

Международный открытый форум International open forum

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.357.74:76
doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-52-63

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СТАТИЧЕСКИ УПЛОТНЕННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ СРЕДАМИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Владимир Александрович Скрябин^{1✉}, Никита Александрович Аниськин²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ vs_51@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>

² nik.aniskin.2014@mail.ru

Аннотация

Целью исследования является получение аналитической зависимости, устанавливающей взаимосвязь режимных параметров и условий процесса финишной абразивной обработки с шероховатостью рабочих поверхностей деталей с учетом коэффициента формы изготавливаемых деталей.

Задачи, решению которых посвящена статья, заключается в теоретических и экспериментальных исследованиях влияния шероховатости обрабатываемых поверхностей на технологические режимы и условия обработки поверхностей сложнопрофильных деталей в среде статически уплотненного незакрепленного абразива, а также в разработке методики определения рациональных режимов и условий с учетом коэффициента формы обрабатываемых деталей и определение достижимого интервала шероховатости поверхностей.

Методы исследования: теоретические исследования проводились на базе основных положений технологии машиностроения, теории шлифования, теоретической механики, теории упругости и пластичности. Экспериментальные исследования проводились по стандартным методикам в производственных и лабораторных условиях с использованием аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры. Полученные данные обрабатывались с помощью средств вычислительной техники и представлялись в виде эмпирических зависимостей, удобных для практического применения.

Новизна работы заключается в получении математических зависимостей для расчета давления

статически уплотненного абразивного слоя на обрабатываемую поверхность деталей с учетом коэффициента формы.

Выводы: На основании расчетных теоретических зависимостей и проведенных экспериментальных исследований показано, что работа микрорезания выступами микрорельефа абразивных зерен примерно в 1.5...2 раза выше по сравнению с работой микрорезания вершинами абразивных зерен шлифовального круга. Это позволяет сделать вывод о том, что обработка деталей статически уплотненным незакрепленным абразивом по сравнению со шлифованием обычным шлифовальным кругом является менее энергозатратным процессом удаления материала с поверхностей обрабатываемых деталей.

В статье приведены особенности финишной обработки деталей статически уплотненными абразивными средами. Показано соотношение работы трения и микрорезания процесса обработки. Впервые рассмотрен характер контактного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью с учетом коэффициента формы и определен рациональный диапазон конечной шероховатости.

Определена роль режущих элементов частиц, влияющих на качество и производительность процесса обработки.

Ключевые слова: обработка, работа, трение, зерна, шероховатость, параметры, коэффициент, формы.

Ссылка для цитирования:

Скрябин В.А. Особенности процесса обработки статически уплотненными абразивными средами деталей типа тел вращения / В. А. Скрябин, Н. А. Аниськин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 11. – С. 52 – 63. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-52-63.

PECULIARITIES OF TURNING MACHINING WITH STATICALLY COMPACTED ABRASIVE MEDIA

Vladimir Aleksandrovich Scryabin^{1✉}, Nikita Aleksandrovich Aniskin²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ vs_51@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>

² nik.aniskin.2014@mail.ru

Abstract

The study objective is to find out an analytical dependence that correlates the operating parameters and the conditions of the finishing abrasive treatment with the roughness of the working surfaces of the parts, taking into account the shape factor of the manufactured parts.

The tasks to which the paper is devoted include theoretical and experimental studies of the effect of the treated surface roughness on the technological modes and conditions of surface treatment of complex-profile parts in the medium of statically compacted loose abrasive, as well as in the development of a methodology for determining rational modes and conditions taking into account the shape factor of the machined parts and determining the achievable range of surface roughness.

Research methods: theoretical studies are conducted on the basis of the main provisions of mechanical engineering technology, grinding theory, theoretical mechanics, theory of elasticity and plasticity. Experimental studies are carried out according to standard methods in production and laboratory conditions using certified instrumentation. The data obtained are processed using computer technology and presented in the form of empirical dependencies, convenient for practical use.

The novelty of the work is in finding mathematical dependencies for calculating the pressure of a stati-

cally compacted abrasive layer on the surface of the parts being machined, taking into account the shape factor.

Conclusions: Based on the calculated theoretical dependencies and experimental studies, it is shown that the work of micro-cutting with the microrelief of abrasive grains is approximately 1.5...2 times higher than the work of micro-cutting with the tops of abrasive grains of the grinding wheel. This allows to conclude that the machining of parts with a statically compacted loose abrasive, compared with grinding with a conventional grinding wheel, is a less energy-consuming process of removing material from the surfaces of the machined parts.

The paper presents peculiarities of finishing parts with statically compacted abrasive media. The ratio of friction work and micro-cutting of the machining is shown. The nature of the contact interaction of abrasive grains with the treated surface is considered for the first time, taking into account the shape factor, and the rational range of final roughness is defined.

The role of cutting elements of particles affecting the quality and productivity of machining is determined.

Keywords: machining, work, friction, grains, roughness, parameters, factor, shapes.

Reference for citing:

Scryabin VA, Aniskin NA. Peculiarities of turning machining with compacted abrasive media. *Transport Engineering*. 2022; 11:52-63. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-52-63.

Введение

В современном машиностроении одним из главных вопросов является обеспечение требований к шероховатости поверхностей сложнопрофильных деталей. Получение требуемой величины шероховатости обычными методами финишной абразивной обработки трудноосуществимо, а иногда практически невозможно, что объясняется значительным давлением абразивных инструментов на поверхности обрабатываемых деталей.

Из проведенных исследований и производственного опыта, широкое применение для обработки деталей подобного класса находит метод финишной обработки поверхностей деталей типа тел вращения статически уплотненными абразивными средами. Особенностью процесса изготовления является то, что процесс обработки поверхностей осуществляется не вершинами абразивных зерен, а выступами микро-профиля и субмикропрофиля поверхности частиц абразива.

Выступы микропрофиля при обработке создают величину давления на порядок меньшую, по сравнению с обычными

абразивными инструментами и тем самым формируют величину заданной шероховатости поверхностей деталей.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Повышение качества профильных поверхностей реализуется финишной обработкой деталей статически уплотненными абразивными средами в камере [1–7].

Детали 1 базируются и закрепляются на оправке 2 (рис. 1, а) и контактируют с находящейся под давлением сжатого воздуха абразивной рабочей средой 3 в камере 4. В камеру 4 помещена эластичная цилиндрическая оболочка 5, изготовленная из специальной резины. Рабочая среда сжимается при подаче на периметр оболочки сжатого воздуха и принимает форму профиля обрабатываемой детали. Обработка происходит при вращении оси с деталями со скоростью V_d . На рис. 1, б при финишной обработке плоская деталь перемещается со скоростью V_d . Режимные параметры изменяются в следующих диа-

пазонах: На рис. 1, а цилиндрические изделия 1 закрепляются на оправке 2 и помещаются в абразивную суспензию 3, находящуюся в специальном контейнере 4, в котором смонтирована цилиндрическая оболочка 5, изготовленная из специальной резины. Рабочая абразивная среда с СОТС (смазочно-охлаждающими технологическими средствами) сжимается при подаче на периметр оболочки сжатого воздуха с давлением P . Обработка происходит при вращении оси с деталями со скоростью $V_d (V_{рез})$. На рис. 1, б при обработке плоская деталь перемещается со скоростью V_d . Режимные параметры и условия обработки изменяются следующим образом: $0,26 \leq V_{рез} \leq 1,96$ м/с; $0,05 \leq P \leq 0,20$ МПа; $100 \leq HB \leq 6000$ МПа.

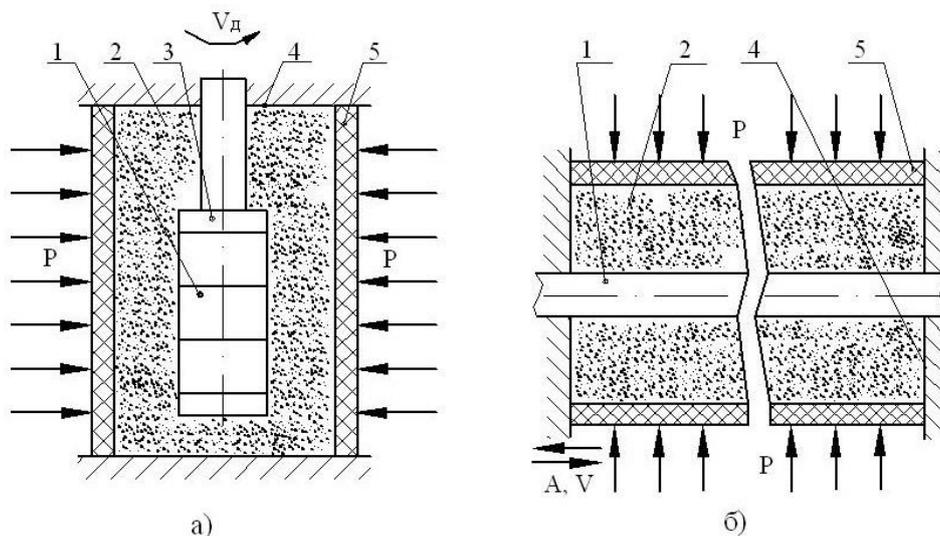


Рис. 1. Схемы процесса финишной абразивной обработки: а) обработка цилиндрических поверхностей; б) обработка плоских поверхностей 1

Fig. 1. Schemes of the finishing abrasive treatment process: а) processing of cylindrical surfaces; б) processing of flat surfaces 1

Обработка деталей в камере абразивной средой, уплотненной сжатым воздухом, с глубиной резания до 1 мкм реализуется посредством микро- и субмикровыступов поверхностей абразивных частиц (рис. 2) [1-4].

Теоретические и экспериментальные исследования процесса шлифования по-

верхностей деталей жесткими шлифовальными кругами показали, при обработке связанным абразивом, работа резания в зависимости от давления на шлифовальный круг изменяется в диапазоне 4...20 %, а работа трения (деформация металла в навалы и трение абразивного зерна о поверхность шлифовочных рисок) составля-

ет 80...90 % [6, 7].

В работах [1–3] впервые было установлено, что при вращении зерен, сравнительно малой траектории их движения в процессе микрорезания поверхности детали выступами микрорельефа абразивных зерен, малого времени контактирования с обрабатываемой поверхностью, схватывания не происходит. Так как коэффициент стружкообразования согласно исследованиям, проведенным в работах [1–4, 11] при динамической глубине внедрения до 1 мкм и небольшом на порядок меньшим давлением абразивных частиц, то можно предположить, что работа микрорезания в случае обработки поверхностей деталей неза-

крепленными абразивными зернами, также будет больше по сравнению с обычным шлифованием.

Определение удельной работы трения $A_{уд.тр}$ при микрорезании (царапании) поверхности пластины из закаленной стали У7А с шероховатостью $Ra \leq 0,012$ мкм и твердостью 60...63 HRC единичным микровыступом абразивной частицы из электрокорунда белого марки 24A125 осуществлялось на специальной экспериментальной установке, моделирующей процесс удаления материала (рис.3) со скоростью $V = 0,01$ м/с при радиальной нагрузке на зерно $P_y = 20 \cdot 10^{-2}$ Н.

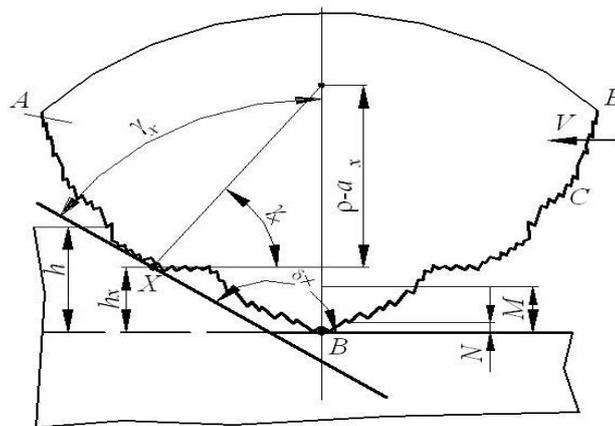


Рис. 2. Диспергирование материала поверхности детали:

M – микровыступы поверхностей частиц; N – субмикровыступы микровыступов вершин абразивных частиц; h – глубина внедрения абразивной частицы в обрабатываемую поверхность; V – скорость перемещения абразивной частицы; γ_x – передний угол зерна; δ_x – угол резания.

Fig. 2. Dispersion of the surface material of the part:

M – micro-steps of the particle surfaces; N – sub-micro-steps of the micro-steps of the tops of the abrasive particles; h – the depth of penetration of the abrasive particle into the treated surface; V – the speed of movement of the abrasive particle; γ_x – the front angle of the grain; δ_x – the cutting angle.

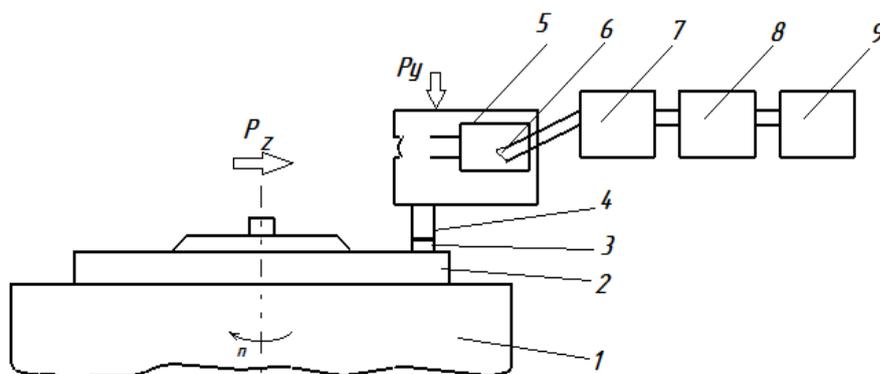


Рис. 3. Схема экспериментальной установки, моделирующей процесс удаления материала

Fig. 3. Diagram of an experimental setup simulating the process of material removal

Рабочая часть установки состоит из шпинделя 1, на котором устанавливается пластинка или диск 2 из исследуемого материала. Абразивная частица 3 закрепляется в наконечнике 4, жестко соединенным с подпружиненным корпусом головки 5, на котором наклеены тензодатчики 6. Корпус головки подпружинен для сообщения абразивному зерну некоторой подвижности с целью имитации движения частицы в уплотненном абразивном слое. Сигнал с тензодатчика поступает на усилитель 7 тензостанции 8 и показывающий прибор 9.

Результаты

Как показали экспериментальные исследования, в условиях интенсивного стружкообразования в меньшей степени происходит налипание металла на незакрепленные частицы абразива, становится незначительной пластическая деформация и уменьшается работа трения по сравнению со шлифованием жесткими абразивными кругами.

С известной степенью приближения можно предположить, что значение тан-

Установка дает возможность измерить радиальную P_y и тангенциальную P_z составляющие силы резания. Радиальная прикладывалась сверху к передней части головки, а тангенциальная составляющая определялась по показаниям прибора на основании тарировочного графика системы.

Весьма важным вопросом является также получение аналитической зависимости, устанавливающей взаимосвязь режимных параметров и условий процесса финишной абразивной обработки с шероховатостью рабочих поверхностей деталей.

генциальной силы микрорезания единичным микровыступом поверхности абразивного зерна P_{z2} равно силе трения $P_{zтр}$ при микрорезании, возникающей при втором проходе единичного абразивного зерна после удаления стружки.

При этом можно не учитывать потери на трение микростружки о поверхность абразивной частицы. Работа трения для единичного микровыступа абразивного зерна определяется как [5, 7]:

$$A_{уд.тр} = \frac{P_{z_2}}{P_z} 100\% = \frac{P_{z_2}}{P_{zп} + P_{z_2}} 100\%, \quad (1)$$

где $P_{zп}$ – сопротивление микрорезанию без учета потерь на трение.

В общем виде удельный вес работы трения в пересчете на одно режущее абра-

зивное зерно может быть определен следующим образом

$$A_{уд.тр} = \frac{P_{z_2} + P_{z_3} + \dots + P_{z_n}}{P_{zп} + P_{z_2} + \dots + P_{z_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{z_i}}{P_{zп} + \sum_{i=1}^n P_{z_i}}. \quad (2)$$

Из ранее проведенных экспериментов [1] на устройстве (рис. 3) имеем $P_{z2} = 5,3 \cdot 10^{-2}$ Н; $P_z = 7,8 \cdot 10^{-2}$ Н.

Подставив и P_z в зависимость (1), получим $A_{уд.тр} = 68\%$.

Работа микрорезания A_m определяется как:

$$A_m = (1 - A_{уд.тр}) \cdot 100\% = 32\%.$$

Увеличение работы микрорезания по сравнению со шлифованием деталей жесткими абразивными кругами по-видимому связано с возрастанием количества режущих незакрепленных частиц в уплотнен-

ном абразивном слое при обработке поверхности сложнопрофильных деталей и более хрупким характером разрушения материала при глубине внедрения микропрофиля абразивных частиц до 1 мкм, что доказано теоретически и экспериментально в работах [1, 2, 5]. Кроме того, повышение интенсивности процесса стружкообразования повышает качество процесса обработки. Особенности взаимодействия абразивных частиц с поверхностью детали связаны с формой зерен и их режущих элементов. Исследование многочисленных тене-

вых отпечатков показало, что все они моделируются в первом приближении эллипсом [1–4]. С учетом этого, а также исследований топографии абразивных зерен на электронном сканирующем микроскопе [1–4], можно отметить их сопоставимость

с эллипсоидом вращения, на поверхности которого в виде прерывистых кольцевых выступов находится микропрофиль с находящимся на нем субмикропрофилем (рис. 4).

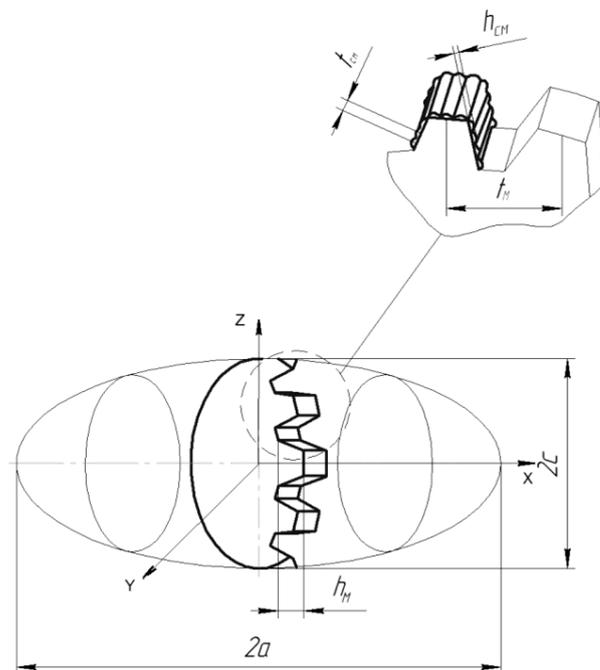


Рис. 4. Модель абразивного зерна: a и c – полуоси эллипсоида вращения, h_m – высота выступа микро рельефа, h_{cm} – высота выступа субмикро рельефа, t_m – средний шаг выступов микро рельефа, t_{cm} – средний шаг выступов субмикро рельефа

Fig. 4. Abrasive grain model: a and c are the semi-axes of the ellipsoid of rotation, h_m is the height of the microrelief projection, h_{cm} is the height of the submicrorelief projection, t_m is the average pitch of the microrelief projections, t_{cm} is the average pitch of the submicrorelief projections

В соответствии с работами [1-5] $h_{дин} = h_{ст} \cdot K_{дин}$, где $h_{ст}$ – глубина статического внедрения индентора (абразивной частицы) в материал детали; $K_{дин}$ – коэффициент динамичности, который определяется следующим образом:

$$K_{дин} = 2\sqrt{1 + f_d^2}, \quad (1)$$

где f_d – коэффициент трения скольжения абразивной частицы по поверхности детали.

Согласно [4] имеем:

$$f_d = \frac{0,88P_2^{1/2}}{Z(\pi HB)^{1/2}}, \quad (2)$$

где P_2 – сила, необходимая для формирования требуемой шероховатости поверхности.

Согласно [1-4] зависимости для определения глубины статического внедрения частицы абразива в обрабатываемую поверхность детали, используя которую совместно с зависимостью между R_a и R_z , ($R_z \cong 5R_a$), можно записать:

$$\frac{5R_a}{2\sqrt{1 + 0,88^2(P_2 / \pi HBZ^2)}} = \frac{1,3P^{2/3} K_y^{2/3}}{HB^{2/3}} \cdot \frac{a^{2/3} c}{(c + a - 0,67\sqrt{ca})^{2/3}}. \quad (3)$$

Данная зависимость справедлива при обработке гладких и ступенчатых цилиндрических поверхностей деталей типа тел вращения. При абразивной обработке по-

дических поверхностей деталей типа тел вращения. При абразивной обработке по-

верхностей более сложного профиля, например кулачков распределительных валов, в формулу вводится коэффициент сложности формы деталей типа тел вращения K_F . Этот коэффициент равен отношению объемов деталей сложной формы и деталей простейшей геометрической формы (цилиндра, шара и т.д.). Например, объем тела, получаемого вращением криволинейной трапеции вокруг оси OX (рис. 5), определяется по следующей зависимости:

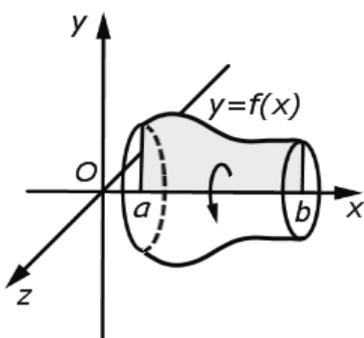


Рис. 5. Деталь типа тела вращения в координатных плоскостях
Fig. 5. Detail of the body type of rotation in coordinate planes

$$V = \pi \int_a^b f^2(x) dx \quad (4)$$

В этом случае $K_F = \frac{V}{V_1}$, где V_1 – объем цилиндра, вписанного в данную фигуру. $V_1 = \pi R^2 H$.

При обработке деталей статически уплотненным абразивным материалом,

$$\left(\frac{P_2}{\pi a c K_y} \right)^{2/3} = \left(\frac{HB}{K_y} \right)^{2/3} \left(\frac{5R_a}{1,3} \right) \frac{[(c+a-0,67\sqrt{ca})^{2/3}] K_F}{a^{2/3} c 2\sqrt{1+0,88^2 (P_2 / \pi HB Z^2)}}. \quad (5)$$

В этом случае уравнение для определения силы P_2 определяется как:

$$P_2 = \frac{HB}{K_y} \left(\frac{5R_a}{1,3} \right)^{3/2} \frac{(c+a-0,67\sqrt{ca})}{a c^{3/2}} \cdot \frac{\pi a c K_y K_F}{\left[2\sqrt{1+0,7744 P_2 / (\pi HB \cdot Z^2)} \right]^{3/2}}, \quad (6)$$

где a и c – большая и малая полуоси эллипсоида вращения, являющегося графической моделью абразивных частиц; K_y – коэффициент, учитывающий наличие свободных участков между абразивными зер-

разность между поверхностями описанной и вписанной фигур не превышает 3-х...4-х миллиметров на радиус для достижения примерного равенства давлений уплотненного слоя абразива до определенного значения параметра шероховатости.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования исследования коэффициента формы показали, что его величина находится в диапазоне 1,1...1,2, что дает погрешность 10...20 % при расчете давления для различных форм сложных деталей. Вышеуказанная погрешность влияет на получение заданной величины шероховатости поверхности и точностных параметров (допусков формы и расположения). Поэтому и справедлива лишь для получения конечной шероховатости в диапазоне $R_a \leq 1,6...0,8$ мкм для деталей из стали и чугуна.

Это очевидно связано с тем, что при большей величине шероховатости поверхности неравномерность давления уплотненного абразивного слоя вызывает дополнительные вибрации при обработке, особенно для деталей из сплавов алюминия.

Учитывая, что давление абразивной среды на поверхность обрабатываемой детали $P = \frac{P_2}{\pi a c K_y}$ является одним из основных режимных параметров после ряда математических преобразований, имеем:

нами (плотность упаковки), $K_y \cong 1,3$ [1–4]; HB – твердость обрабатываемого материала детали; Z – зернистость абразивной среды.

Выражение $\frac{0,7744P_2}{(\pi HBZ^2)}$ является величиной третьего порядка малости и поэтому, в

$$P_2 = \frac{\pi HB}{2\sqrt{C}} \left(\frac{5R_a}{1,3} \right)^{3/2} (c + a - 0,67\sqrt{ca}) K_F. \quad (7)$$

По определенному значению P_2 находят давление, которое необходимо подвести к эластичной оболочке камерного устройства. Согласно теоретическим исследованиям [11] после ряда преобразований будем иметь:

$$P = \left[\frac{P_2}{1 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 + \{(1+\nu)/(1-\nu)\}R_1^2}} \right], \quad (8)$$

где R_1 – радиус уплотненного абразивного слоя, контактирующего с эластичной оболочкой; R_2 – радиус детали; ν – коэффициент Пуассона обрабатываемой среды (величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению).

Задача по определению режимных параметров, в частности давления уплотненного абразивного слоя, была решена

дальнейших расчетах им можно пренебречь.

Сила P_2 находится следующим образом:

применительно к финишной обработке статически уплотненными мелкодисперсными средами рабочих поверхностей колеса турбины турбокомпрессора дизеля (рис. 5), имеющих конечную шероховатость $R_a = 1,6$ мкм при исходной шероховатости $R_a = 2,5 \dots 3,2$ мкм. В этом случае динамическая глубина внедрения единичных выступов микрорельефа поверхности абразивных зерен не должна превышать 0,8 мкм, то есть $h_{\text{дин}} \leq 0,8$ мкм ($R_a = 0,2 \cdot R_z$; $R_z = h_{\text{дин}}$). Исходные данные: шлифзерно карбида кремния зеленого марки 63С зернистостью 50 с параметрами зерна $a = 500$ мкм = 0,5 мм; $c = 283$ мкм = 0,283 мм. Материал детали – жаропрочный литейный труднообрабатываемый сплав марки ЖС6К твердостью 40...45 HRC (350 HB). Коэффициент ν в соответствии с исследованиями [8–10] для абразивной среды принят в диапазоне 0,2...0,25.



Рис. 5. Опытный образец детали (колесо турбины), использованный при проведении исследований

Fig.5. The prototype of the part (turbine wheel) used in the research

Установка для обработки колеса турбины турбокомпрессора дизеля [8–10,12,13] жестко закреплялась на столе вертикально-сверлильного или радиально-

сверлильного станка (рис. 6). Деталь 4 с радиусом R , подлежащая обработке, крепилась на оправке 5 с эксцентриситетом E и устанавливалась на вал ротора 8. Пере-

мещение оси оправки относительно оси ротора обеспечивается шарнирным поводком 6 с шариками. Ротор помещали в камеру 2 с эластичными стенками 3, заполненную абразивной средой А, и сообщали ему относительно оси вращения детали

скорость резания $V_1 = (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$ м/с и амплитуду колебаний детали $80 \cdot 10^{-3}$ м. В кольцевую полость камеры подавался сжатый под давлением воздух, в результате чего рабочая среда уплотнялась. Сверху камера закрывалась крышкой 7.

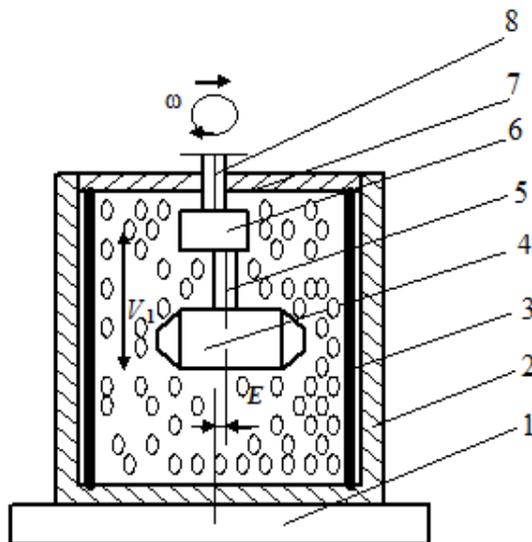


Рис. 6. Схема финишной обработки колеса турбины турбокомпрессора дизеля
Fig. 6. The scheme of the finishing treatment of the turbine wheel of the diesel turbocharger.

В качестве абразивных сред использовались абразивные порошки карбида кремния зеленого марки 63С50 с объемной влажностью 20...22%. Жидкой составля-

ющей среды служил 2% -ный водный раствор тринатрийфосфата. Радиус детали $R_2 = 114$ мм, радиус эластичной оболочки $R_1 = 370$ мм.

$$P_2 = \frac{PHB}{2\sqrt{c_1}} \left(\frac{5R_a}{1,3} \right)^{3/2} (c_1 + a_1 - 0,67\sqrt{c_1 a_1}) 1,18 =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 350}{2 \cdot 0,532} \left(\frac{5 \cdot 16 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3}}{1,3} \right)^{3/2} (0,283 + 0,5 - 0,67\sqrt{0,283 \cdot 0,5}) 1,18 =$$

$$= 16 \cdot 10^{-3} \text{ кгс} (16 \cdot 10^{-2} \text{ Н});$$

$$P = \frac{P_2}{\left[1 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 + (1+\nu)/(1-\nu)R_1^2} \right]} = \frac{16 \cdot 10^{-3}}{\left[1 - \frac{114^2 - 370^2}{114^2 + (1+0,2)/(1-0,2)370^2} \right]} \approx 0,1 \text{ МПа.}$$

Предлагаемая модель и методика определения абразивного воздействия незакрепленной уплотненной обрабатывающей среды на поверхность детали дают достаточно полное представление о возможных взаимодействиях абразивных ча-

стиц с поверхностью при формировании на ней требуемой шероховатости и могут быть использованы для определения основных режимных параметров процесса обработки поверхностей деталей мелкодисперсными абразивными средами.

Заключение

В современном высокотехнологичном машиностроительном производстве одним из важнейших вопросов является обеспечение требуемой величины шероховатости поверхности сложнопрофильных деталей в процессе их обработки незакрепленной абразивной средой. Рассмотрена особенность контактного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью с учетом коэффициента формы обрабатываемых деталей.

Определена роль режущих элементов частиц, влияющих на качество поверхностей сложнопрофильных деталей. Особенностью процесса финишной абразивной обработки является то, что удаление материала с поверхности детали реализуется не вершинами абразивных зерен, а выступами микропрофиля и субмикропрофиля поверхности абразивных частиц. Выступы микрорельефа создают при финишной обработке величину давления на порядок меньшую, по сравнению с обычными абразивными инструментами, что позволяет получать поверхности деталей высокого качества. Очень ценным и решающим моментом в работе является создание математических моделей зависимости давления абразивного материала от требуемой величины шероховатости при учете коэффициента формы обрабатываемых деталей.

Расчеты показали, что, задаваясь величиной шероховатости $R_a = 1,6$ мкм, можно получить давление статически уплотненного абразивного слоя в диапазоне $0,1 \dots 0,2$ МПа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скрябин В.А. Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом: монография. Пенза: Изд-во ПВАИУ, 1992. 120 с.
2. Рыбаков Ю.В. Повышение эффективности отделочной обработки деталей типа дисков и кулачков уплотненной абразивной средой: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.08: защищена 03.10.02: утв. 11.03.03/ Рыбаков Юрий Владимирович. Пенза, 2002. 220с. Библиогр.: С.167-179.
3. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным

В статье определено расчетным путем соотношения работы трения и микрорезания процесса абразивной обработки за счет более высокой интенсивности удаления материала с поверхности обрабатываемой детали выступами микрорельефа зерен незакрепленного абразивного материала по сравнению со шлифованием жестким абразивным кругом. На основании расчетных теоретических зависимостей и проведенных экспериментальных исследований показано, что работа микрорезания выступами микрорельефа абразивных зерен примерно в 1.5...2 раза выше по сравнению с работой микрорезания вершинами абразивных зерен шлифовального круга.

Предлагаемая математическая модель определения режимных параметров и методика абразивного воздействия незакрепленной уплотненной обрабатывающей среды на поверхность детали дают достаточно полное представление о возможных взаимодействиях абразивных частиц с поверхностью при формировании на ней требуемой шероховатости и могут быть использованы для определения основных технологических режимов процесса обработки поверхностей деталей мелкодисперсными абразивными средами.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что обработка деталей статически уплотненным незакрепленным абразивом по сравнению со шлифованием обычным шлифовальным кругом является менее энергозатратным процессом удаления материала с поверхностей обрабатываемых деталей.

инерционными силами. – Саратов: Изд-во: Саратовский ГТУ, 1981. 212 с.

4. Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г. Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие логи, 2015. 240 с. ISBN 978-5-94178-4653.
5. Богомолов Н.И. О работе трения в абразивных процессах. *Труды ВНИИАШ*. 1965;1:60-68.
6. Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка: монография. – М.: Инфра-М, 2016. 176 с. ISBN 978-5-16-009253-9.

7. Зинкин, С. В. Обеспечение качества поверхностей тонкостенных пластин путем абразивной доводки и электрохимико-механического полирования: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.08, 05.02.07: защищена 11.05.12: утв. 04.02.13/ Зинкин Сергей Владимирович. Пенза, 2012. 147с. Библиогр.: С.118-128.
8. Скрябин В.А., Крамченинов И.К. Патент на изобретение (19) RU (11) №2658542 (13) С1; дата государственной регистрации 21 июня 2018 года. Бюл. №18.
9. Скрябин В.А. Патент 1803308 (РФ), МКИ: В24В 31/104. Способ обработки деталей. Оpubл. 23.03.93, Бюл. №11.
10. Скрябин В.А., Свечникова Г.И. Экспериментальные исследования производительности

финишной абразивной обработки деталей с различным профилем. *Машиностроитель*. 2011;4:18-22.

11. Скрябин В.А. Работа трения и микрорезания при обработке поверхностей деталей незакрепленным шлифовальным материалом при его статическом уплотнении в рабочей камере. *Технология металлов*. 2019;12:20-25.
12. Скрябин В.А. Камерная обработка поверхности деталей незакрепленным шлифовальным материалом. *Вестник Мордовского университета*. 2017;1:41-51.
13. Скрябин В.А., Крамченинов И.К. Особенности обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов незакрепленным шлифовальным материалом. *Техника машиностроения*. 2015;4(96):30-34.

REFERENCES

1. Scryabin VA. Fundamentals of submicroping when machining parts with loose abrasive: monograph. Penza: Publishing House of PVAIU; 1992.
2. Rybakov YuV. Improving the efficiency of finishing of parts such as discs and cams with a compacted abrasive medium [dissertation]. [Penza (RF)]: 2002.
3. Martynov AN. Fundamentals of the method of machining parts with a free abrasive compacted by inertial forces. Saratov: Publishing house of Saratov State Technical University; 1981.
4. Scryabin VA, Skhirtladze AG. Technological quality assurance of machining complex-profile parts with compacted fine media: monograph. Stary Oskol; 2015.
5. Bogomolov NI. On the work of friction in abrasive processes. Bulletin of PNRPU. 1965;1:60-68.
6. Zverovshchikov AE. Multifunctional centrifugal planetary surfacing: monograph. Moscow: Infra-M; 2016.
7. Zinkin, SV. Ensuring the quality of thin-walled plate surfaces by abrasive finishing and electrochemical-mechanical polishing [dissertation]. [Penza (RF)]: 2012.

8. Scryabin VA, Kramcheninov IK. Patent for invention (19) RU (11) No. 2658542 (13) C1. 2018 Jun 21.
9. Scryabin VA. Patent 1803308 (RF), MCI: B24B 31/104. The method of processing parts. 1993 March 23.
10. Scryabin VA, Svechnikova GI. Experimental studies of the performance of finishing abrasive machining of parts with different profiles. *Mashinostroitel*. 2011;4:18-22.
11. Scryabin VA. The work of friction and microcutting when machining part surfaces with loose grinding material during its static compaction in the working chamber. *Technologiya Metallov*. 2019;12:20-25.
12. Scryabin VA. Chamber surface treatment of parts with loose grinding materials. *Mordovia University Bulletin*. 2017;1:41-51.
13. Scryabin VA, Kramcheninov IK. Features of machining parts made of tough alloys with loose grinding material. *Tekhnika Mashinostroeniya*. 2015;4(96):30-34.

Информация об авторах:

Скрябин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор Пензенского государственного университета, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел. +79603202596, e-mail: vs_51@list.ru; Author ID по Scopus–66036685168, Author ID по РИНЦ–7875-5830, Researcher ID – R-2385-2018.

Анискин Никита Александрович – студент Пензенского государственного университета, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел. +89521932578, e-mail: nik.aniskin.2104@mail.ru.

Scryabin Vladimir Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Penza State University, 40, Krasnaya Str., Penza, 440026, Russia, phone: +79603202596, e-mail: vs_51@list.ru; Author ID Scopus–66036685168, Author ID RSCI–7875-5830, Researcher ID – R-2385-2018.

Aniskin Nikita Aleksandrovich – Student of Penza State University, 40, Krasnaya Str., Penza, 440026, Russia, phone: +89521932578, e-mail: nik.aniskin.2104@mail.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 19.12.2021; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 25.10.2022. Рецензент – Мокрицкий Б.Я., доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 19.12.2021; approved after review on 18.02.2022; accepted for publication on 25.10.2022. The reviewer is B.Ya. Mokritskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineerin.g*