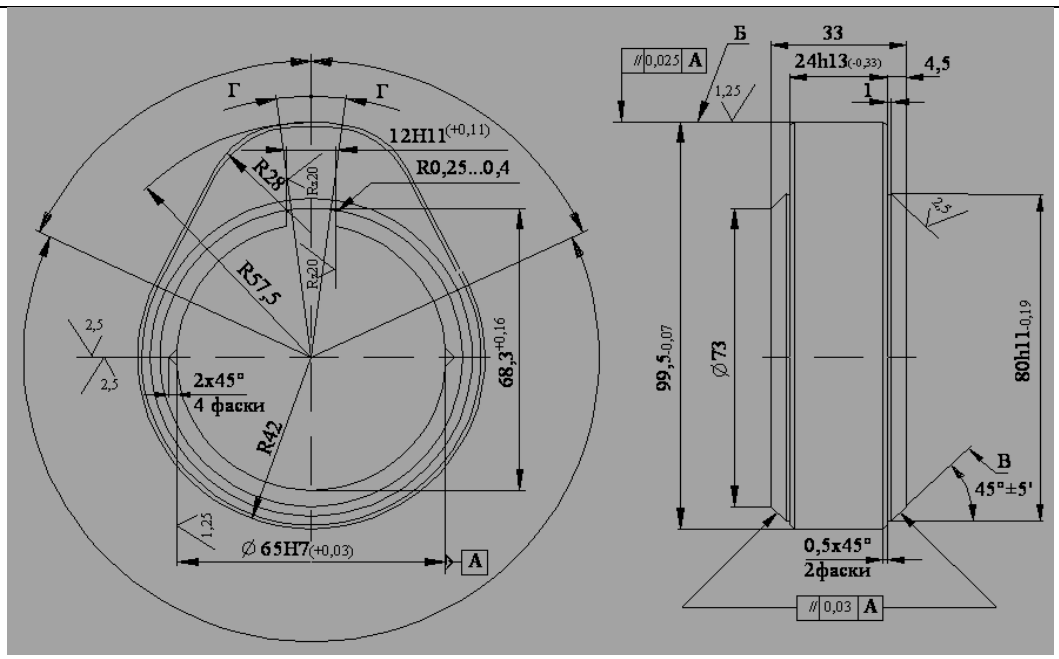

Г
Г
12H11(+0,11)
R0,25...0,4
R28
R20
R20
R57,5
2,5
2,5
2x45°
4 фаски
R42
68,3+0,16
1,25
∅ 65H7(+0,03)
A
Б
// 0,025 A
33
24h13(-0,33)
4,5
1
1,25
2,5
99,5-0,07
∅73
80h11-0,19
В
45°±5'
0,5x45°
2фаски
// 0,03 A

Рис. 4.

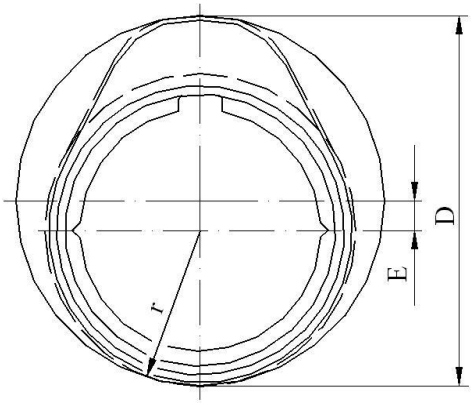

D
E
r

Рис. 5.

Рис. 6.

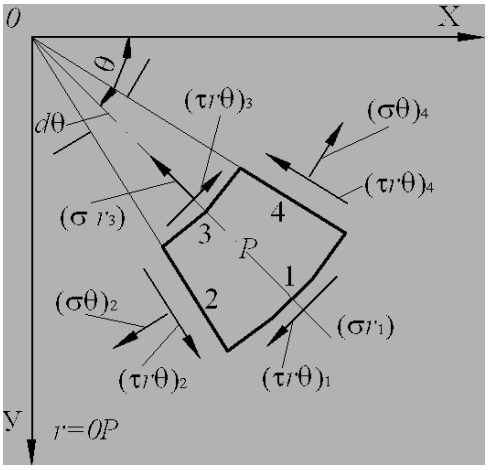


Рис. 7.

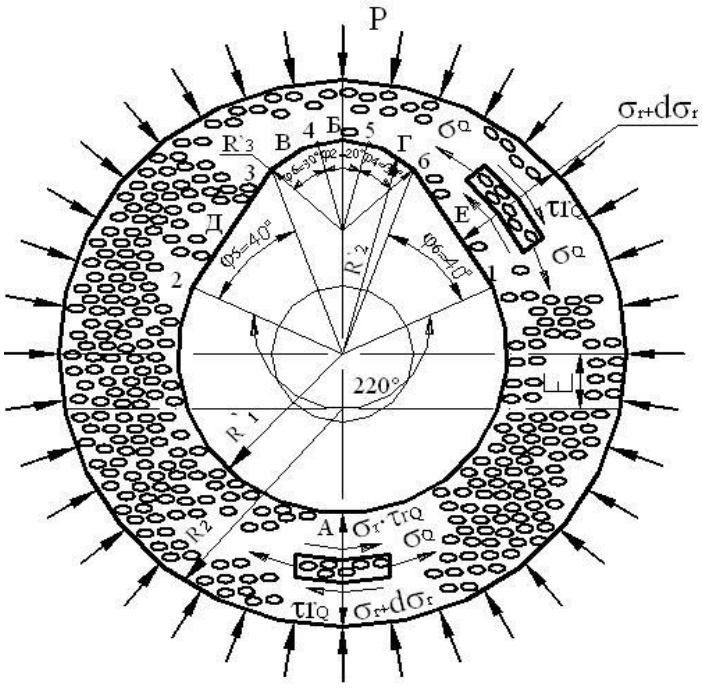
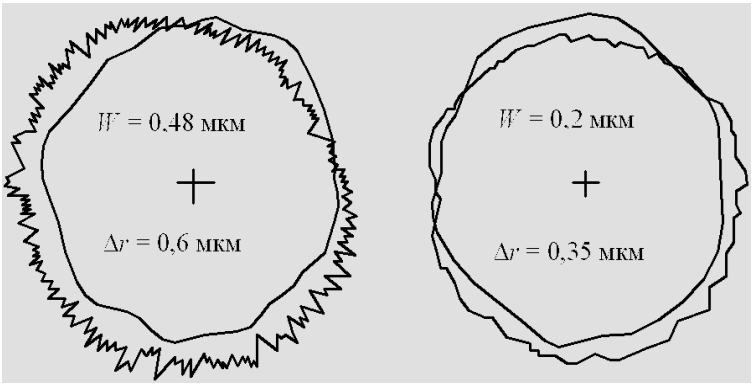


Рис. 8.



а *б*

Рис. 10.