

УДК 621.923

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

## Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании

П. В. Малинин<sup>1</sup>, П. Ю. Бочкарев<sup>2</sup>, И. И. Артемов<sup>3</sup>, Г. А. Гончарова<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет генетики,

биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

<sup>3</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>mpv92@yandex.ru, <sup>2</sup>bpy@mail.ru, <sup>3</sup>artemov@pnzgu.ru, <sup>4</sup>gga57@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Результаты исследований в области бесцентрового шлифования свидетельствуют о наличии технологического отставания в этой области. Необходимость серьезной методической перестройки теоретических основ с позиции комплексного рассмотрения процесса проходного бесцентрового шлифования позволит отразить его сущность и повысить гибкость для различных типов производства. *Материалы и методы.* Ключевым элементом работы является формализованное описание моделей взаимосвязи обрабатываемой детали с составляющими технического оснащения и процедур принятия решений на всех этапах производства. Разработан подход, основанный на анализе сил, возникающих при контакте детали с элементами технологической системы, что позволяет выявить взаимосвязи между ними и создать систему формализованных моделей, описывающих влияние широкого спектра факторов на характеристики процесса проходного бесцентрового шлифования. Для описания обобщенной модели силовых схем приводится детальное описание составляющих сил, возникающих при реализации процесса. *Результаты.* Учет в моделях особенностей способа обработки обуславливает выполнение проектной процедуры назначения рациональных технологических режимов, гарантирующих стабильность процесса во всей рабочей зоне. *Выводы.* Разработанный методический подход и формализованные соотношения системы взаимосвязанных сил отражают динамический характер операций проходного бесцентрового шлифования и служат теоретической основой для принятия объективных и обоснованных решений при технологической подготовке этих операций, обеспечивающих качество выполнения работ и повышение производительности.

**Ключевые слова:** проходное бесцентровое шлифование, механообрабатывающее производство, технологическая подготовка, режимы обработки, силы резания

**Для цитирования:** Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончарова Г. А. Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 110–125. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

## A methodical approach for determining the components of forces during continuous centerless grinding

P.V. Malinin<sup>1</sup>, P.Yu. Bochkaev<sup>2</sup>, I.I. Artemov<sup>3</sup>, G.A. Goncharova<sup>4</sup>

© Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончарова Г. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>1,2,4</sup>Kamyshin Technological Institute, branch of  
Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia  
<sup>2</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology  
and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia  
<sup>3</sup>Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>mpv92@yandex.ru, <sup>2</sup>bpy@mail.ru, <sup>3</sup>artemov@pnzgu.ru, <sup>4</sup>gga57@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The results of research in the field of centerless grinding indicate that there is a technological lag in this area. The need for a serious methodological restructuring of the theoretical foundations from the perspective of a comprehensive review of the process of continuous centerless grinding will reflect its essence and increase flexibility for various types of production. *Materials and methods.* A key element of these works is a formalized description of the models of the relationship of the processed part with the components of the technical equipment and decision-making procedures at all stages of production. An approach based on the analysis of forces arising from the contact of a part with the elements of a technological system has been developed, which makes it possible to identify the relationships between them and create a system of formalized models describing the influence of a wide range of factors on the characteristics of the through-centerless grinding process. To describe the generalized model of power circuits, a detailed description of the components of the forces that arise during the implementation of the process is given. *Results.* Taking into account the specifics of the processing method in the models determines the implementation of the design procedure for assigning rational technological modes that guarantee the stability of the process throughout the work area. *Conclusions.* The developed methodological approach and the formalized relationships of the system of interrelated forces reflect the dynamic nature of through-hole centerless grinding operations and serve as a theoretical basis for making objective and informed decisions in the technological preparation of these operations, ensuring the quality of work and increased productivity.

**Keywords:** continuous centerless grinding, machining, technological preparation, processing modes, cutting forces

**For citation:** Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharova G.A. A methodical approach for determining the components of forces during continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):110–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

## Введение

Приоритетным фактором, определяющим тенденции развития машиностроения, является удовлетворение запросов общества на изделия с заданными функциональными свойствами и установленным набором качественных характеристик. Это относится и к отдельным методам, применяемым при изготовлении продукции машиностроительных производств, в частности к процессам бесцентрового шлифования. Интересным является изучение сопоставления динамики изменения запросов общества к продукции, при изготовлении которой применяется данный метод обработки, и последовательности развития самого метода в научном, методическом и практическом аспектах [1–5]. Такое сопоставление отражает не только возможные периоды опережения или запаздывания создаваемого технологического и технического обеспечения, но и узкие места в исследовании метода применительно к современным сложившимся условиям, и прогнозную экспертизу.

Наиболее активное развитие метода обработки поверхностей деталей с использованием бесцентрового шлифования было вызвано сложившейся ситуацией в обществе, требующей резкого увеличения объема производства с удовлетворением на тот период времени (середина прошлого века) достаточно высоких показателей качества. Такие принципиальные особенности данного метода, как высокая производительность и точность, простота базирования, легкая механизация, организация поточных линий, сокращение потребности в высококвалифицированных рабочих, удачно отвечали поставленным обществом задачам и привели к активному изучению метода и научно-практическим результатам в тех направлениях, которые в большей степени отражали стоящие перед производством задачи. Приоритетные вопросы научно-исследовательских работ включали установление размеров кругов и режимов резания, типизацию технологических процессов шлифования, способы правки абразивных инструментов и их экономию, рациональную конструкцию станочного оборудования. Решение поставленных задач дало толчок стремительному развитию метода бесцентрового шлифования, ориентированному на использование в массовом и крупносерийном производстве. Расширялась область его использования, применялись различные способы внутреннего, врезного, проходного бесцентрового шлифования с использованием различных схем взаимного расположения обрабатываемых деталей, шлифовальных, ведущих кругов и их количества.

В дальнейшем методическое развитие бесцентрового шлифования длительное время было связано исключительно с доработкой и корректировкой отдельных перечисленных выше направлений исследований, что привело к периоду консервации других принципиальных научных положений в данной области. Такое состояние не позволило адаптироваться к изменяющимся потребностям общества, в первую очередь связанным с тенденцией индивидуализации потребительского спроса, приведшим к резкому возрастанию объемов многоменклатурного производства. Соответственно, сложились условия, когда и к методам бесцентрового шлифования для их эффективного использования стали предъявляться дополнительные требования, связанные с этим. И основной проблемой стала сложность и высокая трудоемкость наладки и переналадки технологического оборудования, выявилось отсутствие нормативных и промышленно апробированных методик наладки станков и управления реализацией процесса обработки с учетом реального состояния оборудования. Подход к организации производства, в котором используются станки бесцентрово-шлифовальной группы, основанный на чисто субъективных знаниях и потенциале опытных профессиональных наладчиков и технологов, со временем привел к ситуации резкого сокращения или ликвидации таких подразделений.

### **Материалы и методы**

Проведенные исследования выявили отставание в технологическом обеспечении операций бесцентрового шлифования и указывают на необходимость серьезной методической перестройки теоретических положений, создающих условия для комплексного рассмотрения, отражающих физическую сущность процесса и повышающих его гибкость для различных типов производства. Принципиальными предпосылками выполнения данных требований

является задача создания системы автоматизированного проектирования и управления реализацией операций бесцентрового шлифования, ключевым элементом которой выступает разработка формализованного описания моделей взаимосвязи обрабатываемой детали с элементами технического оснащения и процедур принятия решений на всех этапах производства.

Проведенные авторами исследования [6–8] позволили сформулировать и экспериментально подтвердить зависимости, формализующие следующие проектные действия:

- кластеризацию методов бесцентрового шлифования по однородности выполнения проектных процедур;
- определение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования с учетом реального состояния оборудования и средств технологического оснащения;
- установление пространственных связей между элементами технологической системы и обрабатываемой деталью на всех этапах процесса обработки в рабочей зоне;
- выполнение требования силового замыкания;
- распределение величины снимаемого припуска в рамках одного перехода во всех сечениях рабочей зоны.

Операции проходного бесцентрового шлифования представляют собой сложный процесс, требующий тщательного анализа и изучения сил, возникающих в точках контакта детали и элементов технологической системы. Без глубокого понимания влияния этих сил невозможно эффективно выбрать технологическую оснастку, назначить режимы резания, настроить оборудование и управлять процессом обработки. Известные исследования в данной области в основном направлены на изучение движения детали в процессе обработки. Однако они не учитывают ряд важных аспектов, таких как изменение диаметра обрабатываемой поверхности в зависимости от динамики изменения величины снимаемого припуска, необходимость учета постоянной корректировки положения точек контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа, шлифовальным и ведущим кругами. Это не позволяет создать полноценную модель взаимодействия между составляющими силами. Кроме того, отсутствие методик оценки соблюдения условия силового замыкания в процессе обработки деталей методом бесцентрового шлифования значительно затрудняет решение задачи определения сил в точках контакта.

Для решения поставленных задач был разработан методический подход [9–11], который дает возможность объективно определить оптимальные параметры настройки и управления процессом бесцентрового шлифования с учетом текущего состояния и конструктивных особенностей оборудования и технологического оснащения. Предлагаемый подход, основанный на анализе составляющих сил, возникающих в точках контакта обрабатываемой детали с элементами технологической системы, позволяет выявить взаимосвязь между этими силами и создать систему формализованных моделей, описывающих влияние широкого спектра факторов на качественные и технико-экономические характеристики процесса проходного бесцентрового шлифования. Для описания обобщенной модели силовых схем при проходном бесцентровом шлифовании в статье приведена детализация составляющих сил.

В рассматриваемой системе нормальные силы  $F_n$  [Н], возникающие в местах контакта, зависят от массы обрабатываемой детали  $m$  [кг] и местоположения контактов. В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, при расположении центров кругов на одной горизонтальной линии (рис. 1) влияние каждого места соответствует проекции силы на направление гравитационного поля  $g$  [м/с<sup>2</sup>]:

$$F_{An} - kA_n = \frac{\frac{d}{2} \sin c}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)};$$

$$F_{Bn} - kB_n = \frac{\frac{d}{2} \sin b}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)};$$

$$F_{Pn} - kP_n = \frac{\frac{d}{2} \cos(90 - a)}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)}.$$

где  $d$  – диаметр обрабатываемой поверхности [м];  $a$  – угол наклона опорной поверхности ножа [град].

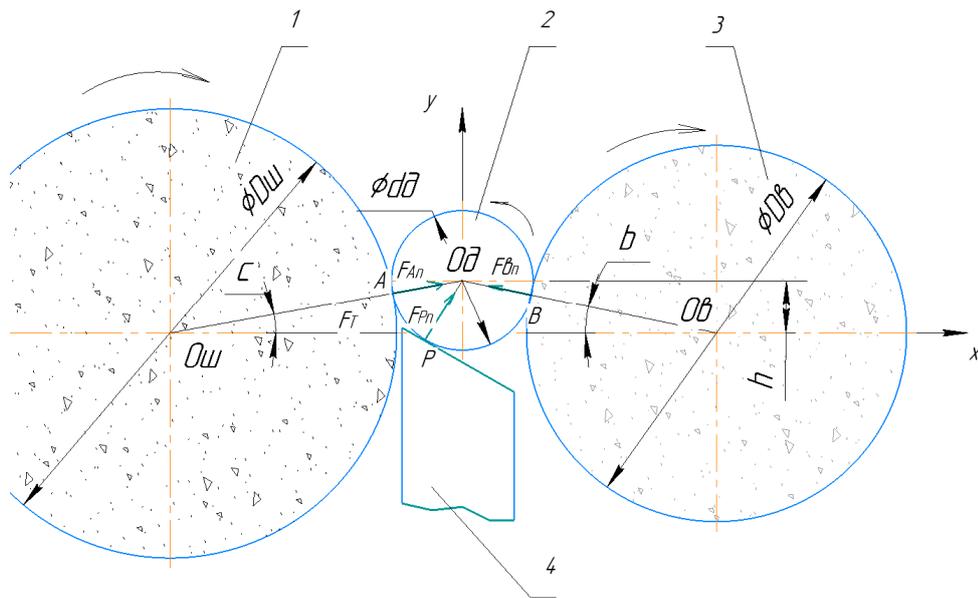


Рис. 1. Схема нормальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Значение угла между поверхностью или касательной к поверхности контакта по отношению к горизонтальной плоскости:

$$F_{An} = kA_n m g \cos(90 - c);$$

$$FBn = kBnmg \cos(90 - b) ;$$

$$FPn = kPnmg \cos a .$$

Составляющие нормальных сил на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$FAnx = FAn \cos c , FAny = FAn \sin c ;$$

$$FBnx = FBn \cos b , FBny = FBn \sin b ;$$

$$FPnx = FPn \sin (90 - a) , FPny = FPn \cos (90 - a) .$$

Нормальные силы в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки в других сечениях рабочей зоны рассчитываются аналогично с учетом динамического изменения мест контактов, диаметра обрабатываемой поверхности и, соответственно, значений углов (рис. 2), входящих в представленные формулы. Корректировка этих данных определяет ориентацию обрабатываемой поверхности относительно координатной системы оборудования.

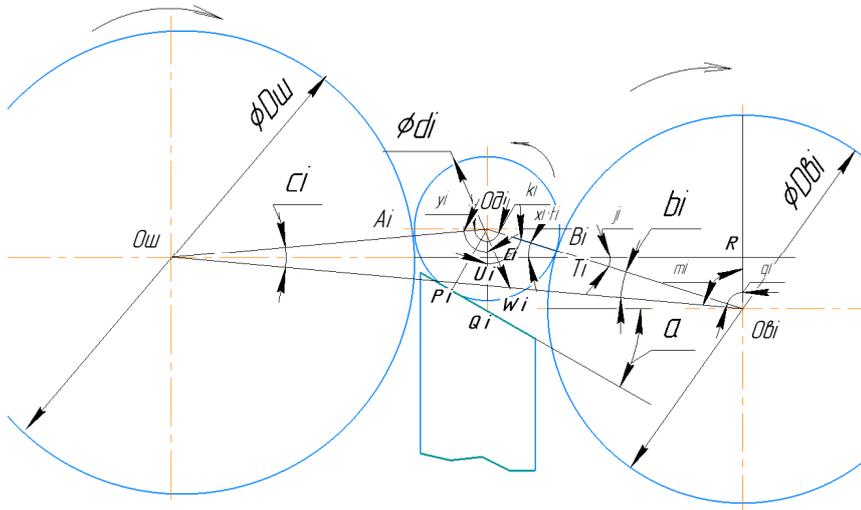


Рис. 2. Схема нормальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (в  $i$ -м сечении рабочей зоны)

Для определения в  $i$ -м сечении рабочей зоны обработки нормальных сил выведены зависимости:

$$F A_i n - k A_i n = \frac{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i)}{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i) + \frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i)) + \frac{d_i}{2} \cos(90 - a)}$$

$$F A_i n = k A_i n m g \cos(90 - y_i) ;$$

$$F A_i n x = F A_i n \cos(90 - y_i) , F A_i n y = F A_i n \sin(90 - y_i) ;$$

$$F B_i n - k B_i n = \frac{\frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i))}{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i) + \frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i)) + \frac{d_i}{2} \cos(90 - a)},$$

$$F B_i n = k B_i n m g \cos(90 - m_i);$$

$$F B_i n x = F B_i n \cos(b_i + (90 - m_i)), F B_i n y = F B_i n \sin(b_i + (90 - m_i));$$

$$F P_i n - k P_i n = \frac{\frac{d_i}{2} \cos(90 - a)}{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i) + \frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i)) + \frac{d_i}{2} \cos(90 - a)},$$

$$F P_i n = k P_i n m g \cos a; F P_i n x = F n P_i \sin(90 - a), F P_i n y = F P_i n \cos(90 - a).$$

Тангенциальные силы, возникающие в местах контакта (рис. 3), взаимосвязаны и зависят от назначенных технологических режимов обработки, реальных размеров обрабатываемой поверхности и кругов, расположения детали в зоне обработки. Характерной спецификой при рассмотрении схемы сил при проходном бесцентровом шлифовании является учет условия относительного движения соприкасающихся тел в местах контакта. Окружная сила, возникающая в месте контакта обрабатываемой поверхности и опорного ножа, зависит от скорости вращения и характеристик обрабатываемой детали и может быть определена:  $F_{Pm} = \frac{T}{(d/2)}$ , где  $T_d$  – крутящий момент [Н·м],

$T_d = J\omega^2 / 2$ ;  $J$  [кг·м<sup>2</sup>] – момент инерции для детали (элемента детали) сплошной формы,  $J = \frac{1}{2}m\left(\frac{d}{2}\right)^2$ , или  $J$  – момент инерции для полой детали

(элемента детали),  $J = m \frac{(d_1/2)^2 + (d_2/2)^2}{2}$ ,  $d_1/2$ ,  $d_2/2$  – внешний и внутренний радиусы цилиндрических поверхностей детали;  $\omega_d$  – угловая скорость обрабатываемой поверхности [рад/с],  $\omega_d = 2\pi V_d$ ,  $V_d$  – скорость вращения обрабатываемой поверхности [м/с].

Окружная сила в месте контакта детали и ведущего круга имеет направление относительного смещения поверхностей. Рассматривается случай, при котором скорость вращения обрабатываемой поверхности больше скорости вращения ведущего круга:

$$F_{Bm} = \frac{T_{D_B}}{D_B / 2},$$

где  $D_B$  – диаметр ведущего круга [м];  $T_{D_B} = \frac{P_B}{\omega_d - \omega_{D_B}}$ ;  $P_B$  – мощность на валу ведущего круга [Вт];  $\omega_{D_B} = 2\pi V_{D_B}$ ;  $V_{D_B}$  – скорость вращения ведущего круга [м/с].

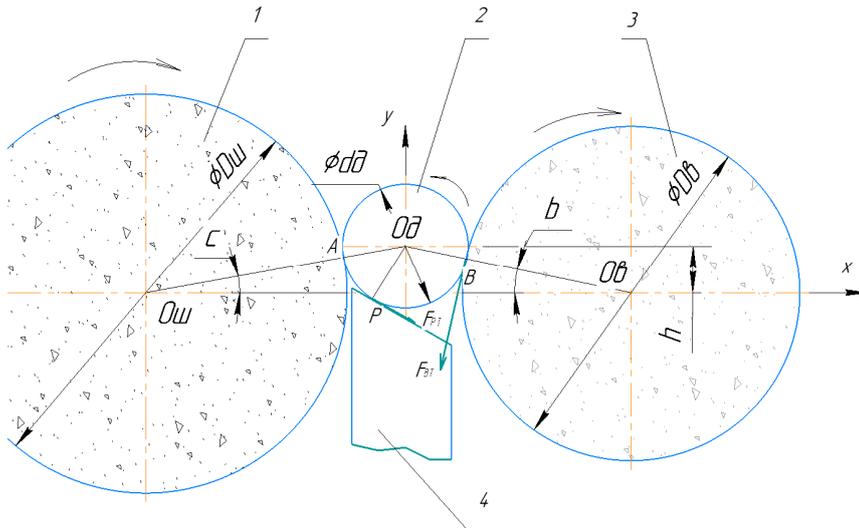


Рис. 3. Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Крутящий момент ведущего круга можно также рассчитать посредством определения момента инерции ведущего круга и оправки, на которую крепится круг.

Абсолютные составляющих тангенциальных сил на горизонтальную ( $x$ ) и вертикальную оси ( $y$ ):

$$FB_{mx} = FBm \sin b, \quad FB_{my} = FBm \cos b;$$

$$FP_{mx} = FPn \cos(90 - a), \quad FP_{my} = FPn \sin(90 - a).$$

В  $i$ -м сечении рабочей зоны обработки имеем

$$F_{P_{i,m}} = \frac{T}{d_i/2}, \quad T_{d_i} = J_i \frac{\omega_i^2}{2}, \quad J_i = \frac{1}{2} m_i \left( \frac{d_i}{2} \right)^2.$$

$$FP_{i,mx} = F_{P_{i,m}} \cos(90 - a), \quad FP_{i,my} = F_{P_{i,m}} \sin(90 - a);$$

$$F_{B_i,m} = \frac{T_{D_{iB}}}{D_{iB}/2}, \quad T_{D_{iB}} = \frac{P_B}{\omega_{d_i} - \omega_{D_{iB}}}, \quad \omega_{D_{iB}} = 2\pi V_{D_{iB}}, \quad \omega_{d_i} = 2\pi V_{d_i};$$

$$FB_{i,mx} = F_{B_i,m} \cos(b_i + (90 - m_i)), \quad FB_{i,my} = F_{B_i,m} \sin(b_i + (90 - m_i)).$$

Силы трения скольжения, возникающие в местах контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом и поверхностью опорного ножа, направлены вдоль касательной к трущимся поверхностям в направлении противодействия относительному смещению поверхностей (рис. 4).

Принимаем, что величина сил зависит от прижимающей силы и скорости движения тел относительно друг друга и не зависит в соответствии с законом Кулона от величины площади трущихся поверхностей.

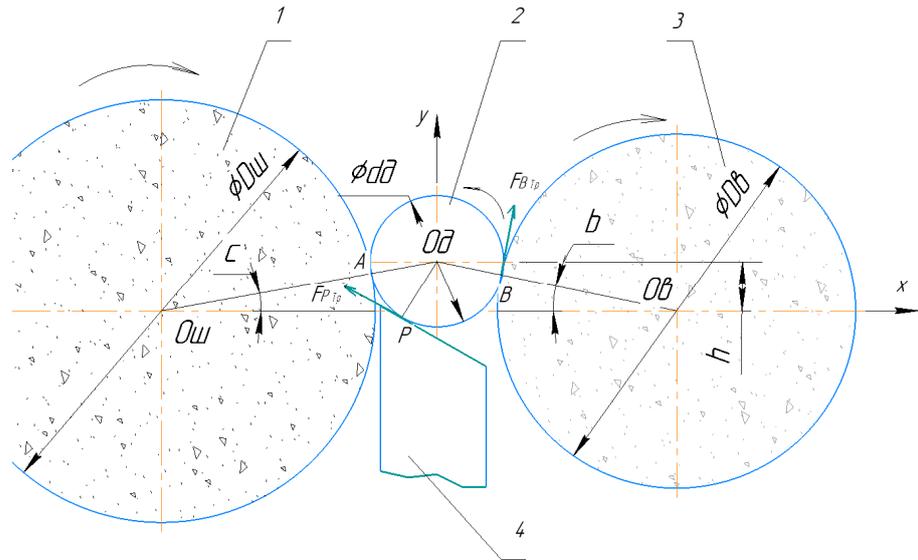


Рис. 4. Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (в  $i$ -м сечении рабочей зоны)

В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом  $F_{B_{тр}} = FBn\mu_{д-в}g\beta_{д-в}$ , где  $\mu_{д-в}$  – коэффициент трения между обрабатываемой деталью и ведущим кругом, преимущественно зависящий от их материала и структуры ведущего круга;  $\beta_{д-в}$  – коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и ведущим кругом, учитывающий состояние поверхностей, условий смазки и скоростей вращения.

Сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с опорной поверхностью установочного ножа:

$$F_{P_{тр}} = FPn\mu_{д-н}g\beta_{д-н},$$

где  $\mu_{д-н}$  – коэффициент трения между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа;  $\beta_{д-н}$  – коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа.

Абсолютные значения составляющих сил трения скольжения на горизонтальную ( $x$ ) и вертикальную оси ( $y$ ):

$$FB_{тр}x = F_{B_{тр}} \cos(90 - b), \quad FB_{тр}y = F_{B_{тр}} \cos b;$$

$$FP_{тр}x = FP_{тр} \sin a, \quad FP_{тр}y = FP_{тр} \cos a.$$

В сечениях рабочей зоны обработки имеем

$$FB_{i_{тр}} = FB_i n \mu_{д-в} g \beta_{д-в}; \quad FP_{i_{тр}} = FP_i n \mu_{д-н} g \beta_{д-н};$$

$$FB_{i_{тр}}x = FB_{i_{тр}} \cos(b_i + (90 - m_i));$$

$$FB_{i_{\text{тр}}}y = FB_{i_{\text{тр}}} \sin(b_i + (90 - m_i));$$

$$FP_{i_{\text{тр}}}x = FP_{i_{\text{тр}}} \cos(90 - a), \quad FP_{i_{\text{тр}}}y = FP_{i_{\text{тр}}} \sin(90 - a).$$

В качестве методического подхода для расчета силового взаимодействия в месте контакта шлифовального круга с поверхностью детали использовались результаты исследований [12–14], основанные на изучении микро-резания единичными зернами с учетом влияния сопротивления материала обрабатываемой поверхности процессам пластического деформирования и трения. Снятие стружки вершиной абразивного зерна сопровождается возникновением силы резания  $F_p$ , являющейся геометрической суммой тангенциальной  $F_{pm}$  и нормальной  $F_{pn}$  составляющих, каждая из которых включает в себя: силу сдвига  $F_{ps}$  (в плоскости сдвига), силу трения  $F_{ptr}$  по задней поверхности зерна, инерционную силу стружки  $F_{пин}$ :

$$F_{psm} = \frac{\tau_s Q_{\text{ср}} \sin(\delta + \varphi_s)}{\sin \delta \sin \varphi_s}; \quad F_{psn} = \frac{\tau_s Q_{\text{ср}} \cos(\delta + \varphi_s)}{\sin \delta \sin \varphi_s},$$

где  $\tau_s$  – напряжение сдвига [Па];  $Q_{\text{ср}}$  – площадь сечения среза [ $\text{мм}^2$ ];  $\delta$  – угол при вершине режущей кромки [град];  $\varphi_s$  – угол трения [град]  $\varphi_s = \tan^{-1}(\mu_s)$ ;  $\mu_s$  – коэффициент внутреннего трения в плоскости сдвига;

$$F_{pmpm} = \frac{\tau_s \pi \rho a_z}{\mu_s},$$

где  $\rho$  – средний радиус округления вершины [мм];  $a_z$  – глубина резания [мм].

Зависимости [15–18] для определения инерционных сил, учитывающих инерцию стружки при изменении направления материала при переходе от обрабатываемой заготовки к стружке, позволяют вычислить тангенциальную составляющую как произведение «секундной» массы движущегося материала на изменение скорости его движения в тангенциальном направлении:

$$F_{пинт} = Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}^2 \left( \frac{1 - \sin \delta \sin \gamma}{\cos(\delta - \gamma)} \right); \quad F_{пинн} = Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}^2 \left( \frac{\sin \delta \cos \gamma}{\cos(\delta - \gamma)} \right),$$

где  $q_m$  – плотность материала [ $\text{н}/\text{м}^2$ ];  $Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}$  – «секундная» масса движущегося материала;  $V_{\text{сек}}$  – скорость движения стружки [м/с]

$$V_{\text{сек}} = V_{\text{к}} \frac{\sin \delta}{\cos(\delta - \gamma)}.$$

При реализации рассматриваемого метода проходного бесцентрового шлифования  $V_{\text{к}}$  принимается как относительная скорость, учитывающая окружные скорости шлифовального круга и обрабатываемой поверхности.

Величины составляющих сил определяются суммированием составляющих сил сдвига, трения и инерции:

$$F_{pm} = F_{psm} + F_{ptrm} + F_{ринм}; F_{psn} = F_{psn} + F_{ptrn} + F_{ринн}.$$

Определение общей тангенциальной составляющей силы резания в месте контакта выполняется с учетом анализа условия перехода процесса от пластического деформирования металла к резанию  $a_{zmin} / \rho$ ,  $a_{zmin}$  [мм] – минимальная толщина среза, при котором зерна еще снимают стружку:

$$F_{pm} = F_{pmрез} + F_{pmпл},$$

где  $F_{pmрез}$  – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна;  $F_{pmпл}$  – суммарная тангенциальная сила резания, действующая на зерна, совершающие только пластическое деформирование металла.

Теоретические модели расчета сил резания, возникающих в местах контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью [16], построены с учетом следующих допущений: число зерен, участвующих в процессе шлифования, колеблется в небольших пределах и принимается постоянным  $N_z$ ; усилие пластической деформации  $F_{пл}$ , действующей на единичное абразивное зерно, принимается пропорциональным площади среза  $Q_{ср}$ ,  $F_{пл} = \sigma_T Q_{ср}$ ; сила трения действует на все контактирующие зерна и рассматривается отдельно от сил  $F_{пл}$ ,  $F_{рез}$ .

Тангенциальная сила резания в зоне шлифовального круга с заготовкой:

$$F_{pm} = F_{pm(рез ин)} + F_{pm(пл)} + F_{pm(тр)},$$

где  $F_{pm(рез ин)}$  – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна и определяющаяся силой сдвига и силой инерции стружки без учета силы трения;

$$F_{pm(рез ин)} = \sum_{i=1}^{N_{zрез}} F_{ps} + \sum_{i=1}^{N_{zрез}} F_{пин}, F_{pm(пл)} = \sum_{i=1}^{N_{zдеф}} F_{pпл} = \sum_{i=1}^{N_{zдеф}} \sigma_T Q_{ср},$$

$$F_{pm(тр)} = \sum_{i=1}^{N_z} F_{ptr},$$

где  $N_{zрез}$ ,  $N_{zдеф}$  – количество режущих и деформирующих зерен на единицу площади круга, определяемое по методикам [12, 16].

При расчетах нормальной составляющей силы резания  $F_{pn}$  допускается использование выражения  $F_{pn} = F_{рт} / k_\varepsilon$ , где табличный коэффициент [16, 19] определяется экспериментальным путем.

Описанный метод анализа сил, действующих между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью, предоставляет возможность наиболее исчерпывающе учесть все факторы, которые могут оказать влияние на процесс обработки.

Абсолютные значения составляющих сил резания в сечении рабочей зоны обработки, в которой центры шлифовального и ведущего кругов расположены на одной горизонтальной линии, на горизонтальную ( $x$ ) и вертикальную оси ( $y$ ):

$$\begin{aligned} F_{pmy} &= F_{pm} \cos(\beta - c), \quad F_{pmx} = F_{pm} \sin(\beta - c); \\ F_{p_{тр}y} &= F_{p_{тр}} \sin(c + \varphi_s), \quad F_{p_{тр}x} = F_{p_{тр}} \cos(c + \varphi_s); \\ F_{p_{ин}y} &= F_{p_{ин}} \cos(\beta + \gamma - c), \quad F_{p_{ин}x} = F_{p_{ин}} \sin(\beta + \gamma - c). \end{aligned}$$

В  $i$ -м сечении рабочей зоны обработки:

$$\begin{aligned} F_{pmy} &= F_{pm} \cos(\beta - ((90 - y_i))), \quad F_{pmx} = F_{pm} \sin(\beta - ((90 - y_i))); \\ F_{p_{тр}y} &= F_{p_{тр}} \sin((90 - y_i) + \varphi_s), \quad F_{p_{тр}x} = F_{p_{тр}} \cos((90 - y_i) + \varphi_s); \\ F_{p_{ин}y} &= F_{p_{ин}} \cos(\beta + \gamma - (90 - y_i)), \quad F_{p_{ин}x} = F_{p_{ин}} \sin(\beta + \gamma - (90 - y_i)). \end{aligned}$$

### Результаты

Представленные выражения позволяют представить взаимосвязанную систему составляющих сил процесса проходного бесцентрового шлифования во всех участках рабочей зоны обработки, что открывает возможности решения широкого спектра проектных задач на этапах разработки и реализации технологических операций.

Большинство известных зависимостей, определяющих влияние скорости резания на составляющие силы резания при бесцентровом шлифовании, охватывают только отдельные условия обработки и основаны преимущественно на экспериментальных данных. Связи с тем, что сила резания при шлифовании имеет широкий диапазон варьирования в зависимости от припуска, технологических условий обработки, материала заготовки и структуры абразивного инструмента, в качестве наиболее обобщенной характеристики процессов в зоне контакта зерен с металлом рассматривается соотношение  $F_{pm} / F_{pn}$ ; в зависимости, устанавливаемой посредством величины съема металла на единицу силы резания связь скорости резания с составляющей силы [12].  $F_{pm} \approx (1 / F_{pn})^{k_3}$ , где  $k_3$  – коэффициент, зависящий от зернистости абразивного материала (0,79–1,47).

С учетом характерных отличий рассматриваемого метода обработки, кинематических особенностей и технических возможностей применяемого оборудования становится возможным решение задачи установления предельно допустимых значений режимов обработки, обеспечивающих стабильное протекание процесса обработки в пространстве всей рабочей зоны операций проходного бесцентрового шлифования.

### Заключение

На основе моделей, позволяющих устанавливать пространственное расположение мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами

технологической системы на операциях проходного бесцентрового шлифования разработан поэлементный расчет составляющих сил, возникающих в процессе реализации технологической операции. Представленные зависимости позволяют устанавливать направление и величины сил с учетом: реального состояния оборудования, средств технологического оснащения и наладочных параметров операции; размерных взаимосвязей обрабатываемой поверхности с технологической оснасткой и постоянно меняющихся мест контакта в сечениях зоны обработки; материала, конфигурации, массы и габаритов детали и параметров обрабатываемой поверхности; материала опорного ножа; структуры шлифовального и ведущего кругов; технологических режимов обработки, включающих распределение величин снимаемого припуска в рамках перехода. Созданный методический подход и разработанные формализованные соотношения системы взаимосвязанных сил отражают особенности динамического характера операций проходного бесцентрового шлифования и выступают теоретической основой принятия объективных обоснованных решений при их технологической подготовке, обеспечивающих качество выполнения работ и повышение производительности.

### Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. Л. : МАШГИЗ, 1952. 283 с.
3. Филькин В. П., Колтунов И. Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М. : Машиностроение, 1971. 204 с.
4. Мусянко В. И., Братчиков А. Я. Бесцентровое шлифование. Л. : Машиностроение, 1986. 96 с.
5. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
6. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8. С. 36–39.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1, № 1. С. 61–69.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
9. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 142–156.
10. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И. Оценка условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 109–117.
11. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159.
12. Зубарев Ю. М., Приемьшев А. В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2010. 304 с.

13. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : Машиностроение, 1974. 279 с.
14. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А., Дубинин-Барковский И. В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М. : Машиностроение, 1975. 144 с.
15. Ваксер Д. Б. Пути повышения производительности обработки инструмента при шлифовании. Л. : Машиностроение, 1964. 123 с.
16. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М. : Машиностроение, 1974. 319 с.
17. Оробинский В. М. Абразивные методы обработки и их оптимизация. М. : Машиностроение, 2000. 314 с.
18. Евсеев Д. Г., Сальников А. Н. Модели шлифования. Теория и эксперимент. М. : Известия, 2018. 312 с.
19. Бокучава Г. В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси : СабчотаСакартвело, 1984. 234 с.

### References

1. Suslov A.G. (ed.). *Spravochnik tekhnologa = Technologist's handbook*. Moscow: Innovatsionnoe mashinoostroenie, 2019:800. (In Russ.)
2. Slonimskiy V.I. *Teoriya i praktika bestsentrovogo shlifovaniya = Theory and practice of centerless grinding*. Leningrad: MASHGIZ, 1952:283. (In Russ.)
3. Fil'kin V.P., Koltunov I.B. *Progressivnye metody bestsentrovogo shlifovaniya = Progressive methods of centerless grinding*. Moscow: Mashinoostroenie, 1971:204. (In Russ.)
4. Mutsyanko V.I., Bratchikov A.Ya. *Bestsentrovoye shlifovanie = Centerless grinding*. Leningrad: Mashinoostroenie, 1986:96. (In Russ.)
5. Ashkinaziy Ya.M. *Bestsentrovyye shlifoval'nyye stanki. Konstruktsii, obrabotka i pravka = Centerless grinding machines. Design, processing and dressing*. Moscow: Mashinoostroenie, 2003:352. (In Russ.)
6. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Structuring of centerless grinding methods using cluster analysis. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2022;(8):36–39. (In Russ.)
7. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Grouping of longitudinal centerless grinding operations according to technological characteristics. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskyy vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2024;1(1):61–69. (In Russ.)
8. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Definition of setup parameters for centerless through-feed grinding operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):144–153. (In Russ.)
9. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Justification of the parameters for setting up centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):142–156. (In Russ.)
10. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I. Evaluation of the condition of force closure during setup of the operation of continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):109–117. (In Russ.)
11. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Interrelation of forces in continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):149–159. (In Russ.)
12. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov: ucheb. posobie = Theory and practice of increasing the efficiency of grinding materials: textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2010:304. (In Russ.)

13. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley = Performance of the steel parts grinding process*. Moscow: Mashinostroenie, 1974:279. (In Russ.)
14. Kulakov Yu.M., Khrul'kov V.A., Dubinin-Barkovskiy I.V. *Predotvrashchenie defektov pri shlifovanii = Preventing defects in grinding*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:144. (In Russ.)
15. Vakser D.B. *Puti povysheniya proizvoditel'nosti obrabotki instrumenta pri shlifovanii = Ways to improve tool performance during grinding*. Leningrad: Mashinostroenie, 1964:123. (In Russ.)
16. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov = Theory of grinding materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1974:319. (In Russ.)
17. Orobinskiy V.M. *Abrazivnye metody obrabotki i ikh optimizatsiya = Abrasive processing methods and their optimization*. Moscow: Mashinostroenie, 2000:314. (In Russ.)
18. Evseev D.G., Sal'nikov A.N. *Modeli shlifovaniya. Teoriya i eksperiment = Grinding models. Theory and experiment*. Moscow: Izvestiya, 2018:312. (In Russ.)
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya = Tribology of the grinding process*. Tbilisi: SabchotaSakartvelo, 1984:234. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Павел Витальевич Малинин**

аспирант, Камышинский  
технологический институт (филиал)  
Волгоградского государственного  
технического университета (Россия,  
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: mpv92@yandex.ru

**Pavel V. Malinin**

Postgraduate student, Kamyshin  
Technological Institute, branch of  
Volgograd State Technical University  
(6A Lenina street, Kamyshin, Russia)

**Петр Юрьевич Бочкарев**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры технологии  
машиностроения, Камышинский  
технологический институт (филиал)  
Волгоградского государственного  
технического университета (Россия,  
г. Камышин, ул. Ленина, 6А); профессор  
кафедры технического обеспечения  
АПК, Саратовский государственный  
университет генетики, биотехнологии  
и инженерии имени Н. И. Вавилова  
(Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: bpy@mail.ru

**Petr Yu. Bochkaev**

Doctor of engineering sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of engineering technology, Kamyshin  
Technological Institute, branch  
of Volgograd State Technical University  
(6A Lenina street, Kamyshin, Russia);  
professor of the sub-department of technical  
support of the agro-industrial complex,  
Saratov State University of Genetics,  
Biotechnology and Engineering named  
after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street,  
Saratov, Russia)

**Игорь Иосифович Артемов**

доктор технических наук, профессор,  
директор Научно-исследовательского  
института фундаментальных  
и прикладных исследований, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

**Igor' I. Artemov**

Doctor of engineering sciences, professor,  
director of the Research Institute  
of Fundamental and Applied Research,  
Penza State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Галина Анатольевна Гончарова***

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры технологии  
машиностроения, Камышинский  
технологический институт (филиал)  
Волгоградского государственного  
технического университета (Россия,  
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: gga57@yandex.ru

***Galina A. Goncharova***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, associate professor  
of the sub-department of engineering  
technology, Kamyshin Technological  
Institute, branch of Volgograd State  
Technical University (6A Lenina street,  
Kamyshin, Russia)

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

**Поступила в редакцию / Received 19.03.2025**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.04.2025**

**Принята к публикации / Accepted 22.05.2025**