

**В. И. КАЛЬЧЕНКО**, д-р техн. наук,

**В. В. КАЛЬЧЕНКО**, д-р техн. наук, Чернигов, Украина

## **УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОЛЬНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ**

Розроблено універсальну високопродуктивну технологію поздовжнього круглого шліфування циліндричних, ступінчастих, конічних, торцевих та криволінійних поверхонь периферією і торцем одного вузького круга, зі схрещеними осями його та деталі. Підвищення продуктивності обробки забезпечується шляхом зняття чорнового припуску торцем круга в режимі однопрохідного глибинного високошвидкісного шліфування, а точності за рахунок чистового шліфування калібруючою розвантаженою ділянкою периферії круга.

Разработана универсальная высокопроизводительная технология продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцевых и криволинейных поверхностей периферией и торцом одного узкого круга, со скрещенными осями его и детали. Повышение производительности обработки обеспечивается путем снятия чорнового припуска торцом круга в режиме однопроходного глубинного высокоскоростного шлифования, а точности – за счет чистового шлифования калибрующим разгруженным участком периферии круга.

The high velocity universal technology of traverse grinding for the external, cylindrical, gradative, conical, facing and quadratic curve surfaces by periphery of the same straight wheel with the crossed axes of abrasive instrument and processed detail was developed. The productivity increase was reached by high-speed metalcutting rough allowance to the face end of the grinding wheel.

В современном машиностроении широко используются детали с высокоточными цилиндрическими, коническими, торцевыми и криволинейными поверхностями, окончательное качество которых определяется операциями круглого шлифования. При изготовлении широкого класса этих деталей машин, необходимо с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механического состояния поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка.

Получение высокого качества изделий с высокой производительностью и гибкостью производства возможно с использованием универсальных технологий круглого шлифования на станках с ЧПУ. Известно, что внедрение операций шлифования на станках с ЧПУ отстает, например, от операций фрезерования. Главной причиной этого есть низкая стойкость профиля абразивного инструмента, в особенности при шлифовании криволинейных поверхностей, и нестабильность положения формообразующего участка круга из-за его износа. Итак, разработка и исследование универсальной высокопроизводительной технологии продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцовых и криволинейных поверхностей одним инструментом с разгруженным формообразующим участком является актуальной задачей.

В настоящее время существует несколько основных технологических схем продольного круглого шлифования. Наиболее распространенным является многопроходное шлифование периферией цилиндрического круга [1]. При продольной подаче  $S_0$  на оборот детали, которая равняется высоте  $B$  круга, данный метод является высокопроизводительным, но малоточным, поскольку неравномерность износа круга искажает его форму и, следовательно, образующую детали. При подаче детали  $S_0 = (0,1 \dots 0 \dots 0,2) \cdot B$  – точность повышается, но снижается производительность. К недостаткам этого способа шлифования относится также то, что формообразующий участок периферии круга не имеет стабильного осевого положения и перемещается вдоль оси вследствие износа круга.

Для повышения производительности при сохранении точности применяется способ глубинного однопроходного шлифования кругом с заборным конусом [2]. При изменении припуска на обработку заборный конус задействован не полностью, что приводит к снижению производительности обработки. При этом припуск, который снимается за оборот детали, остается постоянным, что не разгружает формообразующий участок круга. То есть, этот метод не является универсальным и, как следствие, используется в массовом производстве.

С целью фиксации формообразующего участка круга, что повышает точность и упрощает разработку управляющих программ для шлифования на станках с ЧПУ, предложен способ [3] и технология [4], где шлифование выполняется широким абразивным цилиндрическим кругом со скрещивающимися осями его и детали (рис. 1).

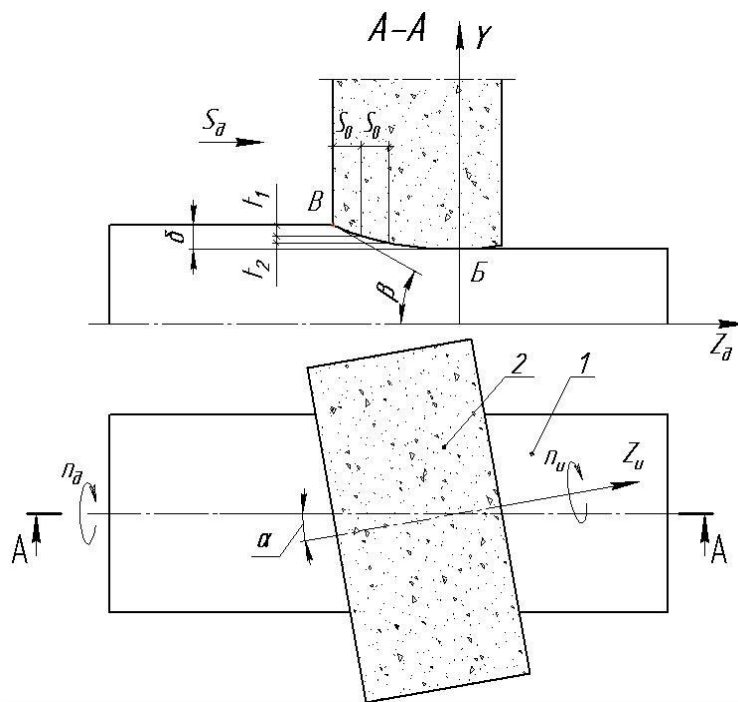


Рисунок 1 – Шлифование широким цилиндрическим кругом со скрещивающимися осями его и детали

Если повернутый круг 2 (рис. 1) рассечь плоскостью, которая проходит через ось вращения детали 1, то получим образующую круга в форме эллипса. Угол поворота  $\alpha$  выбирают таким, чтобы входная кромка круга В совпала с припуском  $\delta$  на обработку. Данный способ дает возможность при обработке деталей с разными припусками использовать всю периферию круга, что повышает производительность. При этом, при приближении к формообразующему участку Б, который совпадает с осью поворота круга Y, угол  $\beta$  наклона касательной в текущей точке эллиптического профиля и припуск  $t_\beta$ , который снимается за оборот детали, уменьшаются, что разгружает участок Б ( $t_2 < t_1$ ) и повышает точность обработки. Это дает возможность одновременно выполнять черновое шлифование в начале профиля В круга, затем, в процессе осевого перемещения детали относительно круга, чистовое шлифование и выхаживание на формообразующем участке Б. Этот способ используется при обработке жестких крупногабаритных деталей [4], например прокатных валков. Недостатком этого способа является также сложность обработки ступенчатых деталей.

Фирма Yunker (Германия) усовершенствовала способ [3] тем, что сьем чернового припуска из периферии круга вынесла на его торец [5], а чистовое шлифование и формообразование оставила как в способе [3]. Известно, что Yunker при использовании метода шлифования со

скрещивающимися осями круга и детали на станках Quickpoint 1001 и Quickpoint 1002 достигла повышения производительности шлифования в 5-6 раз [5] в сравнении с традиционным маятниковым шлифованием [1]. Но неизвестны причины такого возрастания производительности. Как видно из вышесказанного, методы шлифования со скрещивающимися осями шлифовального круга и детали имеют неиспользованные резервы, а возможность повышения производительности обработки в несколько раз подчеркивает актуальность этого направления.

Целью данной работы является повышение производительности и точности обработки, а также гибкости производства, за счет внедрения разработанного способа [6] и на его базе универсальной технологии продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцовых, криволинейных поверхностей, а также переходных канавок и радиусных сопряжений периферией и торцом одного узкого круга со скрещивающимися осями его и детали.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи.

Разработать математическую модель производительности нового способа [6] шлифования и выполнить ее исследование в зависимости от угла  $\alpha$  (рис. 2) скрещивания осей детали 1 и инструмента 2, их геометрических параметров и режимов шлифования.

Вывести аналитическую зависимость для получения рационального угла ориентации круга относительно детали.

Предложить циклы шлифования новым способом цилиндрических, ступенчатых, конусных и криволинейных поверхностей с целью их использования при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

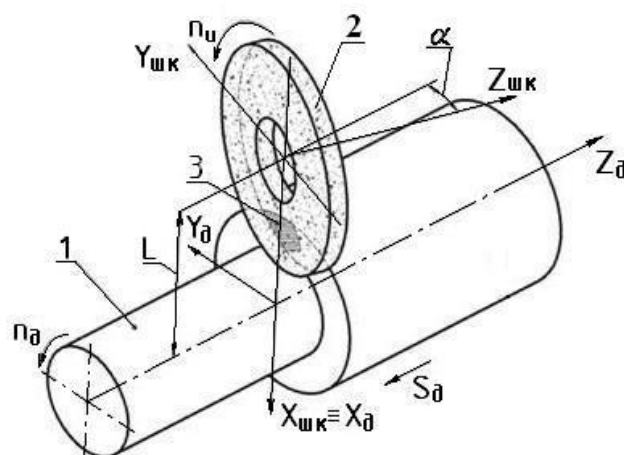


Рисунок 2 – Схема шлифования торцом и периферией круга

Расчет производительности шлифования со скрещивающимися осями детали и круга выполнен по методике, изложенной в работах [7, 8],

при этом, впервые определена непрерывная мгновенная линия и пятно контакта круга и детали, как на его торце так и на периферии. Схема процесса шлифования (рис. 2) включает шлифовальный круг 2, который повернут вокруг оси X на угол  $\alpha$ ; деталь 1 и пятно контакта 3.

Математическое моделирование производительности шлифования проведено с использованием программного пакета MathCAD 13. Для определения мгновенной линии контакта круга 2 и детали 1 необходимо записать радиус – вектор поверхности круга

$$S_{hK}(u, i) = A4(\alpha) \cdot A1(-L) \cdot A3(Z_{ShK}(i)) \cdot A6(u) \cdot A1(R_{ShK}(i)) \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

где  $A1...A6$  – матрицы преобразования систем координат, которые моделируют сдвиги и повороты вдоль и вокруг осей X, Y, Z [9];  $i$  – координата вдоль профиля круга;  $u$  – круговая координата;  $Z_{ShK}(i)$  – зависимость высоты круга от координаты  $i$  на профиле;  $R_{ShK}(i)$  – зависимость радиуса круга от координаты  $i$  на профиле;  $L$  – межосевое расстояние;  $\alpha$  – угол ориентации круга.

Точки линии контакта определяются из условия

$$\bar{n} \cdot \bar{V}_k = 0, \quad (2)$$

где  $\bar{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности круга 2 (рис. 2);  $\bar{V}_k$  – вектор скорости относительного движения круга в системе координат детали 1.

Вектор нормали равняется векторному произведению векторов, касательных к поверхности круга. Для их нахождения необходимо дифференцировать радиус-вектор (1) поверхности круга по обеим параметрам  $i$  и  $u$ . Для нахождения вектора  $\bar{V}_k$  относительной скорости необходимо перенести вектор (1) в систему координат детали и дифференцировать его по времени (по углу поворота вокруг оси детали).

$$S_{hKv}(u, i) = A3(p \cdot \theta) \cdot A4(\theta) \cdot A4(\alpha) \cdot A1(-L) \cdot A3(S_{ShK}(i)) \cdot A6(u) \cdot A1(R_{ShK}(i)) \cdot \bar{e}_4, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угловой параметр, который определяет положение круга в системе координат детали;  $p$  – параметр винтового движения.

Линия контакта начинается на периферии круга и заканчивается на его торце. Поворачивая линию контакта вокруг оси детали получим ее поверхность.

Пятно контакта ограничено линией контакта, а также линиями пересечения шлифовального круга и заготовки, смещенной на величину подачи на оборот.

На рис. 3 показанная зона обработки, где 1 – линия пересечения шлифовального круга и торца заготовки; 2 – линия пересечения внешнего цилиндра заготовки и шлифовального круга; 3 – линия контакта; 4 – деталь; 5 – шлифовальный круг; 6 – пятно контакта.

На рис. 4, показан профиль детали в точке Б (рис. 1) формообразования.

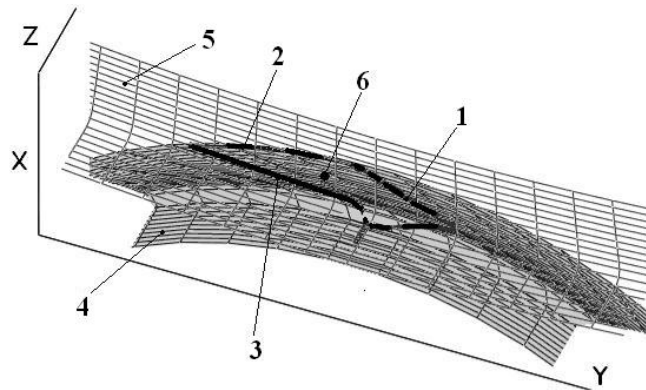


Рисунок 3 – Зона обработки

В связи с поворотом круга на угол  $\alpha$ , при шлифовании получается геометрическая шероховатость, которую можно определить как разность высоты профиля детали в точке поворота круга и точке, удаленной на половину подачи  $S_0$  на оборот детали (рис. 5).

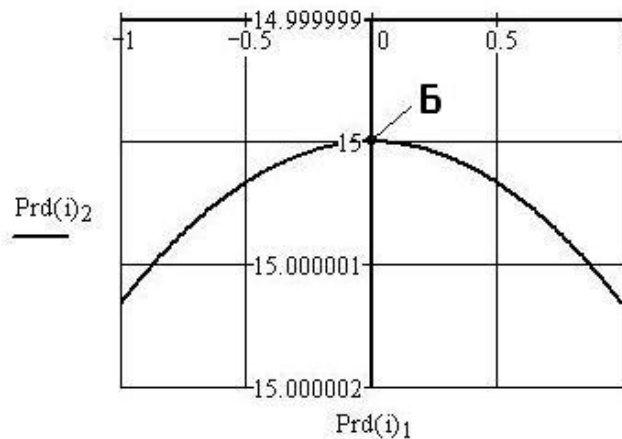


Рисунок 4 – Профиль детали в точке формообразования

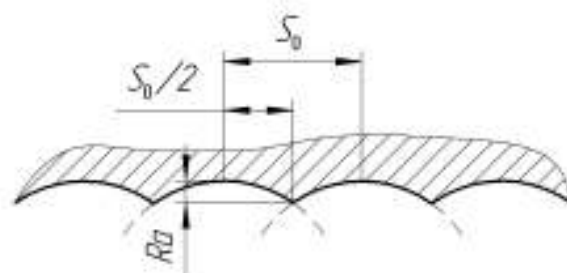


Рисунок 5 – Образование геометрической шероховатости

Расчетная величина геометрической шероховатости  $Ra_{geom}$  для следующих параметров:  $R_{шк} = 100 \text{ мм}$  – радиус шлифовального круга (рис. 2);  $n_{шк} = 2880 \text{ об/мин}$  – частота вращения шлифовального круга;  $R_{\partial} = 15 \text{ мм}$  – радиус обработанной детали (рис. 2);  $n_{\partial} = 200 \text{ об/мин}$  – частота вращения детали;  $r = 0,5 \text{ мм}$  – радиус округления кромки шлифовального круга (рис. 6);  $S_o = 0,1 \text{ мм/об}$  – продольная подача детали;  $t = 2 \text{ мм}$  – глубина резания; равняется  $Ra_{geom} = 0,331 \text{ мкм}$ .

Удельная производительность шлифования определяется из выражения

$$Q(i) = \int_{uu1(i)}^{uu2(i)} Vn(u, i) \cdot R_{ShK}(i) du, \quad (4)$$

где  $uu1(i)$  – углы входа круга в деталь;  $uu2(i)$  – углы выхода круга из детали;  $Vn(u, i)$  – произведение скорости относительного движения на единичную нормаль на поверхности круга в точке с координатами  $(u, i)$ .

На рис. 7  $i_{r \text{ поч}}$ ,  $i_{r \text{ кин}}$  – координаты начала и окончания радиусной кромки (рис. 6).

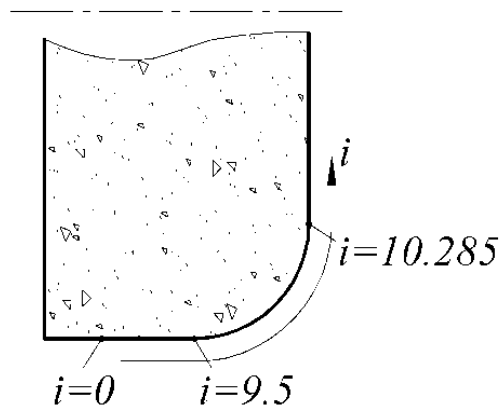


Рисунок 6 – Координата вдоль профиля круга

Задача оптимизации состоит в том, чтобы определить рациональный угол ориентации  $\alpha$  круга относительно детали для получения максимальной производительности.

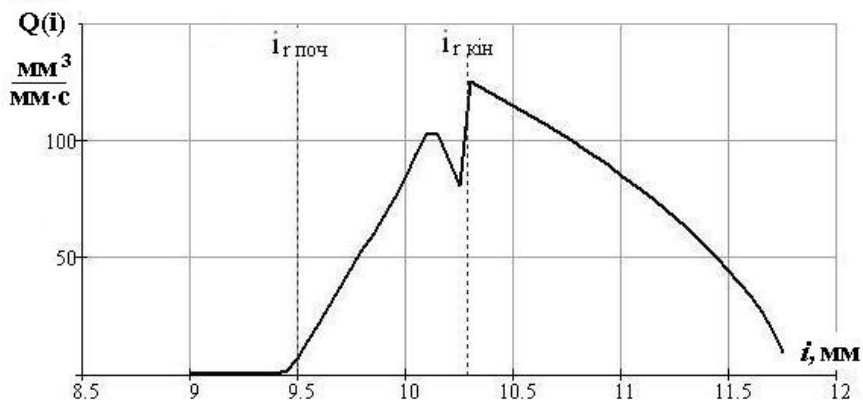


Рисунок 7 – Распределение удельной производительности шлифования по поверхности шлифовального круга

Линия контакта 3 и площадь пятна контакта 6 (рис. 3) могут занимать разное положение в зависимости от угла  $\alpha$  ориентации круга (рис. 2).

Зависимость площади  $F$  пятна контакта от угла  $\alpha$  ориентации круга приведена на рис. 8. Как видно из графика, существует некоторая неустойчивая область ( $\alpha \approx -0,1^\circ$ ), в которой происходит резкое изменение площади контакта. Этот угол соответствует углу наклона винтовой линии относительного движения круга. При переходе через указанный угол линия контакта изменяет свое направление, которое и приводит к резкому изменению площади контакта. То есть, торец круга отходит от детали и в процессе снятия припуска участия не принимает.

На рис. 9 показан график влияния угла  $\alpha$  ориентации круга на удельную производительность  $Q(i)$  шлифования. По оси абсцисс отложена координата  $i$  вдоль профиля круга. Координата  $i$  показана на рис. 6.

На графике (рис. 9)  $i_{r\text{ поч}}$ ,  $i_{r\text{ кін}}$  – координаты начала и окончания радиусной кромки шлифовального круга; 1...4 – точки окончания соответствующих графиков.

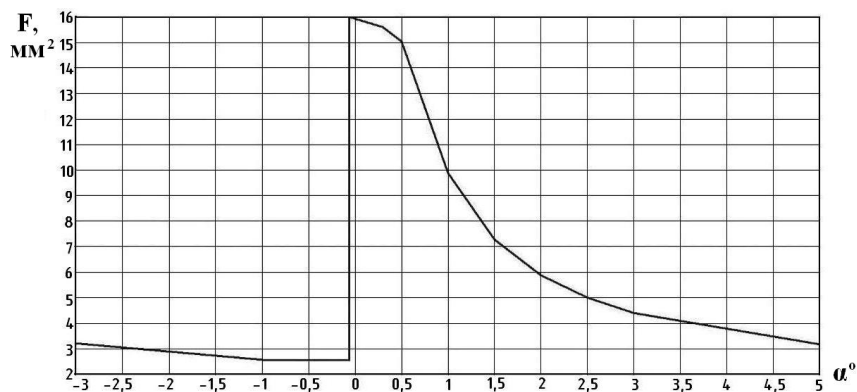


Рисунок 8 – Зависимость площади пятна контакта от угла ориентации круга



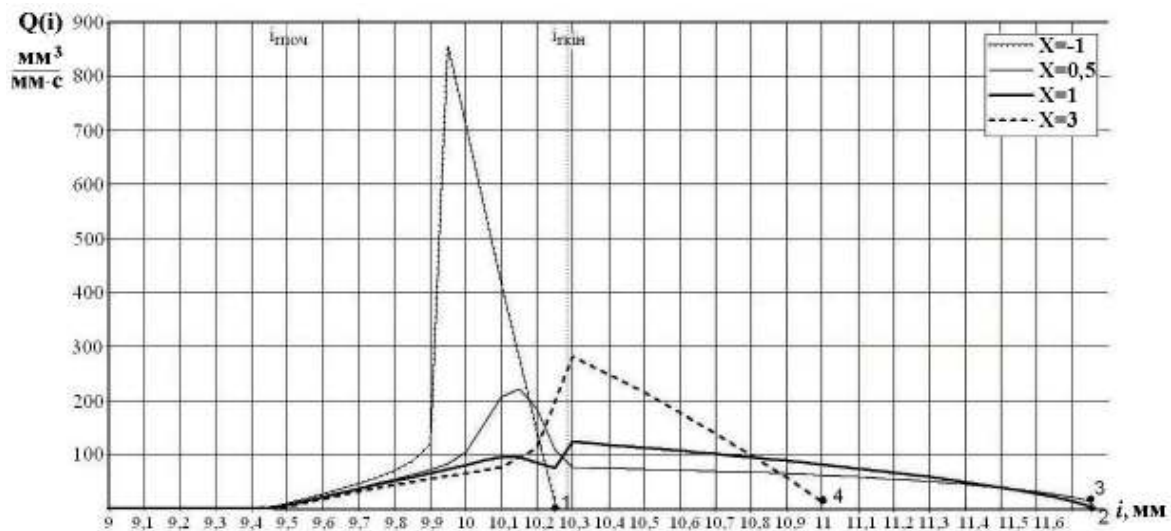


Рисунок 9 – Влияние угла ориентации круга на удельную производительность шлифования

То есть, область до  $i_{r\text{поч}}$  отвечает периферии круга, от  $i_{r\text{поч}}$  до  $i_{r\text{кин}}$  – переходной округленной кромке, после  $i_{r\text{кин}}$  – торцу круга. Графики приведены для четырех разных значений угла ориентации круга ( $\alpha = -1^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 3^\circ$ ). Точки 1, 2, 3, 4 показывают загрузенность профиля круга при шлифовании. То есть, при угле  $\alpha = -1^\circ$  торец круга совсем не загруженный, а припуск срезается исключительно переходной кромкой.

При переходе через критическое значение угла  $\alpha$  резко увеличивается площадь пятна контакта (рис. 8) и, как следствие, загрузенность торца круга (точка 3 на рис. 9). При дальнейшем увеличении угла  $\alpha$  площадь пятна контакта уменьшается, но загрузенность торца круга по высоте остается неизменной до значения угла  $\alpha = 1^\circ$  (точки 2 и 3 имеют одинаковую абсциссу). Дальнейшее увеличение угла ориентации круга приводит к уменьшению загрузенности торца круга (точка 4).

Оптимальный угол ориентации круга необходимо выбирать, исходя из следующих условий:

- площадь пятна контакта должна быть максимальной;
- удельная производительность шлифования должна быть равномерной вдоль профиля круга на черновом участке (торец круга) и минимальной на чистовом участке (периферия круга).

Выполнение этих требований обеспечит равномерный минимальный износ шлифовального круга и разгрузку калибрующего участка.

Как видно из рис. 9, наиболее рациональным есть угол ориентации круга  $\alpha = 1^\circ$ , при котором наблюдается наибольшая загрузка торца круга, практически плавное уменьшение удельной производительности на

переходной кромке от торца к периферии и разгруженную периферию. То есть, торец есть черновым участком и срежет основной припуск, переходная кромка – полуступичным участком, а периферия – чистовым и калибрующим.

Угол  $\alpha$ , который отвечает указанным требованиям, находим из выражения

$$\alpha = S_0 \cdot \sqrt{\frac{R+r}{2 \cdot R \cdot r \cdot t}} \quad (5)$$

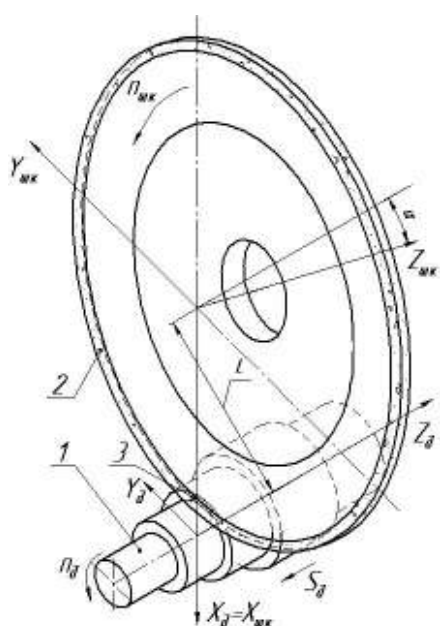


Рисунок 10 – Шлифование ступенчатой поверхности

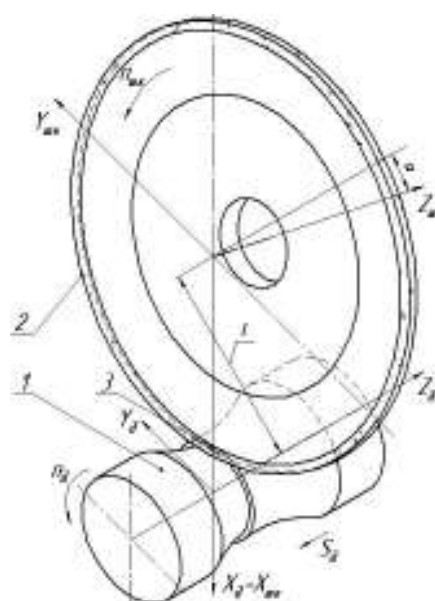


Рисунок 11 – Шлифование криволинейной поверхности

При использовании алмазных и эльборовых кругов с небольшой высотой (4-5 мм) на станках с ЧПУ предложенная технология является универсальной. Возможна практически полная обработка деталей типа вал с одной установки. То есть, одним кругом можно обрабатывать цилиндрические участки, торцы (рис. 10), криволинейные поверхности (рис. 11), конусы, канавки, радиусные сопряжения, что повышает гибкость производства. Проекция точки пересечения осей круга 2 (рис. 9-10) и детали 1 на ее осевую плоскость является базовой точкой при разработке циклов шлифования и управляющих программ для обработки на станках с ЧПУ.

Разработана универсальная технология продольного круглого шлифования, которая обеспечивает повышение производительности обработки за счет съема чернового припуска торцом круга в режиме однопроходного глубинного высокоскоростного шлифования, а точности за счет чистового шлифования калибрующим разгруженным участком периферии круга, так как суммарная сила резания при черновом шлифовании расположена параллельно оси детали.

Получена математическая модель производительности нового способа шлифования и выполнено ее исследование в зависимости от угла скрещивания осей детали и инструмента, их геометрических параметров и режимов шлифования. Повышение производительности шлифования по новой технологии в сравнении с традиционным продольным круглым шлифованием периферией круга в 2-3 раза.

Получено аналитическую зависимость для определения рационального угла ориентации круга относительно детали из условия получения максимальной производительности обработки при обеспечении необходимого качества.

В дальнейшем планируется исследование процесса шлифования разнообразных поверхностей со скрещивающимися осями детали и алмазного или эльборового кругов.

**Список литературы:** 1. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974.–320с. 2. Патент №50 – 636 (Япония) кл. В24В 53/100,1976, *Тоёда Коки К.К.* Способ правки шлифовального круга. 3. Авторское свидетельство СССР № 1234163, кл. В24В 5/04, 1984, *В.И. Кальченко.* Способ круглого шлифования с продольной подачей. 4. *Кальченко В.И.* Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента/ Диссертация... докт. техн. наук/ – Чернигов, 1994. – 491 с. 5. Круглое шлифование на станках с ЧПУ. Quickpoint 1001 и Quickpoint 1002 (проспект фирмы Yunker mashinen), Erwin Yunker, 1991 – 16 с. 6. Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель за заявкою №u200905574 В24В5/00 «Спосіб глибинного круглого шліфування зі схрещеними осями деталі і круга» /*Кальченко В.І., Кальченко В.В., Дмитренко М.А.* 2009 р. 7. *Кальченко В.В.* Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та оброблюваної деталі /Дисертація...докт. техн. наук/ Чернігів, 2006. – 372 с. 8. *Кальченко В.І., Кальченко В.В., Дмитренко М.А.* Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга //Вісник Чернігівського державного технологічного університету.– Чернігів: ЧДТУ, 2009 – Вип. № 37. – с. 64-72. 9. *Портман В.Т., Решетов Д.Н.* Точность металлорежущих станков.–М., 1986. – 320 с.