

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ УПЛОТНЕННЫМИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ СРЕДАМИ

В. А. Скрябин

*ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»
(г. Пенза, Россия)*

В статье приведены особенности обработки поверхностей деталей со сложным профилем незакрепленным шлифовальным материалом. Представлены схемы методов обработки и результаты практической реализации финишной обработки с целью достижения заданной величины шероховатости обрабатываемых поверхностей. Для данного способа обработки силы инерции близки к нулю, поскольку давление абразивного слоя на обрабатываемую поверхность детали определяется действием сжатого воздуха на обрабатывающую среду через эластичную оболочку. В отличие от методов финишной обработки деталей инерционно уплотненным абразивом, в которых формирование уплотненного абразивного слоя происходит за счет сил инерции, в предлагаемом способе обработки уплотненная абразивная масса формируется статически под действием давления сжатого воздуха на эластичную оболочку камерного устройства и прижимается непосредственно к обрабатываемой поверхности. Таким образом, предлагаемый способ обработки деталей со статическим уплотнением обрабатывающей среды обеспечивает расширение технологических возможностей способа и повышение производительности и качества обработки. В рассматриваемом способе обработки режущий инструмент формируется автоматически из незакрепленных абразивных частиц, которые находятся в составе суспензии, путем уплотнения их в слой или эластичный брусок. При этом абразивные частицы находятся в состоянии плотной упаковки и копируют форму обрабатываемой поверхности. Исследования производительности и качества обработки деталей типа дисков и кулачков осуществлялись на экспериментальной установке, схема которой показана на рисунках. Установка зафиксирована на столе вертикально-сверлильного или радиально-сверлильного станка и соединена с его шпинделем. В кольцевую полость ее камеры подается сжатый под давлением воздух, в результате чего рабочая среда уплотняется и копирует форму обрабатываемой поверхности детали.

Ключевые слова: деталь со сложным профилем, незакрепленный шлифовальный материал, метод обработки, шероховатость, уплотненный абразивный слой, инерция, эластичная оболочка, камерное устройство, абразивная частица, состояние плотной упаковки, микротвердость, остаточное напряжение, пластическое деформирование, поверхностный слой

FEATURES OF INTRICATE-SHAPED PARTS BY CLOSE-SETTLED FINE ABRASIVE MEDIA

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russia)

The article deals with the particular surface treatment of complex profile parts with loose abrasives, the schemes of processing methods and results of practical implementation of finishing in order of achieving a predetermined magnitude of roughness of the processed surfaces. Inertia forces for this processing method are minimal since the pressure of the abrasive layer on the treated surface is defined by exposure of compressed air steam to the treating medium through



an elastic membrane. Unlike the methods of the finish machining with an inertially densified abrasive in which the formation of the densified abrasive layer occurs due to inertial forces, the proposed method of treating means that compacted abrasive mass is formed statically with pressure of compressed air stream to the elastic shell of the chamber and then presses the device directly to the treated surface. Thus, the proposed method enhances the technological capabilities and improves productivity and quality of processing. The cutting tool here is automatically generated from the loose abrasive particles, which are included as a compound of a suspension, when they are compacted into a layer or an elastic bar. At the same time, the abrasive particles copy a shape of a treated surface. Examination of productivity and quality of details such as disks and cams was carried on a test unit, scheme of which is given. The unit is fixed on a table of vertical drilling or radial drilling machine and is connected to its stem. Its annular cavity chamber is supplied with compressed air stream, and it condenses the working fluid, which copies the shape of the machined surface of a workpiece.

Keywords: intricate-shaped details, loose abrasive, methods of treatment, roughness, surface, compacted abrasive layer, inertia, elastic shell chamber device, abrasive particles, dense packing, microhardness, residual stresses, plastic deformation surface layer

Одним из проблемных вопросов от-делочно-зачистной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов является обеспечение ее производительности и качества. Эти параметры трудно, а иногда и невозможно обеспечить традиционными методами абразивной обработки. Одним из способов, позволяющих решить эту сложную задачу, является применение камерного метода обработки данных деталей уплотненными средами, абразивными наполнителями которых являются зерна и микропорошки хромистого и титанистого электрокорунда марок 32А, 33А, 34А, 37А, а также карбида кремния зеленого марок 62С, 63С, 64С – очень твердых и обладающих высокой режущей способностью.

Необходимо также отметить, что для данного способа обработки силы инерции близки нулю, поскольку давление абразивного слоя на обрабатываемую поверхность детали определяется действием сжатого воздуха на обрабатывающую среду через эластичную оболочку. В отличие от методов финишной обработки деталей инерционно уплотненным абразивом, в которых формирование уплотненного абразивного слоя происходит за счет сил инерции, в предлагаемом способе обработки уплотненная абразивная масса формируется статически под действием давления сжатого воздуха на эластичную оболочку камерного устройства и прижимается непосредственно к обрабатываемой

поверхности. Таким образом, предлагаемый способ обработки деталей со статическим уплотнением обрабатывающей среды обеспечивает расширение технологических возможностей способа и повышение производительности и качества обработки. Режущий инструмент формируется автоматически из незакрепленных абразивных частиц, которые находятся в составе суспензии, путем уплотнения их в слой или эластичный брусок. При этом абразивные частицы находятся в состоянии плотной упаковки и копируют форму обрабатываемой поверхности [2–3].

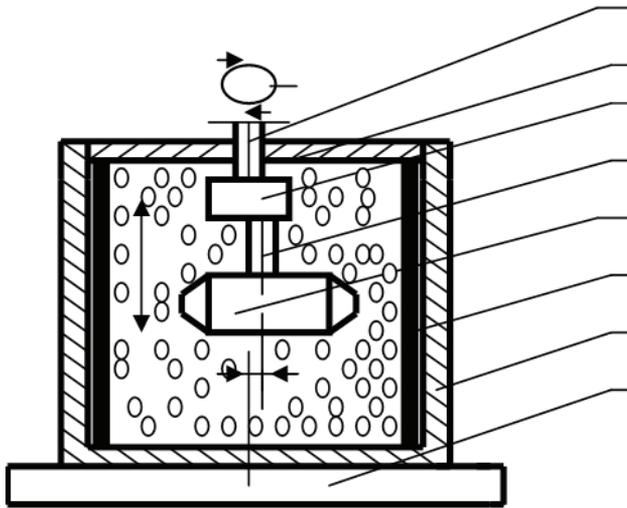


Р и с. 1. Промышленная установка
F i g. 1. Industrial installation

Исследования производительности и качества обработки деталей типа дисков и кулачков осуществлялись на экспериментальной установке, общий вид и схема которой показаны на рис. 1–2. Установка зафиксирована на столе вертикально-сверлильного или радиально-сверлильного станка и соединена с его шпинделем.

Работа такого устройства (рис. 2) осуществляется следующим образом. Обрабатываемую деталь 4 с радиусом R закрепляют на эксцентричной оправке 5 с экс-

центриситетом E , которая устанавливается на вал ротора 8. Перемещение оси оправки относительно оси ротора обеспечивается шарнирным поводком 6 с шариками. Ротор помещают в камеру 2 с эластичными стенками 3, заполненную абразивной средой A , и сообщают ему вращение с угловой скоростью $\omega = V / (E + R)$. Сверху камера закрывается крышкой 7. Максимальная величина угловой скорости – 7 рад/с. В кольцевую полость камеры подают сжатый воздух, в результате чего рабочая среда уплотняется.



Р и с. 2. Схема отделочно-зачистной обработки колеса турбины турбокомпрессора
F i g. 2. Scheme turbocharger diesel finishing and peeling

При этом уплотненная абразивная среда точно копирует форму профиля погруженной в нее детали. Ротору 8 посредством автоматического регулирования режимных параметров станка сообщается вращательное движение с реверсом и возвратно-поступательное движение вдоль оси вращения со скоростью V и амплитудой колебаний детали $80 \cdot 10^{-3}$ м.

Время выравнивания давления (заполнения возникшего зазора между поверхностью детали и абразивной средой) зависит от инерционности среды. Для эффективной обработки всего контура, требуется обеспечить равномерную ин-

тенсивность воздействия на все его точки. Для этого необходимо определить эксцентриситет E оси оправки относительно оси ротора:

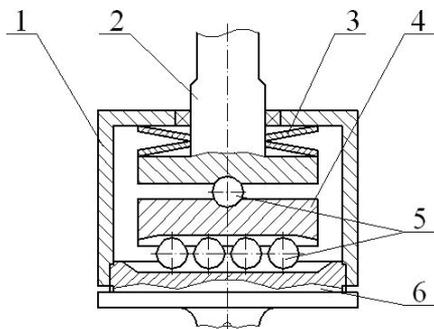
$$E = 0,5D - R,$$

где D – диаметр описанной окружности колеса турбины, $\text{м} \cdot 10^{-3}$; R – радиус смещения, $\text{м} \cdot 10^{-3}$.

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. Для обеспечения непрерывности контакта поверхности детали с абразивной средой предлагается крепить деталь на роторе посредством эксцентричной оправки, самоустанавливающейся под воздействием сил резания (рис. 3).



Р и с. 3. Конструкция самоустанавливающейся оправки

F i g. 3. Design of the self-adjusting mandrel

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 6, на которой крепится деталь. Такая конструкция обеспечивает перемещение оси оправки относительно оси ротора и контакт поверхности детали с абразивной средой.

Давление абразивной среды P_2 с учетом конструктивных параметров установки, радиуса эластичной оболочки R_0 , радиуса детали R , нормальной компоненты напряжения радиальном направлении σ_R , коэффициента Пуассона ν , действующее непосредственно на поверхность детали, P – давления, приложенного к эластичной оболочке, можно определить в соответствии с работой [2].

$$P_2 = (\sigma_R)_{R=R_0} = P \left[1 - \frac{R^2 - R_0^2}{R^2 + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} R_0^2} \right]. \quad (1)$$

В данном способе уплотненный абразивный слой обладает определенной упругостью и облегает профиль погруженной в него детали, точно копируя при этом форму ее профиля. В этом случае обеспечивается практически одинаковое давление на все участки профильной поверхности и происходит их равномерная обработка. Упругую абразивную среду можно рассматривать в первом приближении как изотропную, поскольку ее абразивные частицы ориентированы случайным образом.

Известно, что при любом способе обработки обрабатывающий (режущий) инструмент является одним из главных факторов, определяющих качественные характеристики операции технологического процесса, поэтому его исследованию уделяется большое внимание.

В обработке деталей свободным абразивом, являющимся тонким методом финишной обработки и основанном на удалении металла с обрабатываемой поверхности, инструмент также имеет большую значимость. Однако в этом методе он не существует отдельно от процесса обработки. Свободный абразив в состоянии поставки и даже абразивная суспензия, приготовленная на его основе, вне рассматриваемого метода обработки не являются инструментом и не несут всей необходимой информации для исследования. В данном способе, при обработке деталей в уплотненной абразивной среде, в качестве режущего инструмента применяют сухие или влажные (абразивная суспензия) абразивные зерна или порошки в уплотненном и напряженном состоянии.

В уплотненной абразивной среде между зернами отсутствует жесткая связка, в отличие от шлифовальных кругов. Однако благодаря сильным фрикционным связям абразивная среда обладает достаточно высокой прочностью и жесткостью и представляется как целостный инструмент.

Ранее было отмечено, что в свободном состоянии зерна абразивной среды обладают достаточно хорошей подвижностью, что позволяет им копировать форму обрабатываемой детали. Вследствие этого обработка поверхностей деталей со сложным геометрическим профилем, а также фасонных поверхностей уплотненным абразивом не представляет большой трудности по сравнению с обработкой связанным абразивом (шлифование, хонингование и др.), где необходимо применять сложные операции по профилированию и правке режущих инструментов.

При обработке деталей уплотненной абразивной средой сьем материала происходит путем резания выступами микрорельефа поверхности зерна. Из литературных источников следует, что независимо от зернистости абразива, выступы микрорельефа имеют ширину $B_m = 5-15$ мкм, высоту $h_m = (0,1-0,3)B_m$, а радиус округления вершин $\rho_m = 0,1-0,5$ мкм. Эти размеры на порядок ниже размеров режущих элементов выступов микропрофиля абразивного зерна при шлифовании и полировании.

Именно поэтому обработка деталей в уплотненной абразивной среде является более тонким видом абразивной обработки и обеспечивает получение меньшей шероховатости поверхности. При такой обработке зерна в абразивной среде в течение длительного времени сохраняют свою режущую способность: микровыступы на них достаточно быстро разрушаются, образуя при этом новые выступы, которые также являются режущими элементами. Кроме этого, в процессе обработки происходит частичная замена абразивных зерен, которые контактируют с поверхностью детали. При обработке в абразивной среде возможен поворот зерна и ориентация его новой гранью к обрабатываемой поверхности.

Благодаря этим причинам можно сказать, что абразивные зерна работают в режиме самозатачивания и по-

этому имеют высокую режущую способность. Кроме того, при обработке деталей в уплотненной абразивной среде свойства рабочей среды зависят не только от параметров отдельных зерен, но и от характера взаимодействия между ними. Отдельное абразивное зерно должно прочно закрепляться между другими абразивными зернами. В противном случае при взаимодействии с обрабатываемой деталью оно будет не скользить, а перекатываться по поверхности, не удаляя при этом микростружку, что приводит к понижению качества и производительности обработки данным способом. Таким образом, вопрос взаимодействия между абразивными зернами и обрабатываемыми поверхностями является актуальным и требует тщательной проработки.

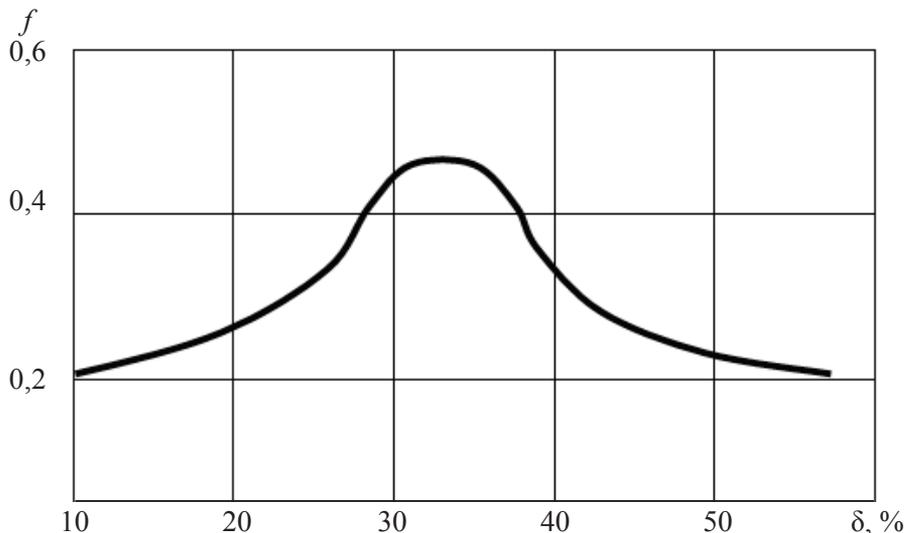
Известно, что надежное закрепление абразивного зерна будет иметь место тогда, когда момент сил, стремящийся повернуть абразивную частицу, будет меньше момента сил, удерживающего частицу от поворота [4-5]. Также известно, что фактором, влияющим на прочное закрепление абразивных зерен, является коэффициент внутреннего трения f и что для большинства абразивных сред значения данного коэффициента находятся в диапазоне 0,6-0,9.

В литературе указывается, что под воздействием вибраций происходит уменьшение коэффициента f зернистых сред, и снижение внутреннего трения может произойти до величины, когда зернистая среда приобретает свойства вязкой жидкости. Это явление получило название *виброожигение*. В результате исследований было установлено, что при воздействии вибраций на коэффициент внутреннего трения наиболее существенное влияние оказывает отношение ускорения колебаний к ускорению свободного падения g , а также влажность δ и зернистость z среды. Необходимо также



отметить, что зависимость от влажности имеет сложный характер. Из рис. 4 видно, что с увеличением влажности

коэффициент внутреннего трения возрастает до определенного момента, а затем начинает убывать.



Р и с. 4. Зависимость коэффициента внутреннего трения зернистости среды от ее влажности при наличии вибраций ($Z = 0,5$ мм)

F i g. 4. Dependence of abrasive grit internal friction on its moisture in presence of vibration ($Z = 0,5$ mm)

Важно отметить, что наибольшей прочностью при наличии вибраций и без них обладают среды объемной влажностью 20–25 %, что непосредственно приводит к преобладанию процесса микро-резания над полидеформационным и усталостным разрушением. Минимальное внутреннее трение имеют полностью водонасыщенные и сухие среды. Анализ зависимости коэффициента внутреннего трения (рис. 4) обрабатываемой среды от ее зернистости показал, что с уменьшением зернистости происходит снижение внутреннего трения среды.

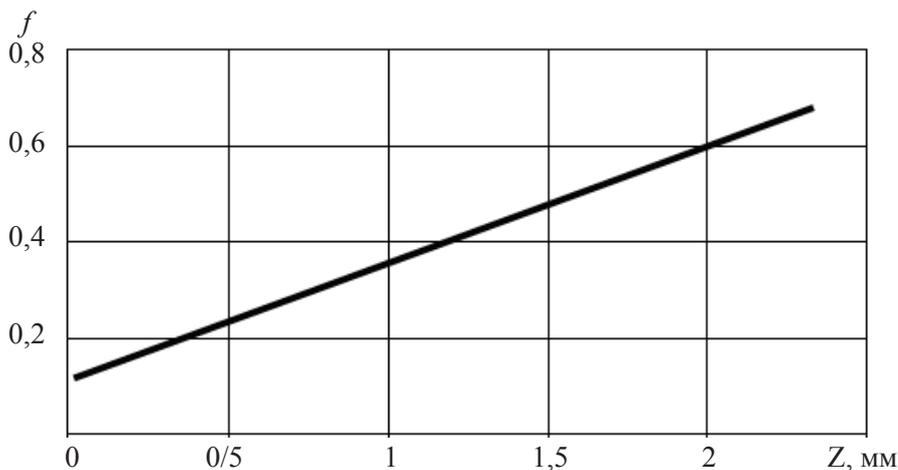
Представленные зависимости (рис. 4–5) показывают, что коэффициент внутреннего трения может быть $< 0,4$. В этом случае происходит нарушение прочности закрепления зерна и в результате снижается

режущая способность инструмента, поэтому при исследовании процесса обработки необходимо учитывать виброожижение обрабатываемой среды и выбирать необходимые режимы и условия обработки, чтобы не допустить такого состояния.

Из анализа схем обработки деталей в уплотненной обрабатываемой среде видно, что в случае обработки при их вращении без вибраций, условия, вызывающие виброожижение среды, отсутствуют. Однако когда обработка происходит по схемам, в которых деталь совершает колебательные движения, состояние виброожижения абразивной среды становится возможным. Необходимо отметить, что процесс обработки протекает стабильно при условии непрерывного контактирования абразивной среды и участка контура в течение оборота ротора с деталями

вокруг собственной оси (или большего времени). Эксперименты с использованием деталей с различным профилем свидетельствуют, что ударный характер взаимодействия поверхности кулачка и уплотненной абразивной среды не проявляется при ограничении угловой скорости ротора в пределах 5 рад/с, скорости возвратно-поступательного движения относительно оси вращения детали $V = (0,1-0,5) \cdot 10^{-3}$ м/с, амплитуды колебаний детали $80 \cdot 10^{-3}$ м

и применении самоустанавливающейся эксцентриковой оправки. Давление подводимого сжатого воздуха соответственно составило 0,1–0,2 МПа. Эксцентриситет E изменялся в диапазоне 15–20 мм. Изменение величины подводимого давления сжатого воздуха осуществлялось редукционным пневмоклапаном 122–12–У4 ГОСТ 18468–79. регистрация давления осуществляется манометром МВТПС–100–ОМ–2 ГОСТ 12733–79 с ценой деления 0,005 МПа.



Р и с. 5. Зависимость коэффициента внутреннего трения от зернистости среды при наличии вибраций ($\delta = 20 \%$)

F i g. 5. Dependence of iabrasive grit nternal friction on its moisture in presence of vibrations ($\delta = 20 \%$)

Экспериментальная установка позволяет обрабатывать широкую номенклатуру деталей. Образцы изготавливались из специальной труднообрабатываемого жаропрочного сплава ЖСЗДК твердостью 40–45 HRC и исходной шероховатостью поверхности $R_a = 2,5-3,2$ мкм. В качестве абразивных сред использовались абразивные порошки карбида кремния зеленой марки 63С50 с объемной влажностью 20–22 %. Жидкой составляющей среды служил 2%-ный 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.

Камерная обработка в статически уплотненной абразивной среде преимущественно используется для средне- и крупногабаритных деталей, которые в силу своих размеров и формы не могут быть обработаны в галтовочных барабанах, а также объемной, виброабразивной и центробежно-планетарной обработкой.

Существуют ограничения по размерам и массе обрабатываемых деталей, связанные с объемом и конструк-



цией рабочей камеры установки для полирования. Определены следующие соотношения объема рабочей камеры

установки, максимальной массы обрабатываемых деталей и их габаритных размеров (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Соотношение основных параметров установки и обрабатываемой детали
Ratio of basic parameters of installation and parts under processing

Объем рабочей камеры установки, л	2,5	5,0	15,0
Максимальная масса обрабатываемых деталей, кг	1,0	3,0	6,0
Максимальный габаритный размер деталей, м·10 ⁻³	70	140	300

Ограничением в конструкции обрабатываемых деталей является также наличие пазов, выемок, канавок, внутренних отверстий, доступ обрабатывающей среды к которым затруднен.

В процессе обработки деталей следует учитывать, что выбор зернистости шлифовального материала зависит от исходной шероховатости. Согласно исследованиям рекомендуются соотношения между этими параметрами, которые представлены в табл. 2.

Типичными представителями деталей, обрабатываемых предлагаемым способом, являются колесо турбины и вращающийся направляющий аппарат турбокомпрессора дизеля.

Для данных деталей очень трудоемкими являются финишные операции обработки рабочих поверхностей, которые в настоящее время выполняются или вручную, или методами, обеспечивающими частичную механизацию процесса обработки со сравнительно низкой производительностью.

Таблица 2

Table 2

Соотношения исходной шероховатости поверхности детали
и зернистости абразивного материала

The ratio of initial roughness of the part surface
and the abrasive grit

Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, Ra, мкм	Зернистость абразивного материала, Z
25–12,5	160–200
6,3–3,2	80–125
1,6–0,8	40–80
0,8–0,4	M5–M63

Технологическая последовательность предлагаемого способа обработки колес турбины и вращающихся

направляющих аппаратов турбокомпрессора дизеля представлена в табл. 3. Суммарное основное время



обработки ручной финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей турбокомпрессора дизеля по базовому варианту составляет

$t_o = 150$ мин. При обработке колеса турбины по проектируемому варианту основное время составляет $t_o = 6-10$ мин.

Таблица 3

Table 3

Сравнительные характеристики технологической последовательности финишной обработки колес турбины и вращающихся направляющих аппаратов турбокомпрессора дизеля уплотненной абразивной средой по отношению к базовым методам финишной обработки

Comparative characteristics of technological sequence of finishing turbine wheels and rotating guide vanes of diesel turbocharger with compacted abrasive substance in relation to basic methods of finishing

Колесо турбины – 1820.06.222	
Наименование операции	Наименование операции
Базовый вариант	Проектируемый вариант
Вручную шлифовальной машинкой с абразивным кругом	Полировальная (полирование уплотненной обрабатывающей средой на установке)

Таким образом, производительность обработки при требуемой шероховатости поверхности ($R_a = 0,8-0,63$ мкм) повышается в 15–25 раз, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности предлагаемого камерного способа полирования деталей уплотненной обрабатывающей средой.

Выбор значений режимных параметров и условий обработки в уплотненной обрабатывающей среде производится исходя из анализа конструкции детали, физико-механических свойств ее материала и требований, предъявляемых к поверхности детали, и основывается на результатах проведенных теоретических и экспериментальных исследований [1; 6]. При этом должны быть учтены геометрические параметры технологических установок, а также конкретные условия производства.

Основными технологическими факторами, оказывающими наиболь-

шее влияние на процесс обработки в уплотненной абразивной среде, являются состав абразивной среды, давление подводимого сжатого воздуха, соотношение радиальных размеров обрабатываемой детали и эластичной оболочки, скорость резания и продолжительность обработки.

Состав абразивной среды выбирается в первую очередь и характеризуется видом абразивного материала, его зернистостью, влажностью и составом смазочно-охлаждающей жидкости.

Вид абразива определяется исходя из механических свойств материала детали и необходимости того, чтобы твердость абразива значительно превосходила твердость обрабатываемого материала. В качестве абразивного материала, как правило, рекомендуется использовать электрокорунд нормальный и белый. Для финишной обработки сложнопро-



фильных деталей из жаропрочных литейных сплавов широкое применение нашли зерна и микропорошки хромистого и титанистого электрокорунда марок 32А, 33А, 34А, 37А, а также карбида кремния зеленого марок 62С, 63С, 64С – очень твердых и обладающих высокой режущей способностью. Выбор данных марок абразивного материала обусловлен их высокими режущими свойствами, сравнительно высокой износостойкостью и способностью обеспечивать хорошее качество обрабатываемой поверхности. Кроме того, они относительно дешевые и наиболее распространенные.

Зернистость абразивной среды назначается исходя из величины исходной шероховатости поверхности с учетом требуемого качества поверхности. Необходимо отметить, что с уменьшением исходной шероховатости зернистость уменьшается.

Выбор влажности абразивной среды зависит от конкретных условий производства. Наиболее предпочтительными являются влажные абразивные среды, поскольку они обеспечивают лучшее качество поверхности обработанной детали. Кроме того, применение влажных сред вследствие обеспечения лучшего теплоотвода из зоны микрорезания позволяет использовать более интенсивные технологические режимы и, таким образом, увеличивать производительность обработки.

Однако сухие абразивные среды также обладают некоторыми достоинствами: облегчают проведение операции по загрузке–разгрузке обрабатываемой среды вследствие своей повышенной текучести, а также исключают необходимость очистки деталей после обработки от налипших абразивных частиц. Они могут быть рекомендованы к применению в случае использования низких скоростей резания и при возникновении малых тепловых потоков.

При обработке деталей предлагаемым способом большое значение имеет процентное содержание жидкой компоненты в абразивной среде. Это связано с тем, что жидкая составляющая оказывает сильное воздействие на прочность контактного взаимодействия между зернами и благодаря этому влияет на режущие свойства абразивной среды. В связи с этим с целью обеспечения высокой режущей способности среды ее объемную влажность рекомендуется назначать в диапазоне 20–22 %.

В качестве составляющей обрабатываемой абразивной среды рекомендуется использовать жидкости следующего состава:

- 1) 1–2 % тринатрийфосфата, остальное – вода;
- 2) 0,5–1 % кальцинированной соды, остальное – вода;
- 3) 0,5–1,0 % нитрита натрия, остальное – вода;
- 4) 0,5–1,0 % карбоната кальция, остальное – вода;
- 5) 1,0–1,5 % полиэтиленового эфира (ОП-7, ОП-10), остальное – вода;
- 6) 1,0–1,5 % триэтаноламина, остальное – вода.

Рекомендуемые жидкости обладают хорошим моющим и охлаждающим действием, блескообразующей способностью, а также замедляют процессы коррозии и являются малотоксичными.

В состав рабочей жидкости с целью повышения производительности обработки могут быть введены добавки поверхностно-активных веществ: 0,5–1,0 % калиевого мыла; 1,0–1,5 % олеиновой кислоты; 1,5–3,5 % эмульсола Э2 (в этом случае обеспечивается повышение производительности обработки в 1,5–2,0 раза). Отметим, что олеиновая кислота и эмульсол обладают большой токсичностью, и поэтому применять их рекомендуется только в отдельных случаях. Достойные



результаты показали также рабочие жидкости Аквол-8 (2–10%-ный водный раствор), Аквол-10М, Аквол-14 (3–12%-ный водный раствор).

После выбора состава обрабатывающей среды назначают величину давления сжатого воздуха (исходя из уже принятого состава обрабатывающей среды, геометрических параметров установок и требуемой шероховатости поверхности).

Подводимое давление сжатого воздуха предварительно определяется на основании эмпирических зависимостей и условия микрорезания материала детали выступами микрорельефа абразивного зерна, а затем уточняется с учетом экспериментальных исследований шероховатости поверхности детали после обработки.

Величина скорости резания, как правило, назначается на основании исследований исходя из условия обеспечения необходимого качества,

а также максимальной производительности обработки.

Если нагрев детали превышает допустимую величину, то необходимо снизить скорость резания или, если это допустимо, повысить теплопроводность абразивной среды путем увеличения ее влажности. Варьирование указанных параметров производится до тех пор, пока нагрев детали не будет превосходить значение допустимой величины.

Время обработки задается в последнюю очередь с учетом исходной шероховатости, твердости материала детали, а также выбранных режимных параметров и условий обработки (как правило, оно составляет 3–5 мин). При этом меньшим значениям режимных параметров соответствует большая продолжительность обработки.

Рекомендуемые ориентировочные режимы обработки в зависимости от твердости материала деталей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Рекомендуемые значения режимных параметров обработки
Recommended values of operating parameters for processing

Способ обработки	Твердость материала детали, МПа	Давление воздуха, P, МПа	Скорость резания, V, м/с	Время обработки, t, мин
Камерная обработка деталей типа дисков	200–1 000 1 000–3 000 3 000–8 000	0,05–0,75 0,075–0,10 0,075–0,15	0,6–1,5	1–2 2–3 3–4
Камерная обработка деталей типа колес турбины и вращающихся направляющих аппаратов	200–1 000 1 000–3 000 3 000–8 000	0,05–0,75 0,075–0,10 0,075–0,15	0,4–0,6	6–10 8–10 10–12

Более точные значения применительно к конкретным типоразмерам деталей могут быть определены по вышеприведенной методике. Правильный выбор режимов в данных способах об-

работки имеет большое значение. Рекомендуемые режимы наряду с высокой производительностью обеспечивают формирование высоких качественных характеристик обработанных деталей.

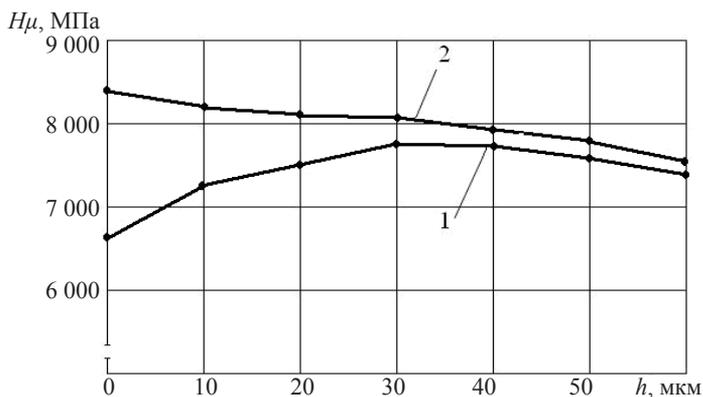


Шероховатость обработанной поверхности R_a , хотя и является качественным показателем, не может полностью характеризовать эксплуатационные свойства поверхности; важными показателями являются также микротвердость $H\mu$ и остаточные напряжения σ . При абразивной обработке металлов происходит пластическое деформирование поверхностного слоя и его наклеп, в результате чего обрабатываемая поверхность упрочняется, повышается ее микротвердость и изменяются физико-механические свойства. Исследование изменения микротвердости поверхностного слоя в результате обработки статически уплотненным незакрепленным абразивом проводили на образцах из труднообрабатываемых литейных сплавов ЖСЗДК твердостью 40–45 HRC. Эксперименты проводились на приборе ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду – 1Н. Исследования изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя произво-

дились по методу косых шлифов; результаты представлены на рис. 6.

Из проведенных исследований видно, что микротвердость поверхностного слоя после обработки в статически уплотненной абразивной среде значительно повышается. Объясняется это тем, что в предлагаемом способе финишной обработки деталей происходит процесс резания металла с определенным пластическим деформированием поверхностного слоя. При этом часть энергии расходуется на диспергирование металла, а часть аккумулируется в форме образования и скопления дислокаций.

Поскольку предлагаемый способ является низкотемпературным (температуры в зоне контакта не превышают 150°C), то в процессе обработки отсутствуют определенные условия, приводящие к разупрочнению и, следовательно, поверхность получает деформационное упрочнение. Проведенные эксперименты подтвердили этот вывод.



Р и с. 6. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя:

1 – микротвердость исходной поверхности; 2 – микротвердость поверхности обработанной уплотненной обрабатывающей средой ($V = 0,6$ м/с; $P = 0,1$ МПа; $t = 6$ мин; абразив 63С50)

Fig. 6. Depth – variations of the surface layer microhardness: 1 – microhardness of original surface; 2 – microhardness of surface processed with compacted polishing substance ($V = 0.6$ m/s, $P = 0.1$ MPa; $t = 6$ min; abrasive 63C50)

Если сравнить наклеп, образуемый в предлагаемом способе обработки, с получаемым в других методах абразивной обработки, то можно отметить, что его величина в рассматриваемом способе

несколько меньше, но распространяется он на большую глубину. Это можно объяснить характером исходных свойств поверхностного слоя и особенностями протекания процесса обработки, для которого

характерны меньшее контактное давление и гораздо большая длительность абразивного воздействия. Как видно из рис. 6, микротвердость исходной поверхности в поверхностном слое меньше, чем на глубине. Это объясняется как частичным обезуглероживанием поверхностного слоя в процессе закалки, так и отпуском после термообработки, который приводит к образованию в поверхностном слое тростита и аустенита отпуска, имеющих пониженную твердость по сравнению с основной мартенситной структурой. Обработкой уплотненным абразивом удаляется этот дефектный поверхностный слой, что само по себе приводит к некоторому увеличению микротвердости.

Низкие температуры и умеренный наклеп за счет пластической деформации от абразивного воздействия обеспечивают повышение микротвердости поверхностного слоя. Повышение микротвердости оказывает положительное влияние на износостойкость поверхностей при трении, усталостную прочность, контактную выносливость и коррозионную стойкость деталей.

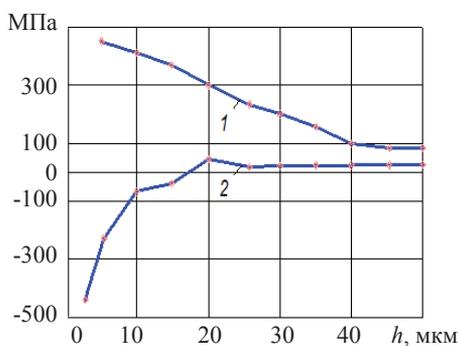
Согласно исследованиям [1; 6] метода обработки деталей незакрепленным абразивом, уплотненным инерционными силами, в поверхностном слое возникают значительные сжимающие напряжения (величина внутренних напряжений достигает 450–550 МПа). Остаточные напряжения в данном способе обработки формируются под действием незначительных пластических деформаций. Это объясняется тем, что процесс протекает при низких температурах, что исключает возможность температурных структурных превращений в поверхностном слое. Кроме того, в результате структурных изменений в поверхностном слое (частичного превращения остаточного аустенита в мартенсит) возрастает его удельный объем, что приводит к возникновению дополнительных сжимающих остаточных напряжений. Аналогичное обстоя-

тельство следует отметить также для способа обработки деталей статически уплотненной абразивной средой в силу общих физических закономерностей процесса обработки.

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое повышают усталостную прочность деталей при циклическом нагружении, предел их выносливости и качество.

При экспериментальных исследованиях и расчетах остаточных напряжений использовался метод Давиденкова. Тензометрирование деформаций образцов осуществлялось при удалении с них поверхностных слоев с помощью электролитического полирования.

Предшествующей операцией была термическая обработка деталей. Поскольку в результате нее в металле сохраняется значительное количество остаточного аустенита, удельный вес которого меньше удельного веса мартенсита, то в поверхностном слое деталей до обработки имели место растягивающие остаточные напряжения. Их значения у поверхности достигали 450 МПа и уменьшались по мере удаления вглубь металла (рис. 7).



Р и с. 7. Остаточные напряжения в поверхностном слое деталей, обработанных уплотненным абразивом: 1 – до обработки; 2 – после обработки

F i g. 7. Residual stresses in surface layer of the parts processed with compacted abrasive: 1 – before processing; 2 – after processing



Измерение остаточных напряжений после обработки рассматриваемым способом показало, что в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения. Величина их у поверхности колебалась от 400 до 500 МПа, а на глубине 15–20 мкм сжимающие остаточные напряжения переходили в незначительные растягивающие напряжения. Остаточные напряжения в поверхностном слое обработанных деталей примерно равны по величине и знаку остаточным напряжениям в известных методах финишной обработки, но формирование их происходит при несколько отличных условиях. Низкотемпературные условия протекания процесса обработки уплотненным потоком свободного абразива дают основание предположить, что фазовых превращений в поверхностном слое не происходит. Многочисленные эксперименты подтвердили это, и случаев прижогов на поверхности деталей после обработки не наблюдалось. Следовательно, остаточные напряжения в данном способе формируются только под действием силового фактора, то есть пластических деформаций.

При абразивном воздействии уплотненного слоя на обрабатываемую поверхность в поверхностном слое происходит пластическое деформирование металла, что способствует увеличению удельного объема деформированного металла. При низких температурах это обстоятельство, как отмечалось выше, приводит к появлению в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

В указанных условиях должны возникать остаточные сжимающие напряжения, пропорциональные степени пластического деформирования, то есть величине наклепа поверхностного слоя. При сравнительно небольшом контактом давлении уплотненный абразивный брусок не обеспечивал интенсивного пластического деформирования. Процесс обработки происходил

с преобладанием микрорезания, что было показано выше при исследовании шероховатости [7–10].

С учетом данного обстоятельства следовало бы ожидать, что в рассматриваемом способе обработки будут иметь место малые значения остаточных сжимающих напряжений, поскольку микротвердость поверхностного слоя повышается в результате обработки только на 10–12 %. Экспериментальные исследования, однако, показали, что остаточные напряжения достигают 400–500 МПа, т. е. являются значительными. Объясняется это структурными изменениями в поверхностном слое, вызывающими дополнительные сжимающие остаточные напряжения. Выше было отмечено, что при абразивном воздействии уплотненного бруска в поверхностном слое происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит. При этом возрастает удельный объем поверхностного слоя, в результате чего в нем возникают дополнительные сжимающие остаточные напряжения.

Режимы обработки и зернистость абразива влияют на остаточные напряжения в поверхностном слое. Их изменение, ведущее к увеличению интенсивности абразивного воздействия, приводит к возрастанию сжимающих остаточных напряжений. Однако при всех изменениях режимов обработки в поверхностном слое обрабатываемых деталей формируются только сжимающие остаточные напряжения, что говорит об устойчивости процесса. Поверхностный слой деталей, обработанный по рассматриваемому способу, имеет качественные характеристики, не уступающие поверхностям, полученным другими известными способами финишной обработки.

Для реализации данного способа был выполнен комплекс работ по проектированию, изготовлению и внедрению в производство специальной уста-

новки. Эти работы были произведены ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет» (ПГУ), в том числе совместно с ОАО «Пензадизельмаш» и ОАО «СКБТ» (г. Пенза).

Обработку поверхностей деталей предлагаемым способом с уплотнением обрабатывающей среды посредством давления сжатого воздуха на эластичную оболочку рабочей камеры можно рекомендовать в случаях финишной обработки наружных поверхностей деталей типа:

- колес турбин и вращающихся направляющих аппаратов;
- длинномерных деталей (при соответствующей модернизации установок);
- наружных поверхностей деталей под гальванопокрытие.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований способа обработки деталей, а также разработанные на их основе рекомендации по выбору эффективных режимов и условий обработки позволили спроектировать технологические процессы полирования колес турбин и вращающихся направляющих аппаратов.

Применение рекомендуемых режимов и условий обработки является довольно эффективным при полировании вышеуказанных деталей. На промышленном варианте установки (см. рис. 1) в условиях среднесерийного производства для этих деталей были отработаны эффективные режимы и условия обработки камерного полирования, приведенные в табл. 5.

Производственные испытания вышеуказанных деталей турбокомпрессора дизеля на ОАО «СКБТ», обработанных с рекомендуемыми режимными параметрами, показали, что ресурс их работы увеличился в 1,2–1,5 раза.

Применение эффективных режимных параметров дало значительный экономический эффект при финишной обработке деталей.

Применение новой технологии по сравнению с базовой обеспечивает сокращение машинного времени полирования в 15–25 раз и снижение шероховатости поверхности R_a с 2,5–3,2 до 0,8–0,63 мкм.

Полученные данные свидетельствуют о возможности широкого применения камерного способа обработки деталей для различных типов производств – от мелкосерийного до крупносерийного.

Выводы

1. Показано, что обработка камерным способом в статически уплотненной абразивной среде, используется преимущественно для средне- и крупногабаритных деталей, которые в силу своих размеров и формы не могут быть обработаны в галтовочных барабанах, а также объемной, виброабразивной и центробежно-планетарной обработкой.

2. Определены соотношения основных параметров установки и обрабатываемой детали, а также исходной шероховатости поверхности детали и зернистости абразивного материала.

3. Основные результаты исследований нашли практическое применение в виде внедрения в производство новой технологии, опытно-промышленной установки и соответствующих рекомендаций по выбору режимов и условий обработки. Данное оборудование используется на промышленных предприятиях для обработки деталей турбокомпрессора дизеля, а также многочисленного ряда деталей, имеющих сложнопрофильные поверхности.

4. Показано, что предложенная схема обработки дает возможность уменьшить шероховатость обработанной поверхности R_a с 3,2–2,5 до 0,8–0,63 мкм. При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается на 10–12 % на глубине 30–50 мкм с формированием остаточных сжимающих напряжений до 400–500 МПа.

5. Исследования показали, что ресурс работы деталей, обработанных предложенным способом, повышается в 1,2–1,4 раза.



Таблица 5
Table 5

Эффективные режимы и условия финишной обработки деталей механизма газораспределения дизеля
Effective modes and conditions for finishing diesel valve gear parts

Наименование детали	Рабочая жидкость		Абразивный наполнитель	Режимные параметры			Исходная шероховатость поверхности, мкм	Полученная шероховатость поверхности, мкм
	Состав	Количество, %		V , м/с	P , МПа	t , мин		
Колесо турбины 1820.06.222	Na_2CO_3 калиевое мыло; Na_3PO_4 H_2O	0,5–1,0	Электрокорунд хромистый и титанистый марок 32A10–25; 33A10–25; 34A40–80; 27A40–80. Карбид кремния зеленый марок 62C10–25; 63C10–25; 63C40–80; 64C40–80.	0,40–0,60	0,10–0,15	6–10	2,5–3,2	0,80–0,63
		0,5–1,0 0,5–1,0 1,0–2,0 98,0–96,0						
Аппарат 4208.06.203	$CaCO_3$; $NaNO_2$; $C_{17}H_{33}COOH$; H_2O	0,5–1,0	Электрокорунд хромистый и титанистый марок 32A10–25; 33A10–25; 34A40–80; 27A40–80. Карбид кремния зеленый марок 62C10–25; 63C10–25; 63C40–80; 64C40–80.	0,40–0,60	0,10–0,15	6–10	2,5–3,2	0,80–0,63
		0,5–1,0						
		1,0–1,5 98,0–96,5						
	Na_2CO_3 калиевое мыло; Na_3PO_4 H_2O	0,5–1,0	Электрокорунд хромистый и титанистый марок 32A10–25; 33A10–25; 34A40–80; 27A40–80. Карбид кремния зеленый марок 62C10–25; 63C10–25; 63C40–80; 64C40–80.	0,40–0,60	0,10–0,15	6–10	2,5–3,2	0,80–0,63
		1–2,0 98,0–96,0						
	Аквол-8 (2–10%-ный водный раствор); Аквол-10М; Аквол-14 (3–12%-ный водный раствор)							

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Мартынов, А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненными инерционными силами / А. Н. Мартынов. – Саратов : Изд-во Саратов. Гос. техн. ун-та, 1981. – 212 с.

2. Патент Российская Федерация, МКИ В 24 В 31/104. Способ обработки деталей / В. А. Скрябин. – №1803308, опубл. 23.03.93, Бюл. № 11.

3. **Скрябин, В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом : монография / В. А. Скрябин. – Пенза : Изд-во ПВАИУ, 1992. – 120 с.

4. **Скрябин, В. А.** Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами / В. А. Скрябин, Ю. В. Рыбаков // Машиностроитель. – 2000. – № 2. – С. 16–17.

5. **Скрябин, В. А.** Камерный способ обработки сложнопрофильных деталей уплотненным мелкодисперсным абразивом / В. А. Скрябин, А. Г. Схиртладзе, Ю. В. Рыбаков // Технология металлов. – 2003. – № 1. – С. 19–24.

6. **Скрябин, В. А.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем / В. А. Скрябин, Г. И. Свечникова // Машиностроитель. – 2011. – № 4. – С. 18–22.

В статье излагаются результаты экспериментальных исследований финишной абразивной обработки деталей с различным профилем, показывающие влияние технологических факторов на удельный съем металла и позволяющие прогнозировать производительность обработки деталей. Приводится описание работы оборудования, использованного при проведении экспериментальных исследований.

7. **Скрябин, В. А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей с различным профилем / В. А. Скрябин // Машиностроитель. – 2011. – № 3. – С. 18–22.

В статье излагаются результаты экспериментальных исследований деталей с различным профилем, показывающие влияние технологических факторов финишной абразивной обработки на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей с различным профилем и позволяющие прогнозировать шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей. Приводится описание работы оборудования, использованного при проведении экспериментальных исследований. Даются рекомендации по выбору технологических режимов обработки.

8. **Скрябин, В. А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на производительность обрабатываемых поверхностей деталей сложного профиля / В. А. Скрябин // Машиностроитель. – 2011. – № 4. – С. 16–23.

9. **Скрябин, В. А.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем / В. А. Скрябин, Г. И. Свечникова // Машиностроитель. – 2012. – № 4. – С. 18–22.

10. **Скрябин, В. А.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами : монография / В. А. Скрябин, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. – 240 с.

Поступила 19.03.2015 г.

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет» (Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>**, vs_51@list.ru

Для цитирования: Скрябин, В. А. Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средствами / В. А. Скрябин // Вестник Мордовского университета. – 2015. – Т. 25, № 4. – С. 72–89. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.072



REFERENCES

1. Martynov A. N. Osnovy metoda obrabotki detaley svobodnym abrazivom, uplotnennym inertsiionnymi salami [Bases of method of treatment of details a free abrasive close-settled inertia forces]. Saratov: Sarat. State University Publ., 1981, 212 p.
2. Pat. RF 1803308, MKI: B24B 31/104. Method of treatment of details. Of V. A. Skryabin. 23.03.93, no. 11.
3. Skryabin V. A. Osnovy protsesssa submikrorezaniya pri obrabotke detaley nezakreplennym abrazivom: monografiya [Bases of process of submicrometre at treatment of details an unsupported abrasive: a monography]. Penza: PVAIU Publ., 1992, 120 p.
4. Skryabin V. A., Rybakov Yu. V. Novyy metod finishnoy obrabotki detaley svobodnymi melkodispersnymi sredami [New method of finish treatment of details the free мелкодисперсными environments]. *Mashinostroitel* [Machine Engineer]. Moscow: Turn-center Publ., 2000, no. 2, pp. 16–17.
5. Skryabin V. A., Shirladze A. G., Rybakov Yu. V. Kamernyy sposob obrabotki slozhnoprofilnykh detaley uplotnennym melkodispersnym abrazivom [Vitrol-chamber of treatment of figurine details the close-settled fine abrasive]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2003, no. 1, pp. 19–24.
6. Skryabin V. A., Svechnikova G. I. Eksperimentalnyye issledovaniya proizvoditelnosti finishnoy abrazivnoy obrabotki detaley s razlichnym profilem [Experimental researches of the productivity of finish abrasive treatment of details with the different profile]. *Mashinostroitel* [Machine Engineer]. Moscow: Turn-center Publ., 2011, no. 4, pp. 18–22.
The article publishes the results of the pilot studies of finishing abrasive processing of different profile details. It demonstrates influence of technology factors on metal-removal rate to estimate the impact of these factors on productivity. The description of work equipment is provided.
7. Skryabin V. A. Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov i usloviy finishnoy abrazivnoy obrabotki na sherokhovatost obrabatyvayemykh poverkhnostey detaley s razlichnym profilem [Research of influence of technological factors and the conditions anglistikojeoy of finish abrasive treatment on the roughness of processed surfaces of details with the different profile]. *Mashinostroitel* [Machine Engineer]. Moscow: Turn-center Publ., 2011, no. 3, pp. 18–22.
The article publishes the results of the pilot studies of different profile details. It demonstrates influence of finishing abrasive processing technology factors on roughness of processed surfaces of details with various profile. The data allows to predict roughness of the processed surfaces of details. The description of work equipment is provided. The article contains the recommendations on technological modes of processing are made.
8. Skryabin V. A. Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov i usloviy finishnoy abrazivnoy obrabotki na proizvoditelnost obrabatyvayemykh poverkhnostey detaley slozhnogo profilya [Research of influence of technological factors and terms of finish abrasive treatment on the roughness of processed surfaces of details with the different profile]. *Mashinostroitel* [Machine Engineer]. Moscow: Turn-center Publ., 2011, no. 3, pp. 16–23.
9. Skryabin V. A., Svechnikova G. I. Eksperimentalnyye issledovaniya proizvoditelnosti finishnoy abrazivnoy obrabotki detaley s razlichnym profilem [Experimental researches of the productivity of finish abrasive treatment of details with the different profile]. *Mashinostroitel* [Machine Engineer]. Moscow: Turn-center Publ., 2012, no. 4, pp. 18–22.
10. Skryabin V. A., Shirladze A. G. Tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva obrabotki slozhnoprofilnykh detaley uplotnennymi melkodispersnymi sredami: monografiya [The Technological providing of quality of treatment of figurine details close-settled fine environment: monography]. Staryy Oskol: Thin knowledge-based technologies Publ., 2015, 240 p.

Submitted 19.03.2015

About the author:

Skryabin Vladimir Aleksandrovich, professor of chair of Machine Engineering Technology of Penza State University (40, Krasnaya Str., Penza, Russia), Dr.Sci. (Engineering), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>**, vs_51@list.ru

For citation: Skryabin V. A. Features of intricate-shaped parts by close-settled fine abrasive media. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin]. 2015, vol. 25, no. 4, pp. 72–89. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.072