УДК 621.923.01.

Совершенствование технологии и оборудования при камерной обработке деталей незакрепленным шлифовальным материалом

В.А. СКРЯБИН, д-р техн. наук, профессор, **И.И. АРТЕМОВ**, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, РФ
E-mail: vs_51@list.ru
DOI: 10.31044/1684-2561-2025-0-3-13-19
Поступила в редакцию 09.07.2024
После доработки 14.10.2024
Принята к публикации 03.12.2024

В статье показаны особенности технологии камерного метода получения поверхностей деталей незакрепленным шлифовальным материалом. Рассмотрены методы изготовления и пути совершенствования технологического оборудования, реализующие их модели абразивных зерен и математические зависимости, позволяющие прогнозировать производительность процесса.

Ключевые слова: *обработка поверхностей деталей незакрепленным шлифовальным материалом, технологическое оборудование, модели абразивных частиц, математические зависимости, процесс прогнозирования производительности обработки.*

The technology features of the chamber method for processing surfaces of parts by loose grinding material are described. Manufacturing methods and improving ways of technological equipment that implements them, models of abrasive grains and mathematical dependencies that allow predicting the process efficiency are considered.

Keywords: *surface treatment of parts by loose grinding material, technological equipment, abrasive particle model, mathematical, process prediction of process efficiency.*

Введение

При финишной обработке деталей типа тел вращения со сложным контуром поверхности мелкодисперсными незакрепленными абразивными частицами во время уплотнения сжатым воздухом через эластичную оболочку в специальной камере в съеме металла принимает участие достаточно большое количество абразивных зерен. Плотность контактирования рабочей среды с поверхностью детали при ее обработке статически уплотненными абразивными частицами достаточно высокая. Способ финишной абразивной обработки статически уплотненными абразивными суспензиями на разработанном устройстве на базе вертикально-сверлильного или радиально-сверлильного станка осуществляется в соответствии с рис. 1, *а*, *б*.

На рис. 1, *а* цилиндрические изделия *1* закрепляются на оси *2* и помещаются в абразивную суспензию *3*, находящуюся в специальном контейнере *4*, в котором смонтирована цилиндрическая оболочка *5*, изготовленная из специальной нитрильной

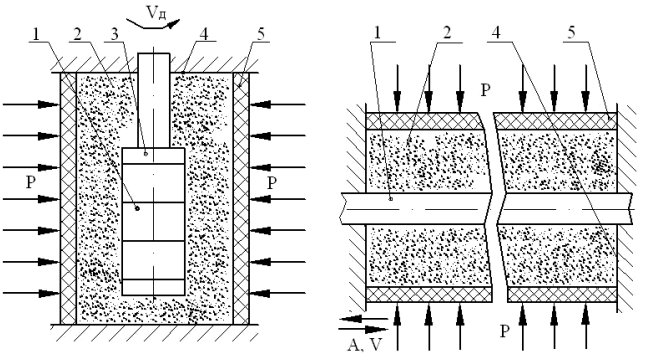

Рис. 1. Обработка деталей статически уплотненным абразивом: *а* — обработка цилиндрических деталей; *б* — обработка плоских деталей; *1* — цилиндрические изделия; *2* — ось; *3* — абразивная суспензия; *4* — контейнер; *5* — цилиндрическая оболочка

резины. Рабочая суспензия сжимается при подаче на периметр оболочки сжатого воздуха. Обработка происходит при вращении оси с деталями со скоростью $V_д$. На рис. 1, *а* показано, что при обработке плоская деталь перемещается со скоростью $V_д$.

При обработке деталей образуются микроскопические стружки, по характеристикам которых затруднительно оценить производительность процесса обработки деталей [1, 2].

Материалы и методы

На рис. 2 приведена реализация процесса удаления материала с поверхности обрабатываемой детали различными режущими элементами абразивного зерна.

Характер контактного взаимодействия уплотненного слоя с обрабатываемой поверхностью детали во многом определяется формой абразивных зерен и их режущих элементов, которая является весьма разнообразной. Однако изучение многочисленных теневых отпечатков показало, что все они вписываются в эллипс [2—4]. Учитывая это, а также результаты исследований топографии зерен на сканирующем микроскопе [2—4], их форму в первом приближении можно моделировать эллипсоидом вращения, на поверхности которого в виде прерывистых кольцевых выступов находятся микронеровности с расположенными на них субмикронеровностями (рис. 3).

Количество микро- и субмикровыступов на поверхности абразивного зерна можно в соответствии с рис. 4 определить по созданным впервые аналитическим зависимостям:

$$N_м = \sum_{i=1}^{n_м} \pi \cdot c_i \cdot K_п, \qquad (1)$$

где i — количество окружностей в сечении эллипсоида, моделирующего форму абразивного зерна, на которых располагаются выступы микропрофиля с определенным шагом $t_м$; $K_п$ — коэффициент, учитывающий прерывистость микронеровностей (в соответствии с законом равной вероятности $K_п = 0{,}5$); $n_м$ — количество следов контакта выступов микропрофиля со средним шагом $t_м$ и длиной l_i в пределах эллипса отпечатка незакрепленной абразивной частицей, обрабатывающей деталь.

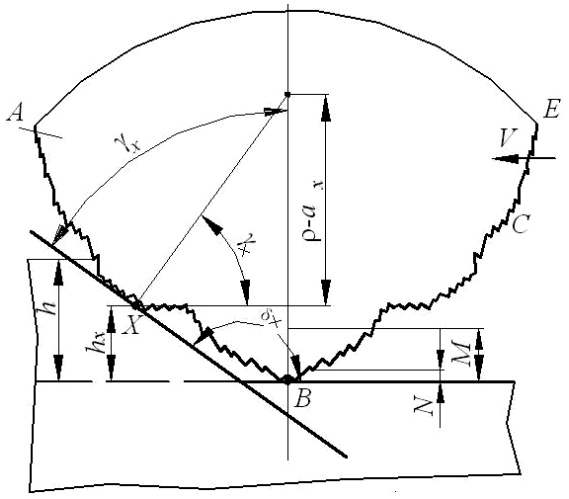

Рис. 2. Удаление материала абразивным зерном:
M — микровыступы вершины абразивного зерна; *N* — субмикровыступы, находящиеся на микровыступах вершин абразивных зерен; *h* — глубина внедрения абразивного зерна в поверхность обрабатываемой детали; *V* — скорость перемещения абразивного зерна; γ_x — передний угол абразивного зерна; δ_x — угол резания

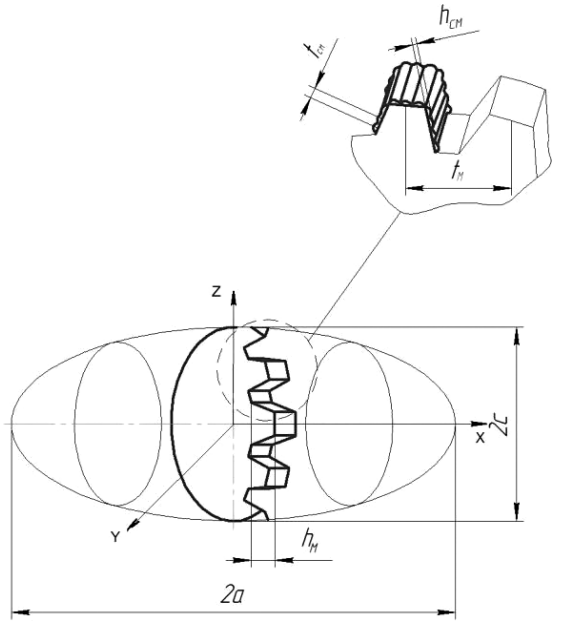

Рис. 3. Модель абразивного зерна:
a, *c* — полуоси эллипсоида вращения; $h_м$ — высота выступа микрорельефа; $h_{см}$ — высота выступа субмикрорельефа; $t_м$ — средний шаг выступов микрорельефа; $t_{см}$ — средний шаг выступов субмикрорельефа

Суммарное количество субмикронеровностей, расположенных на микровыступах поверхности абразивного зерна, определяется аналитической зависимостью (см. рис. 4):

$$N_{\text{см}} = 2 \cdot \frac{h_{\text{ст}} - f}{b_{\text{см}} \cdot \cos\gamma} + \frac{\pi \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \alpha'}{180 \cdot b_{\text{см}}}, \qquad (2)$$

где $h_{\text{ст}}$ — статическая глубина внедрения субмикронеровностей; f — параметр выступа микрорельефа абразивной частицы ($f = \rho_{\text{м}} \cdot \left(1 - \cos\frac{\alpha'}{2}\right)$; $b_{\text{см}}$ — ширина единичной субмикронеровности; γ — передний угол единичной микронеровности; $\rho_{\text{м}}$ — радиус округления выступа микропрофиля абразивного зерна; α' — центральный угол выступа микрорельефа.

Одним из наиболее важных показателей процесса финишной обработки является съем материала [1—5], который может быть представлен определенной математической моделью.

В связи со сложностью проведения анализа процесса резания поверхности обрабатываемой детали всей совокупностью абразивных зерен для определения съема материала, рассмотрим механизм его удаления единичной абразивной частицей.

Фундаментальные исследования микропрофиля частиц незакрепленной абразивной суспензии приведены в работах [1—6, 7—10], где определены численные значения ширины и высоты микро- и субмикропрофиля абразивных частиц. Новыми исследованиями установлено, что радиус округления вершин микрорельефа абразивных частиц находится в диапазоне 0,1—0,5 мкм, а радиус округления вершин субмикровыступов изменяется в пределах 0,08—0,1 мкм. Показано, что параметры микро- и субмикрорельефа практически не связаны с размерами абразивных зерен.

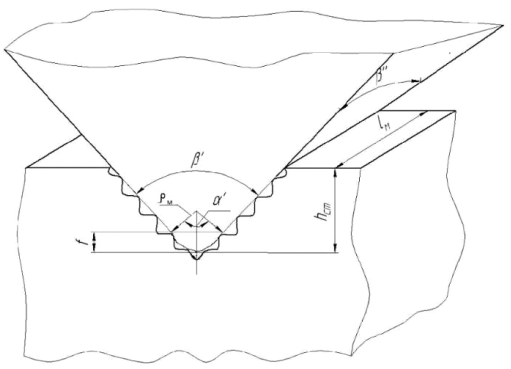

Рис. 4. Взаимодействие абразивного зерна с поверхностью обрабатываемой детали:
$l_{\text{м}}$ — параметр выступов микрорельефа абразивной частицы; β′ и β″ — углы выступов микрорельефа, имеющих форму усеченной правильной пирамиды с радиусом округления $\rho_{\text{м}}$ и суммарной длиной, изменяющейся от 0 до 2c

Исследованиями [1—5] установлено, что в начальный момент обработки поверхности детали (t = 0,5—1 мин) при общем времени обработки t = 6—8 мин удаление материала происходит преимущественно с помощью субмикронеровностей, расположенных на микровыступах абразивных зерен. По мере заполнения впадин субмикропрофиля субмикростружкой съем материала практически прекращается и дальнейшее удаление материала с поверхности обрабатываемой детали осуществляется микропрофилем абразивных зерен. Многочисленные исследования [1—5] показали, что съем материала с поверхности детали субмикронеровностями составляет 1—3%, что пренебрежимо мало по сравнению со съемом материала, приходящимся на микропрофиль абразивных зерен (97—99%). Поэтому, в дальнейшем, с полным основанием можно считать, что удаление материала с поверхности детали осуществляется преимущественно микропрофилем абразивных частиц. Суммарный объем деформированного материала единичным микровыступом абразивного зерна при обработке деталей типа тел вращения может быть определен следующим образом [1, 2]:

$$V_{\Sigma} = K_{\text{с}} \cdot V_{\text{ц}} = 2\pi r_0 \cdot 0{,}5 \times \\ \times \left[(b_j + 2\rho_{\text{м}}) \cdot (h_j - \rho_{\text{м}}) + \pi\rho_{\text{м}}^2\right], \qquad (3)$$

где r_0 — радиус обрабатываемой детали, м·10^{-3}; $K_{\text{с}}$ — коэффициент стружкообразования; $K_{\text{с}} = 1 - \varepsilon_{\text{н}}$ ($\varepsilon_{\text{н}}$ — коэффициент навалов деформированного материала); $\rho_{\text{м}}$ —

радиус округления выступа единичного зерна, м·10^{-6}; b_j и h_j — соответственно, ширина и глубина царапины, оставляемой единичным выступом микропрофиля абразивного зерна на поверхности обрабатываемой детали, м·10^{-6} (рис. 5).

В ходе предварительных расчетов [11, 12] удалось установить, что относительная погрешность при расчете суммарного объема по зависимости (3) не превышает 5% по сравнению с предварительно приведенными экспериментальными исследованиями, где масса полученной микростружки определялась на специальных микроаналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Это указывает на достаточную точность предложенной методики расчета объема царапины от единичного микровыступа абразивного зерна с учетом коэффициента стружкообразования.

Площадь царапины (см. рис. 5) и параметр b_0 определяются следующим образом:

$$S_{\text{ц}} = 0{,}5 \cdot \left[(b_j + 2\rho_{\text{м}}) \cdot (h_j - \rho_{\text{м}}) + \pi \rho_{\text{м}}^2 \right]; \quad (4)$$

$$b_0 = 2 \cdot \rho_{\text{м}} + 2 \cdot (h_j - \rho_{\text{м}}) \cdot \sin\gamma = 2 \cdot h_j \cdot \sin\gamma, \quad (5)$$

где γ — передний угол выступа микрорельефа, среднее значение которого составляет около 50°; b_0 — ширина царапины от единичного микровыступа абразивного зерна в средней части абразивного слоя.

По известным параметрам процесса микрорезания различными элементами абразивных зерен можно дать оценку съема материала множеством незакрепленных абразивных частиц.

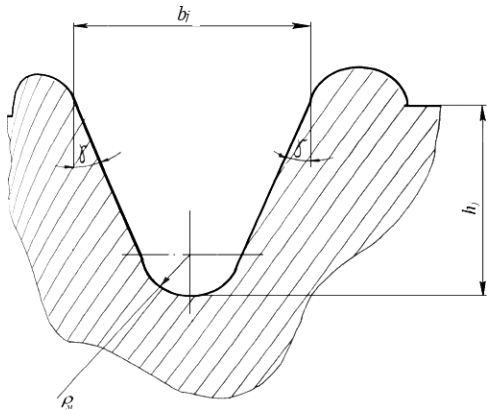

Рис. 5. Сечение царапины от резания микровыступом единичного абразивного зерна

При финишной обработке наружных поверхностей цилиндрических деталей, обрабатываемых в статически уплотненной абразивной суспензии, зная площадь царапины, съем материала можно определить по приведенной математической зависимости, в которой плотность удаляемого материала с учетом коэффициента стружкообразования умножается на объем царапины, длину окружности по диаметру обрабатываемой детали, частоту ее вращения и время обработки t. При этом в математическую зависимость еще входит ряд коэффициентов, учитывающих определенные условия обработки.

Суммарное количество абразивных зерен N_Σ на поверхности контакта с обрабатываемой деталью определяется по зависимости [1—3]:

$$N_\Sigma = 2\pi r_0 \cdot B_{\text{д}} \cdot (\sqrt[3]{n_1 \cdot \rho_h})^2,$$

где r_0 — радиус детали; $B_{\text{д}}$ — длина (ширина) обрабатываемой детали; n_1 — число зерен в единице массы уплотненного абразивного слоя; ρ_h — плотность абразива.

При внедрении абразивных зерен в обрабатываемую поверхность детали и их относительном движении возникают силы резания, определяющие характер относительного положения абразивных зерен. Если сила резания превысит силу нормального давления абразивного зерна на обрабатываемую поверхность, то оно повернется к этой поверхности другой гранью или вершиной.

Поворот абразивных частиц способствует повышению величины съема металла при обработке, которое учитывается коэффициентом поворота $K_{\text{п}}$.

Исследованиями установлено, что при обработке детали происходит увеличение режущей способности абразивных частиц за счет мельчайших сколов микрорельефа на 30%. Это учитывается коэффициентом $K_{\text{у}}$. В зависимости от условий обработ-

ки состава абразивной суспензии и материала обрабатываемой поверхности детали, в процессе исследований удалось установить, что значения коэффициента $K_ж$, учитывающего влияние жидкой составляющей абразивной суспензии, изменяются в диапазоне 1,2—1,5, а значения коэффициента поворота $K_п$ находятся в пределах 1,2—1,3. Проведенными исследованиями также установлено, что в зависимости от шероховатости обрабатываемой поверхности, коэффициент K_{Ra} изменяется в диапазоне 1,15—1,5.

В этом случае расчетная зависимость для определения величины съема металла при обработке наружных поверхностей деталей типа тел вращения в уплотненной абразивной среде имеет вид:

$$Q_\Sigma = \rho \cdot (1-\varepsilon_н) \cdot 2\pi n_0 \cdot r_0 \cdot t \cdot 0{,}5 \times \\ \times \left[(b_j + 2\rho_м) \cdot (h_j - \rho_м) + \pi \rho_м^2 \right] \times \\ \times N_\Sigma \cdot K_п \cdot K_у \cdot K_{Ra} \cdot K_ж. \qquad (6)$$

Конструкция новой установки, используемой для обработки уплотненным шлифовальным материалом плоских поверхностей деталей, допускает регулирование времени двойного хода путем изменения частоты вращения кулачка, который жестко связан со шпинделем станка. Повышаются качество поверхности деталей и производительность процесса. На рис. 6 изображена принципиальная схема установки. Установка включает в себя корпус *1*, эластичную цилиндрическую оболочку *2*, две крышки для крепления эластичной оболочки *3* и *4*, уплотнения окон входа-выхода деталей *5* и *6*, стакан *7*, в котором размещаются уплотнения, две прижимные крышки *8* и *13*, редукционный пневмоклапан *12* с манометром, соединенный с питающей пневмосетью, оправку для установки детали *9* с креплением *10* и кулачковый механизм *11*, задающий детали возвратно-поступательное движение с остановками в конце каждого хода. Вся установка жестко закреплена на столе вертикально-сверлильного станка и соединена с его шпинделем. Частота вращения выходного вала двигателя станка n достигает 1000 мин$^{-1}$.

Работа установки осуществляется следующим образом. Опытный образец детали помещают внутрь рабочей емкости установки, после чего туда засыпают абразивную среду, устанавливают стакан с уплотнением и закрывают верхней крышкой *8*. Затем обрабатываемую деталь соединяют со сменным кулачковым механизмом и устанавливают необходимое давление воздуха, подаваемого из пневмосети, при помощи редукционного пневмоклапана. Давление воздуха фиксируют по показаниям манометра. Обработка происходит при сообщении детали возвратно-поступательного движения. Паз цилиндрического кулачка спрофилирован таким образом, что продолжительность остановки в конце каждого хода составляет $0{,}15T_{д.х}$, где $T_{д.х}$ — время двойного хода детали. Конструкция установки допу-

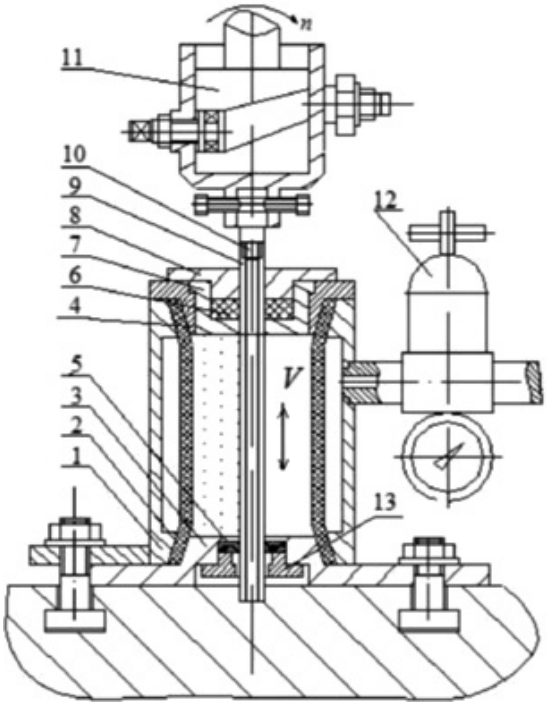

Рис. 6. Схема установки для обработки плоских поверхностей деталей уплотненным шлифовальным материалом:
1 — корпус; *2* — эластичная цилиндрическая оболочка; *3*, *4* — две крышки для крепления эластичной оболочки; *5*, *6* — уплотнения окон входа-выхода деталей; *7* — стакан; *8* — прижимная крышка; *9* — оправка для установки детали; *10* — крепление; *11* — кулачковый механизм; *12* — редукционный клапан с манометром; *13* — прижимная крышка

скает регулирование времени двойного хода путем изменения частоты вращения кулачка, который жестко связан со шпинделем станка. При этом повышаются качество обрабатываемой поверхности деталей и производительность обработки. Изменение величины подводимого давления сжатого воздуха осуществляли редукционным пневмоклапаном 122-12-У4 ГОСТ 18468—79. Регистрацию давления осуществляют манометром МВТПСд-100-ОМ-2 ГОСТ 12733—79 с ценой деления 0,005 МПа. На опытном образце установки производили обработку плоских поверхностей деталей прямоугольной или квадратной формы длиной 200—300 мм, изготовленных из стали 50Г2 твердостью 45—50 *HRC*. Исходная шероховатость поверхности образцов составляла R_a = 0,63—1,25 мкм. В качестве рабочих сред использовали абразивный материал из электрокорунда марки 14А зернистостью Z = 0,40—0,63 мм и объемной влажностью 20%. Жидкой составляющей среды служил 2%-й водный раствор тринатрийфосфата. Обработку производили при следующих значениях режимных параметров: скорости возвратно-поступательного движения детали (скорости резания) V = 0,1—0,25 м/с; давлении уплотненной абразивной среды на поверхность детали p = 0,1—0,15 МПа; времени полирования t = 5 мин. Шероховатость после обработки уплотненным абразивом составляла R_a = 0,16—0,24 мкм. Скорость возвратно-поступательного движения обрабатываемой детали определяется по зависимости:

$$V = \frac{2n_{\text{дв. ход}} \cdot (l_1 + l_2)}{60 \cdot 1000}, \qquad (7)$$

где $n_{\text{дв.ход}}$ — число двойных ходов в минуту обрабатываемой детали относительно уплотненной обрабатывающей среды; l_1 и l_2 — соответственно, длина поверхности детали и запас хода при перемещении детали в рабочей среде. При l_1 = 200—300 мм, l_2 = 50 мм и $n_{\text{дв.ход}}$ = 15—25 $\frac{\text{дв.ход}}{\text{мин}}$ скорость резания изменяется в диапазоне V = 0,1—0,25 м/с.

Если поверхность детали имеет плоский участок, или вся деталь состоит из плоских участков, то в данном случае профиль обрабатываемой детали представляется в первом приближении как часть дуги окружности достаточно большого радиуса R_2 (рис. 7).

Радиус R_2 определяется по следующей зависимости:

$$R_2 = \frac{L}{2\sin\varphi_1}, \qquad (8)$$

где L — длина плоского участка детали, м; φ_1 — геометрический угол, град.

По справочным данным из источников [11, 12]:

$$R_2 = \frac{1}{K_{\text{кр}}},$$

где $K_{\text{кр}}$ — кривизна плоского участка (изменяется в диапазоне 0,05—0,001).

При этом зависимость для определения величины съема металла при обработке плоских наружных поверхностей деталей длиной L_i незакрепленным шлифовальным материалом имеет следующий вид:

$$Q_\Sigma = \rho \cdot (1 - \varepsilon_{\text{н}}) \cdot \sum_{i=1}^{m} L_i \cdot n_{\text{дв. ход}} \cdot t \cdot 0{,}5 \times$$
$$\times \left[(b_j + 2\rho_{\text{м}}) \cdot (h_j - \rho_{\text{м}}) + \pi \cdot \rho_{\text{м}}^2 \right] \times \qquad (9)$$
$$\times N_\Sigma \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{у}} \cdot K_{R_a} \cdot K_{\text{ж}}.$$

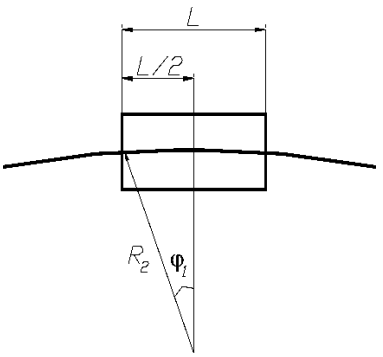

Рис. 7. Профиль обрабатываемой детали

В этом случае суммарное количество абразивных зерен N_Σ по поверхности контакта с обрабатываемой деталью определяется как:

$$N_\Sigma = \sum_{i=1}^{m} L_i \cdot B_{дi} \cdot (\sqrt[3]{n_1 \rho_h})^2,$$

где $\sum_{i=1}^{m} L_i \cdot B_{дi}$ — суммарная длина и суммарная ширина обрабатываемых поверхностей плоской детали.

Необходимо отметить, что удельный съем материала определяется по формуле:

$$q = \frac{Q_\Sigma}{S},\ \text{мг/см}^2,$$

где S — площадь обрабатываемой поверхности детали.

Минутная производительность определяется как:

$$Q_{мин} = Q_\Sigma / t,\ \text{мг/мин},$$

где t — необходимое время процесса обработки.

Обсуждение результатов

После 2—3 мин обработки детали исходный микрорельеф за счет износа абразивных частиц переходит в более сглаженный рабочий, который в конечном итоге определяет величину съема материала с поверхности детали, заданную шероховатость поверхности, точностные параметры процесса обработки и физико-механические свойства обрабатываемой поверхности детали.

Предложенные схемы финишной абразивной обработки деталей незакрепленным шлифовальным материалом, на основе которых разработаны образцы экспериментальных установок обеспечивают расширение технологических возможностей оборудования, позволяя при необходимой переналадке обрабатывать как детали типа тел вращения, так и плоские детали, и способствуя при этом повышению производительности и качества процесса полирования.

Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрябин В.А., Пшеничный О.Ф.** Моделирование процесса микрорезания при обработке деталей уплотненным слоем незакрепленного абразива. Машиностроение: Респ. межвед. сб. Минск: Вышэйш. шк., 1988. В. 13. С. 33—37.
2. **Скрябин В.А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом. Монография. Пенза: Изд-во ПВАИУ. 1992. 120 с.
3. **Скрябин В.А.** Производительность процесса обработки деталей статически уплотненным слоем абразивного микропорошка // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1994. № 4—6. С. 128—130.
4. **Мартынов А.Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та. 1981. 212 с.
5. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами. Монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии».2015. 240 с.
6. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Рыбаков Ю.В.** Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Технология металлов. 2003. № 2. С. 16—17.
7. **Скрябин В.А., Свечникова Г.И.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. М.: Изд-во «Вираж-центр». 2011. № 4. С. 18—22.
8. **Патент** 1803308 (РФ), МКИ: B24B 31/104. Способ обработки деталей / В.А. Скрябин. Опубл. 23.03.93. Бюл. № 11.
9. **А. С.** 1579740 (СССР), МКИ^2 B24B 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А.Н. Мартынов, В.А. Скрябин, В.М. Федосеев. Опубл. 23.07.90. Бюл. № 27.
10. **А.С.** 512902 (СССР), МКИ^2 B24B 31/08. Устройство для центробежной обработки деталей / И.Б. Широков, И.И. Артемов, Н.А. Журавлев. Опубл. 05.05.76. Бюл. № 17.
11. **Патент** 2748919 (РФ), МКИ: B24B 31/104. Способ абразивной обработки плоских поверхностей деталей / В.А. Скрябин, В.О. Фомичев. Опубл. 01.06.21. Бюл. № 16.
12. **Скрябин В.А.** Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. Саранск: Изд-во Мордовского университета. 2015. Т. 25. № 4. С. 72—89.