



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

УДК 62-22:621.83

DOI: 10.15507/0236-2910.026.201604.475-489

КАМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ТИПА ДИСКОВ И КУЛАЧКОВ

В. А. Скрябин*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»**(г. Пенза, Россия)**vs_51@list.ru*

Введение. Высокая эффективность финишной обработки деталей со сложным профилем (типа дисков и кулачков) может быть достигнута обработкой незакрепленным шлифовальным материалом, уплотненным в камере статическим давлением сжатого воздуха через эластичную оболочку. В статье приведены особенности такой обработки.

Материалы и методы. Исследования качества обработки деталей типа дисков и кулачков осуществлялись на экспериментальной установке. Обрабатываемые детали закреплялись на специальной оправке с эксцентриситетом, находящейся в шпинделе установки, спроектированной на базе вертикального или радиально-сверлильного станка. При этом с целью повышения качественных показателей обрабатываемой поверхности детали камера совершала возвратно-поступательные движения с определенной скоростью и амплитудой.

Результаты исследования. При расчете давления уплотненной абразивной среды автор исходил из того, что абразивная среда находится в состоянии предельного равновесия. В статье приведены математические модели для определения скорости резания при вращении детали относительно неподвижной обрабатываемой среды; представлены схемные решения методов обработки и результаты практической реализации финишной обработки с целью достижения заданной величины шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Обсуждение и заключения. 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 минимум в течение времени, необходимого для полного оборота вокруг центральной оси ротора. За это время уплотненная абразивная среда успевает среагировать на изменение формы профиля детали, что обеспечивает стабильное протекание процесса полирования.

Ключевые слова: деталь со сложным профилем, незакрепленный шлифовальный материал, камерная обработка, шероховатость, уплотненная абразивная среда, скорость резания, полирование

Для цитирования: Скрябин В. А. Камерная обработка деталей типа дисков и кулачков // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 4. С. 475–489. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201604.475-489

CHAMBER TREATMENT PROCESS OF DISKS AND FISTS

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russia)

vs_51@list.ru

Introduction. The article describes the processing of different surfaces of details by unsupported polishing material. High efficiency of finish process with difficult profile can be attained by unsupported polishing material close-settled in a chamber static pressure of the compressed air through an elastic shell.

Materials and Methods. The researches of treatment quality of disks and fists were carried out on experimental install. The workpieces are fixed on a special snap eccentrically located in the spindle unit. The chamber makes reciprocating movement at a certain speed and amplitude in order to improve the quality of the processed surface.

Results. The article presents mathematical models to determine the cutting speed when parts rotating relative to the fixed manufacturing environment. The author describes the methods of the processing in order to achieve a predetermined surface roughness value.

Discussion and Conclusions. The stability of the polishing process is supported by possibility of contact of complex surfaces with the dense abrasive agent during time required for complete revolution of the rotor about the central axis. The abrasive agent has time to react to the changing shape of the part profile.

Keywords: complex profile detail, loose grinding material, processing chamber, roughness, compacted abrasive agent, cutting speed, polishing

For citation: Skryabin VA. Chamber treatment process of disks and fists. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 4(26):475-489. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201604.475-489

Введение

Одной из проблемных технологических задач является финишная обработка деталей типа дисков и кулачков. Качество подобных деталей во многом определяют характеристики их рабочих поверхностей. Шлифование таких деталей традиционными методами требует или применения шлифовальных станков со сложным механизмом радиальной подачи, или специального технологического оснащения для каждого типоразмера детали.

Трудность обработки таких деталей состоит в том, что для обеспечения равномерной шероховатости поверхности по контуру детали, а также для повышения параметров точности обработки требуется безотрывное обтекание профильной поверхности уплотненной абразивной средой.

Материалы и методы

Данная задача реализуется путем обработки вышеуказанных деталей

статически уплотненной абразивной смесью [1–4]. Рабочую среду уплотняют путем приложения внешнего давления различной величины к отдельным участкам периметра поперечного сечения эластичной оболочки камеры. В соответствии с положением профиля детали относительно участков эластичной оболочки синхронизируют давление по данным участкам. Деталь помещают в камеру с абразивной средой и сообщают ей вращение.

Для реализации камерной обработки используют устройство, содержащее образованную корпусом 1 и эластичной оболочкой 2 рабочую камеру 3 с обрабатывающей средой 4, в которой размещена приводная оправка 5 для закрепления детали (кулачка) 6 (рис. 1). Между корпусом 1 и эластичной оболочкой 2 размещены радиальные перегородки – стенки 7, которые образуют камеры давления 8–11. Каждая из данных камер связана



с полостями 12–15 распределителя 16. Внутри распределителя установлен золотник 17 с возможностью вращения. В нем находятся каналы 18, связанные через пневмоклапаны 19–20 и фильтр влагоотделителя 23 с источником сжатого воздуха.

При вращении в камере детали типа кулачка с некоторой постоянной скоростью обрабатывающая среда внутри окружности радиуса R находится в разрыхленном состоянии, а расположенная снаружи – в уплотненном (Там же). Исходя из того, что основное абразивное воздействие на деталь оказывается уплотненной обрабатывающей средой, для обеспечения всесторонней обработки поверхности кулачка необходимо при вращении детали осуществлять разрушение уплотненного слоя таким образом, чтобы обеспечивалось безотрывное обтекание им поверхности кулачка.

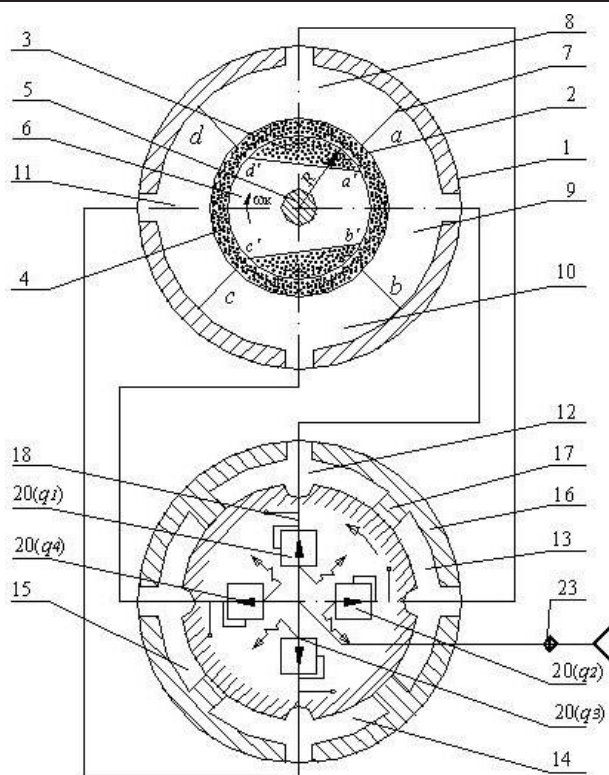
Проведенные экспериментальные исследования показали, что такого разрушения не происходит при приложении к эластичной оболочке камеры равномерного давления, достаточного для шаржирования поверхности кулачка абразивными зернами [5–7]. Это объясняется определенной инертной прочностью уплотненного абразивного слоя, который представляет собой цилиндр, испытывающий всестороннее сжатие. Если давление по периметру эластичной оболочки приложить ступенчато (неравномерно), то для разрушения уплотненного абразивного цилиндра потребуется давление в несколько раз меньшего равномерного. В этом случае безотрывное обтекание уплотненной обрабатывающей средой поверхности кулачка может быть обеспечено при давлении, величина которого недостаточна для шаржирования

детали абразивными частицами. При этом минимальная величина давления на каком-либо участке эластичной оболочки должна быть достаточной для оказания абразивного воздействия на какой-либо участок поверхности кулачка, а максимальная величина давления – для эффективного разрушения уплотненного слоя при приближении к этому участку. Кроме того, максимальная величина давления должна быть недостаточной для шаржирования абразивных зерен в поверхность детали.

Недостатком данного способа обработки является то, что минимальное давление обеспечивает абразивное воздействие на деталь в основном только на участках a^1v^1 и c^1d^1 , а максимальное – на всех участках, причем более интенсивное – на a^1v^1 и c^1d^1 . Это ведет к неравномерному снятию материала с поверхности.

Устранить данный недостаток можно путем синхронизации положений участков вращающегося кулачка относительно эластичной оболочки и положений ступени давления, прикладываемого к ней. В этом случае давление также «вращается» относительно оболочки; минимальное давление оказывает абразивное воздействие в основном только на участки a^1v^1 и c^1d^1 , а максимальное – на v^1c^1 и d^1a^1 , что повышает равномерность обработки.

Если форма детали позволяет выделить на ней характерные участки (например, a^1v^1 , v^1c^1 , c^1d^1 и d^1a^1), то подбирая давления q_1 , q_2 , q_3 и q_4 на участках av , vc , cd и da эластичной оболочки таким образом, чтобы достижение требуемой шероховатости поверхности кулачка на всех участках обеспечивалось за одинаковый промежуток времени, можно дополнительно повысить точность обработки.



Р и с. 1. Схема устройства для обработки деталей типа дисков и кулачков

F i g. 1. Scheme of device for treatment of details of type of disks and fists

Для практической реализации данного способа обработки по периметру эластичной оболочки было расположено несколько камер давления, герметично связанных с оболочкой.

В каждую камеру подают давление соответствующей величины, что обеспечивает формирование ступеней давления по периметру эластичной оболочки.

С целью синхронизации положения характерных участков кулачка и давления, прикладываемого к соответствующему количеству участков эластичной оболочки, устройство было снабжено распределителем, который кинематически связан с оправкой для закрепления детали. При передаточном отношении, равном единице, это позволяет поддерживать на каждом характерном участке детали ($a'e'$, $b'c'$,

$c'd'$, $d'a'$) постоянное давление, равное q_1 , q_2 , q_3 , q_4 соответственно.

Обработку осуществляют до получения на одном из характерных участков кулачка требуемой шероховатости поверхности. После этого давление, соответствующее данному характерному участку, оставляют без изменения, а давление на других участках увеличивают путем регулировки соответствующих пневмоклапанов.

Для полирования использовалась обрабатывающая среда, состоящая из шлифовального порошка № 10 марки 25А зернистостью $Z = 10$ (7 частей) и 1–2%-ной водной эмульсии Na_3PO_4 (1 часть).

Результаты исследования

Реализация способа обработки кулачков распредвала дизеля из стали 18Х2Н4МА с твердостью 57–63 HRC



и исходной шероховатостью $R_a = 0,8$ мкм показала, что при угловой скорости вращения кулачка $w_k = 7$ рад/с (w_k была получена экспериментально) давление P , настроенное с помощью редукционных клапанов по участкам $(a^1 e^1)q_1; (d^1 a^1)q_2; (c^1 d^1)q_3$ и $(e^1 c^1)q_4$ изменялось в диапазоне 0,125; 0,25; 0,125 и 0,25 МПа [8–10].

После полирования шероховатость поверхности находилась в пределах $R_a = 0,08–0,05$ мкм. Геометрическая точность оставалась в пределах допустимого; продолжительность обработки составила 3–4 мин.

Таким образом, при использовании сравнительно невысокого давления обеспечивается всесторонняя обработка кулачков, что позволяет в значительной степени уменьшить процесс шаржирования частиц в поверхность детали. При использовании распределителя повышается точность обработки путем получения требуемой шероховатости одновременно на всех участках кулачка.

Предложенный способ обработки можно рекомендовать для широкого диапазона деталей из разных материалов типа дисков и кулачков.

Исследования показали, что возможна обработка деталей типа плоских кулачков, эксцентриков, при которой обрабатывающей среде и деталям сообщают планетарное вращение; при этом обрабатывающую среду уплотняют [11–12]. Межцентровое расстояние между осями вращения детали и ротора выбирают больше максимальной величины отклонения от круглости детали; при этом подачу вокруг собственной оси вращения детали определяют по формуле:

$$S \leq f \times V \times R / [2p \times (A + R)],$$

где f – центральный угол минимального дефектного участка детали (под дефектными понимаются участки

поверхности детали, которые не обрабатываются при ее вращении вокруг собственной оси); V – скорость резания, м/с; R – радиус вращения детали, $10^{-3} \times \text{м}$; A – межцентровое расстояние между осями вращения детали и ротора, $10^{-3} \times \text{м}$.

С целью повышения качества обработки деталей типа кулачков им сообщают относительное планетарное вращение ≤ 10 рад/с.

Уплотненный абразивный слой обладает определенной инерционностью. При его взаимодействии с поверхностью детали с отклонениями от круглости в первую очередь обрабатываются участки поверхности максимального диаметра, а участки поверхности минимального диаметра – настолько, насколько позволяет инерционность уплотненного абразивного слоя. Чтобы произвести обработку всей поверхности такой детали, необходимо обеспечить контакт этой поверхности с уплотненной абразивной средой с учетом ее инерционности.

Сообщение деталям планетарного вращения (при условии, что величину межцентрового расстояния между осями вращения детали и ротора выбирают больше максимальной величины отклонения от круглости детали) обеспечивает возможность взаимодействия всех участков детали с уплотненной абразивной средой. Однако при быстром вращении детали вокруг собственной оси этого недостаточно для того, чтобы гарантировать полную обработку поверхности, поскольку обрабатывающая среда обладает определенной инерционностью и при быстром взаимодействии с поверхностью детали обеспечивает контакт с теми ее участками, отклонения от круглости которых не превышают определенной величины. Для того чтобы исключить данное обстоятельство, необходимо ограничить величину угловой скорости вращения детали вокруг собственной оси.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что стабильное протекание процесса полирования обеспечивается при условии, что участок поверхности детали с отклонениями от круглости имеет возможность контактировать с уплотненной абразивной средой минимум в течение времени, необходимого для полного поворота детали вокруг центральной оси вращения ротора. За это время при соотношении угловых скоростей ротора (ω_2) и детали (ω_1) в диапазоне $\omega_2 \equiv (3,0-3,5) \cdot \omega_1$ уплотненная абразивная среда успевает среагировать на изменение формы профиля детали [13–15].

При обработке деталей типа кулачков с большой угловой скоростью вращения деталей вокруг центральной оси ротора (т. е. скоростью полирования) процесс взаимодействия остальных участков поверхности с уплотненной абразивной средой носит ударный характер. В результате на этих участках формируется большая, по сравнению с другими участками, шероховатость, т. е. качество обработки снижается.

Экспериментальные исследования показали, что ударный характер взаимодействия поверхности кулачка с уплотненной абразивной средой не проявляется при угловой скорости его вращения вокруг центральной оси ротора ≤ 10 рад/с.

На рис. 2 приведена схема устройства с планетарным вращением обрабатываемых деталей.

Обработка деталей осуществляется следующим образом. Сначала проверяется выполнение условия: межцентровое расстояние A между осями вращения роторов и оправки для закрепления детали должно быть больше максимальной величины отклонения от круглости обрабатываемой детали при ее вращении на оправке.

Для заданного материала детали с учетом ее термообработки выбирается скорость резания (полирования)

V , в зависимости от которой определяется угловая скорость вращения детали вокруг центральной оси ротора $\omega_2 = V/(A + R)$. Для качественной обработки деталей угловая скорость корректируется в сторону уменьшения, если ее расчетное значение > 15 рад/с. После этого, используя величину центрального угла минимального, дефектного участка обрабатываемой детали f определяют величину угловой скорости вращения детали вокруг собственной оси по формуле $\omega_1 \leq f \cdot V \cdot R / [2\pi \cdot (A + R)]$.

Таким образом, по определенным угловым скоростям вращения детали ω_1 и ω_2 настраивают планетарный механизм устройства для камерного полирования (рис. 2), после этого деталь 3 закрепляют на оправке 2 и ротор 1 опускают в абразивную среду 4; сообщают вращение детали скоростью ω_1 , а ротору – ω_2 . В полость камеры 5 подают необходимое давление P сжатого воздуха, который, воздействуя на эластичную оболочку 6, уплотняет абразивную среду, в результате чего осуществляется обработка детали.

Кроме этого, была произведена реализация способа обработки кулачков из стали 18Х2Н4МА с твердостью 57–63 HRC и исходной шероховатостью поверхности $R_a = 0,8$ мкм [14]. Максимальная величина отклонения от круглости детали при ее вращении составила 0,008 мм; центральный угол минимального дефектного участка кулачка $f = 2,356$ рад; максимальный радиус вращения детали вокруг собственной оси $R = 0,045$ м.

Обработка производилась в течение 4 мин при давлении в камере $P = 0,075$ МПа. Рекомендуемые значения подачи S вокруг собственной оси вращения детали были определены для указанных исходных параметров и при следующих значениях скорости резания:



$$V_1 = 1,815 \text{ м/с}; V_2 = 1,32 \text{ м/с}; V_3 = 0,924 \text{ м/с}; V_4 = 0,66 \text{ м/с};$$

$$V_5 = V_6 = V_7 = V_8 = V_9 = V_{10} = V_{11} = 0,462 \text{ м/с}.$$

$$S_1 = 2,356 \times 0,045 \times 1,815 / [2 \times 3,14(0,021 + 0,045)] = 0,464 \text{ м/с};$$

$$S_2 = 2,356 \times 0,045 \times 1,32 / [2 \times 3,14(0,021 + 0,045)] = 0,337 \text{ м/с};$$

$$S_3 = 2,356 \times 0,045 \times 0,924 / [2 \times 3,14(0,021 + 0,045)] = 0,236 \text{ м/с};$$

$$S_4 = 2,356 \times 0,045 \times 0,66 / [2 \times 3,14(0,021 + 0,045)] = 0,169 \text{ м/с};$$

$$S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 2,356 \times 0,045 \times 0,462 / [2 \times 3,14(0,021 + 0,045)] = 0,118 \text{ м/с};$$

$$S_{11} = 2,356 \times 0,045 \times 0,462 / [(2 \times 3,14 \times 0,045)] = 0,337 \text{ м/с}.$$

Переведем линейную скорость вращения в угловую скорость вращения детали вокруг центральной оси ротора: $\omega_2 = V/(A + R)$, а подачу – в угловую скорость вращения детали вокруг собственной оси: $\omega_1 = S/R$.

$$(\omega_2)_1 = 1,815 / (0,021 + 0,045) = 27,5 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_2)_2 = 1,32 / (0,021 + 0,045) = 20 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_2)_3 = 0,924 / (0,021 + 0,045) = 14 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_2)_4 = 0,66 / (0,021 + 0,045) = 10 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_2)_5 = (\omega_2)_6 = (\omega_2)_7 = (\omega_2)_8 = (\omega_2)_9 = (\omega_2)_{10} = (\omega_2)_{11} = 0,462 / (0,021 + 0,045) = 7 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_1 = 0,464 / 0,045 = 10,3 \text{ рад/с, примем } (\omega_1)_1 = 10 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_2 = 0,337 / 0,045 = 7,49 \text{ рад/с, примем } (\omega_1)_2 = 7 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_3 = 0,236 / 0,045 = 5,24 \text{ рад/с, примем } (\omega_1)_3 = 5 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_4 = 0,169 / 0,045 = 3,76 \text{ рад/с, примем } (\omega_1)_4 = 3 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_5 = (\omega_1)_6 = (\omega_1)_7 = (\omega_1)_8 = (\omega_1)_9 = (\omega_1)_{10} = 0,118 / 0,045 = 2,62 \text{ рад/с,}$$

$$\text{примем } (\omega_1)_5 = 2 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_6 = 10 \text{ рад/с};$$

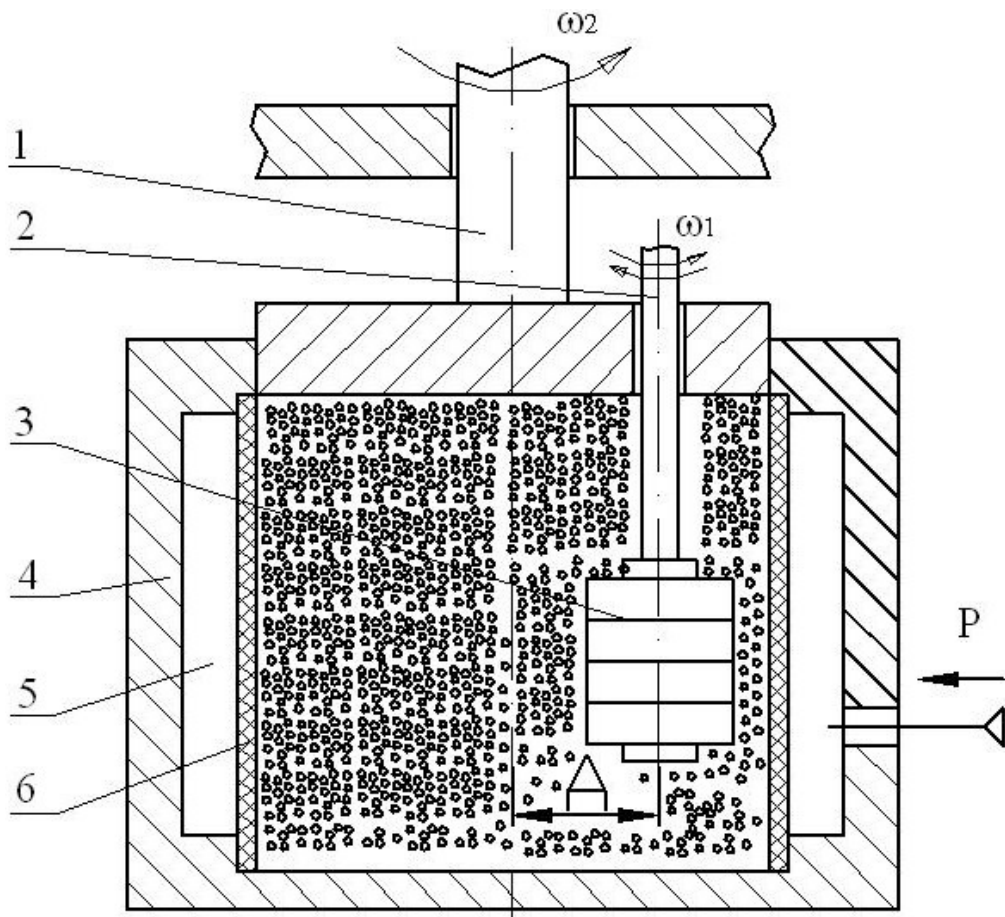
$$(\omega_1)_7 = 20 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_8 = 30 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_9 = 40 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_{10} = 50 \text{ рад/с};$$

$$(\omega_1)_{11} = 0,173 / 0,045 = 3,85 \text{ рад/с, примем } (\omega_1)_{11} = 7 \text{ рад/с}.$$



Р и с. 2. Схема обработки деталей камерным способом с планетарным вращением деталей в уплотненной обрабатывающей среде

F i g. 2. Vitrol-chamber processing scheme with the planetary rotation of details in a close-settled processing environment

Для сравнения полирование производилось при различных соотношениях угловых скоростей вращения детали вокруг собственной оси ω_1 и центральной оси ротора ω_2 при межцентровом расстоянии $A = 0,021$ м, а также при $A = 0$.

Использовавшиеся режимы обработки и выходные параметры процесса приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в примерах 1–5 угловая скорость вращения

деталей вокруг собственной оси ω_1 была выбрана в соответствии с рекомендациями разработанного способа, а вокруг оси ротора ω_2 – ограничена по величине (4–5). В примерах 6–10 угловая скорость вращения деталей вокруг собственной оси была выбрана большей по сравнению с угловой скоростью, рекомендуемой в источнике [2]. В примере 11 деталь обрабатывалась при вращении только вокруг собственной оси.



Таблица 1

Table 1

Режимные и выходные параметры процесса обработки

Regime and output parameters of processing

№	ω_1 , рад/с / ω_1 , rads/s	ω_2 , рад/с / ω_2 , rads/s	A, м / A, m	Диапазон R_a , мкм / Range of R_a , мкм			Качество поверхности / Quality surfaces
				Необработанная поверхность / Untilled surface		Обработанная поверхность / Treat surface	
				Максимальная / Maximal		Минимальная / Minimum	
1	10	27,5	0,021	–	1,65	0,08	Ухудшилось, поверх- ность неоднородная / Deteriorated, heteroge- neous surface
2	7	20	0,021	–	0,85	0,06	Поверхность неодно- родная / Heterogeneous surface
3	5	14	0,021	–	0,12	0,04	Поверхность неодно- родная / Heterogeneous surface
4	3	10	0,021	–	0,06	0,03	Поверхность однородная / Homogeneous surface
5	2	7	0,021	–	0,05	0,03	Поверхность однородная / Homogeneous surface
6	10	7	0,021	1,25	0,08	0,05	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots
7	20	7	0,021	1,25	0,08	0,05	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots
8	30	7	0,021	1,25	0,08	0,06	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots
9	40	7	0,021	1,25	0,10	0,06	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots
10	50	7	0,021	1,25	0,12	0,06	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots
11	7	7	0,000	1,25	0,06	0,04	Имеются необработан- ные участки / Untreated plots

Проведенный анализ показывает, что наиболее оптимальные результаты достигаются при обработке кулачков предлагаемым способом (примеры 4–5).

Таким образом, обеспечивается возможность обработки деталей с различным профилем образующего контура, а также повышение качества обработки деталей типа кулачков, что значительно расширяет технологические возможности способа.

Одним из недостатков данного способа обработки является то, что при взаимодействии среды с вращающейся деталью, контур сечения которой имеет отклонение от круглости, более интенсивно обрабатываются участки контура, расположенные на наибольшем расстоянии от оси вращения. Остальные участки обрабатываются менее интенсивно, поскольку давление среды на них мало или отсутствует вследствие отбрасывания абразива участками контура с наибольшим расстоянием от оси вращения. Время выравнивания давления (заполнение 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. Сообщение детали переносного вращения вокруг оси ротора, расстояние до которой от геометрической оси детали больше величины отклонения от круглости, обеспечивает возможность реализации данного условия. Однако при высокой угловой скорости детали этого недостаточно, чтобы гарантировать равномерность обработки всего контура. В этом случае на равномерность обработки начинают оказывать влияние даже незначительные отклонения контура от круглости, а инерционность абразивной среды не позволяет уменьшить время выравнивания давления до определенной вели-

чины. Следовательно, необходимо ограничить величину угловой скорости вращения ротора с деталями. Кроме того, наличие планетарного движения детали усложняет кинематику ободования и приводит к разрыхлению уплотненной абразивной среды. Вследствие этого желательно исключить переносное вращение детали вокруг оси ротора, обеспечив непрерывность контакта поверхности детали с абразивной средой иным способом.

При реализации нового способа обработки вращающейся детали также сообщают возвратно-поступательное движение относительно статически уплотненной абразивной среды, а саму деталь закрепляют на самоустанавливающейся оправке с эксцентриситетом относительно оси вращения.

Из проведенных экспериментальных исследований следует, что стабильное протекание процесса полирования обеспечивается при условии непрерывного контактирования абразивной среды и участка контура детали с отклонением от круглости в течение времени, необходимого для оборота вокруг ротора собственной оси, или большего времени. Проведенные эксперименты на деталях с большим отклонением от круглости (детали типа кулачков) показали, что ударный характер взаимодействия их поверхностей с уплотненной абразивной средой, имеющий место в предшествующем способе обработки, не проявляется при ограничении угловой скорости ротора до 10 рад/с и применения самоустанавливающейся эксцентриковой оправки. Таким образом, можно обойтись без планетарного движения детали, в результате которого, согласно экспериментальным данным, в некоторых случаях, особенно при больших отклонениях деталей от круглости, происходит разрыхление абразивной среды и нарушение безотрывного обтекания ею поверхности кулачка.



С целью повышения качества обработки рабочей камере сообщается вертикальное возвратно-поступательное перемещение со скоростью $V_n = (0,1 - 0,5) \times 10^{-3}$ м/с с помощью специальных кулачковых устройств.

Реализация данного способа производилась при обработке кулачков из стали 18Х2Н4МА с твердостью 57–63 HRC и исходной шероховатостью поверхности $R_a = 0,8$ мкм. Максимальная величина отклонения от круглости детали при

ее вращении составила 0,008 м; центральный угол минимального дефектного участка кулачка при обработке по прототипу $f = 2,356$ рад; максимальный радиус вращения детали вокруг собственной оси $R = 0,045$ м; эксцентриситет наружного контура относительно оси центрального отверстия – 21 мм.

Обработка производилась в течение 3 мин при давлении в камере $P = 0,075$ МПа и различных скоростях вращения детали (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Результаты обработки данных при различных скоростях вращения детали

Results of processing of data at different speeds of rotation of detail

№	ω_1 , рад/с / ω_1 , rads/s	ε , мм / ε , mm	Шероховатость поверхности (R_a , мкм) / Roughness of surface (Ra , мкм)		Качество поверхности / Surface quality	
			Необра- ботанная поверхность / Untilled surface	Обработанная поверхность / Treat surface		
				Макси- мальная / Maximal		Мини- мальная / Minimum
1	27	21	—	1,60	0,07	Поверхность неоднородная / Heterogeneous surface
2	20	21	—	0,90	0,06	Поверхность неоднородная / Heterogeneous surface
3	14	21	—	0,10	0,04	Поверхность неоднородная / Heterogeneous surface
4	10	21	—	0,05	0,03	Поверхность однородная / Homogeneous surface
5	7	21	—	0,05	0,03	Поверхность однородная / Homogeneous surface
6	5	21	1,25	0,12	0,06	Имеются необработанные участки / Untreated plots
7	3	0	1,25	0,08	0,05	Имеются необработанные участки / Untreated plots

В примерах 4–5 скорость вращения оправки была выбрана в соответствии с рекомендациями разработанного способа; в примерах 1–3 – недопустимо большая. Линейная скорость V_n возвратно-поступательного перемещения камеры находилась в рекомендуемом диапазоне значений $V_n = (0,1–0,5) \times 10^{-3}$ м/с.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективно обработка происходила в примерах 4–5.

Обсуждение и заключения

В рассмотренном способе обработки уплотненный абразивный слой обладает определенной упругостью и облегает профиль погруженной в него детали, точно копируя его форму. В этом случае обеспечивается практически одинаковое давление на все участки профильной поверхности и происходит их равномерная обработка. Упругую абразивную среду можно рассматривать как изотропную, поскольку что ее абразивные частицы ориентированы случайным образом [14–15].

Необходимо также отметить, что для данного способа обработки силы инерции равны нулю, поскольку давление абразивного слоя на поверхность детали определяется давлением сжатого воздуха на обрабатываемую среду через эластичную оболочку.

В отличие от методов полирования, в которых формирование уплотненного абразивного слоя происходит за счет сил инерции, в предлагаемом способе обработки уплотненная абразивная масса формируется статически и прижимается непосредственно к обрабатываемой поверхности.

Таким образом, необходимо отметить, что применение данного способа обработки деталей обеспечивает повышение производительности и качества полирования.

Уплотненный абразивный слой выполняет роль режущего инструмента, который в данном случае формируется автоматически из свободных абразивных частиц, находящихся в составе су-

спензии, путем уплотнения их в слой или эластичный брусочек. Как было сказано выше, инструмент профилируется в самом начале финишной операции технологического процесса в результате контактирования уплотняющихся абразивных частиц и обрабатываемой поверхности.

В уплотненной абразивной среде, в отличие от шлифовальных кругов, между зернами отсутствует жесткая связь. Однако благодаря сильным фрикционным связям абразивная среда обладает достаточно высокой прочностью и жесткостью и является целостным инструментом.

Выше было отмечено, что в свободном состоянии зерна абразивной среды обладают достаточно хорошей подвижностью, что позволяет им копировать форму обрабатываемой детали. Поэтому 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 применение сложных операций по профилированию и правке режущих инструментов.

Основу режущего инструмента составляют абразивные порошки, которые могут быть получены из различных абразивных материалов, с твердостью, превышающей твердость обрабатываемой детали (за исключением метода магнитно-абразивного полирования, где требуется применение специальных ферромагнитных порошков). Таким образом, наиболее целесообразным является применение материалов дешевых, малodeфицитных и в то же время обладающих значительной абразивной способностью.

Наибольшее распространение получил электрокорунд нормальный марок 14А, 15А, а также электрокорунд белый марок 24А, 25А с зернистостью от 125 до М7 [14–15].



Абразивное зерно, находящееся в обрабатывающей среде, при контакте с обрабатываемой поверхностью выступает в роли отдельного режущего элемента. Поэтому режущие свойства инструмента в целом во многом зависят от характеристик отдельных зерен.

Известно, что независимо от зернистости абразива, выступы микро рельефа 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 [7; 14]. Эти размеры на порядок ниже размеров режущих элементов выступов микропрофиля абразивного зерна при шлифовании и полировании, поэтому обработка деталей в уплотненной абразивной среде является более тонким видом абразивной обработки и обеспечивает получение меньшей шероховатости поверхности.

При такой обработке деталей зерна в абразивной среде в течение длительного времени сохраняют свою режущую способность; микровыступы зерен достаточно быстро разрушаются, образуя при этом новые выступы, которые также являются режущими элементами. Кроме этого, в процессе обработки происходит частичная заме-

на абразивных зерен, которые контактируют с поверхностью детали; также возможен поворот зерна новой гранью к обрабатываемой поверхности.

Благодаря этим причинам абразивные зерна работают как бы в режиме самозатачивания и поэтому имеют высокую режущую способность. Это подтверждается экспериментальными исследованиями зависимости снятия металла от продолжительности обработки: результаты показывают, что данная зависимость в течение длительного времени сохраняет практически линейный характер, который свидетельствует о неизменной режущей способности абразивных зерен.

Кроме того, необходимо отметить, что 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 зерно будет не скользить, а перекашиваться по поверхности детали, не удаляя при этом микростружку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. с. 1579740 СССР, МКИ В24В 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А. Н. Мартынов, В. А. Скрябин, В. М. Федосеев. Оpubл. 23.07.90, Бюл. № 27.
2. А. с. 1678581 СССР, МКИ В24В 31/116. Способ абразивной обработки изделий / А. Н. Мартынов, В. А. Скрябин, В. А. Лемин, В. М. Федосеев, Г. В. Бабаджан. Оpubл. 23.09.91, Бюл. № 35.
3. Патент 1803308 (РФ), МКИ: В24В 31/104. Способ обработки деталей / В. А. Скрябин. Оpubл. 23.03.93, Бюл. №11.
4. **Скрябин В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом : монография. Пенза : Изд-во ПБАИУ, 1992. 120 с.
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 сложно-профильных деталей уплотненным мелкодисперсным абразивом // Технология металлов. 2003. № 1. С. 19–24. URL: elibrary.ru/item.asp?id=20935710
7. **Мартынов А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами : монография. Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.
8. **Корнараки В. В., Доманский Р. А.** Зависимость коэффициента трения и угла естественного откоса некоторых шлифовальных материалов от влажности. Абразивы: экспресс-информация. М. : НИИАШ, 1981. № 9. С. 16–19.

9. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Изд-во АН СССР, 1954. 648 с.
10. Голушкевич С. С. Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды. Л. ; М. : Гостехиздат, 1948. 148 с.
11. Тимошенко С. П., Гудьер Д. Ж. Теория упругости. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1985. 576 с.
12. 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. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810>
13. Скрябин В. А., Свечникова Г. И. Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22985053>
14. Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г. Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами : монография. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 240 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25306901>
15. Скрябин В. А. Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25, № 4. С. 72–89. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-en/40-15-4/237-10-15507-vmu-025-201504-6>

Поступила 04.08.2016; принята к публикации 12.10.2016; опубликована онлайн 30.12.2016

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения факультета машиностроения и транспорта ФГБОУ ВО «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

REFERENCES

1. Martynov AN, Skryabin VA, Fedoseyev VM. A. s. 1579740 SSSR, MKI B24B 31/08. Sposob abrazivnoy obrabotki detaley [Certificate of authorship USSR 1579740 the USSR, MKI B24B 31/08. Method of abrasive treatment of details]. Publ. 23.07.90, bull. № 27. (In Russ.)
2. Martynov VA. Skryabin BM, Lemin VA, Fedoseyev VM, Babadzhani GV. A. s. 1678581 СССР, МКИ В24В 31/116. Sposob abrazivnoy obrabotki izdeliy [Certificate of authorship USSR 1678581, MKI B24B 31/116. Method abrasive processing]. Publ. 23.09.91, bull. № 35. (In Russ.)
3. Skryabin VA. Patent 1803308 (RF), MKI: B24B 31/104. Sposob obrabotki detaley [Patent 1803308 Russian Federation, MKI: B24B 31/104. Method of treatment of details]. Publ. 23.03.93, bull. № 11. (In Russ.)
4. Skryabin VA. Osnovy protsessov submikrorezaniya pri obrabotke detaley nezakreplennym abrazivom [Bases of process of submicrometer at treatment of details an unsupported abrasive]. Penza: PVAIU Publ.; 1992. (In Russ.)
5. Skryabin VA. Novyy metod finishnoy obrabotki detaley svobodnymi melkodispersnymi sredami [New method of finish treatment of details of free the fine environments]. *Mashinostroitel* = Mechanician. 2000; 2:16-17. (In Russ.)
6. Skryabin VA, Shirladze AG, Rybakov YuV. Kamernyy sposob obrabotki slozhnoprofilnykh detaley uplotnennym melkodispersnym abrazivom [Chamber method of handling complex profile parts compacted particulate abrasive]. *Tekhnologiya metallov* = Metal Technology. 2003; 1:19-24. Available from: elibrary.ru/item.asp?id=20935710 (In Russ.)
7. Martynov AN Osnovy metoda obrabotki detaley svobodnym abrazivom, uplotnennym inertsiionnymi silami [Bases of method of treatment of details free abrasive close-settled inertia forces]. Saratov: Saratov Technical State University; 1981. (In Russ.)
8. Kornaraki VV, Domanskiy RA. Zavisimost koeffitsienta treniya i ugla yestestvennogo otkosa nekotorykh shlifovalnykh materialov ot vlazhnosti [Dependence of coefficient of friction and corner of natural



slope of some polishing materials on humidity]. *Abrazivny: ekspress-informatsiya* = Abrasives: Express Information. 1981; 9:16-19. (In Russ.)

9. Mushelishvili NI. Nekotoryye osnovnyye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic tasks of mathematical theory of resiliency]. Moscow: AS USSR Publ., 1954. (In Russ.)

10. Golushkevich SS. Ploskaya zadacha teorii predelnogo ravnovesiya sypuchey sredy [Flat task of theory of maximum equilibrium of friable environment]. Leningrad-Moscow: Gostekhizdat; 1948. (In Russ.)

11. Timoshenko SP, Gudyer DG. Teoriya uprugosti [Theory of resiliency]. Moscow: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.)

12. Skryabin VA. Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov i usloviy finishnoy abrazivnoy obrabotki na sherokhovatost obrabatyvaemykh poverkhnostey detaley s razlichnym profilem [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* = Mechanician. 2011; 3:18-22. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810> (In Russ.)

13. Skryabin VA, Svechnikova GI. 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* = Mechanician. 2011; 4:18-22. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22985053> (In Russ.)

14. Skryabin VA, Shirladze AG. Tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva obrabotki slozhno-profilnykh detaley uplotnennymi melkodispersnymi sredami [The Technological providing of quality of treatment of figurine details close-settled fine environment]. Staryy Oskol: Thin knowledge-based technologies; 2015. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25306901> (In Russ.)

15. Skryabin VA. Features of intricate-shaped parts by close-settled fine abrasive media. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2015; 4(25):72-89. Available from: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-en/40-15-4/237-10-15507-vmu-025-201504-6> (In Russ.)

Submitted 04.08.2016; revised 12.10.2016; published online 30.12.2016

About the author:

Vladimir A. Skryabin, professor of Mechanical Engineering Chair, Mechanical Engineering and Transport Faculty, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, Russia), Dr.Sci (Engineering), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru