

С.В. Рябченко¹, В.Т. Федоренко¹, Я.Л. Сильченко¹, Л.Г. Полонский², А.Л. Мельник²

*Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины¹
Государственный университет «Житомирская политехника»²*

ШЛИФОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧАШЕЧНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

В работе представлен метод доводочного шлифования цилиндрических поверхностей до высоких классов чистоты алмазными кругами. Он заключается в том, что чашечный алмазный круг с помощью пружины поджимают к обрабатываемой детали с постоянным усилием и устанавливают так, что оси вращения круга и детали взаимно перекрещиваются под прямым углом. Это позволяет получить высокий класс чистоты обработанной поверхности. Несмотря на то, что этот способ изобретён сравнительно давно, в среде специалистов не прекращаются споры по поводу процессов, имеющих место в зоне контакта инструмент - деталь, дающих возможность произвести прецизионную обработку столь простыми и доступными средствами. Задача стояла переосмыслить и попытаться развить представления об этом процессе, взглянув на контактирующую пару заготовка - инструмент, как на динамическую систему. В работе получила развитие теория этого вида шлифования, с точки зрения на осуществляющую фрикционный контакт пару инструмент - обрабатываемый цилиндр, как на динамическую систему. В зоне контакта на рабочей поверхности круга появляется участок, который охватывает обрабатываемую цилиндрическую поверхность, что снижает уровень вибраций. В результате проведенной работы получило дальнейшее развитие теория доводочного шлифования цилиндрических поверхностей алмазными кругами.

Ключевые слова: шлифование; цилиндрическая поверхность; алмазный круг.

ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЧАШКОВИМИ АЛМАЗНИМИ КРУГАМИ

У роботі представлений метод довідного шліфування циліндричних поверхонь до високих класів чистоти алмазними кругами. Він заключається в тому, що чашечний алмазний круг за допомогою пружин підтискають до оброблюваних деталей з постійним зусиллям і встановлюють так, що вісі обертання круга та деталі взаємно перетинаються під прямим кутом. Це дозволяє отримати високий клас чистоти обробленої поверхні. Не дивлячись на те, що цей спосіб винайдений порівняно давно, в середовищі спеціалістів не припиняються суперечки з приводу процесів, що мають місце в зоні контакту інструмент - деталь, котрі дають можливість виконати прецизійну обробку настільки простими та доступними засобами. Задача стояла переосмислити і спробувати розвинути уявлення про цей процес, подивившись на контактуючу пару заготовка - інструмент, як на динамічну систему. В роботі отримала розвиток теорія цього виду шліфування, з точки зору здійснюючу фрикційний контакт пару інструмент - оброблюваний циліндр, як на динамічну систему. У зоні контакту на робочій поверхні круга з'являється ділянка, яка охоплює оброблювану циліндричну поверхню, що знижує рівень вібрацій. В результаті проведеної роботи отримало подальший розвиток теорія доводочного шліфування циліндричних поверхонь алмазними колами.

Ключові слова: шліфування; циліндрична поверхня; алмазний круг.

GRINDING OF CYLINDRICAL SURFACES CUP DIAMOND CIRCLES

A method for finishing grinding of cylindrical surfaces to high purity classes by diamond wheels was presented in this work. It is that a cup diamond wheel is pressed by springs to the processed part with a constant force and is set so that the axes of rotation of the wheel and the processed part mutually intersect at right angles. This provides a high class of surface finish. Despite the fact that this method was invented a relatively long time ago, among specialists discussions continue about the processes taking place in the contact zone between the tool and the part that make it possible to perform precision processing by such simple and available means. It was tasked with rethink and try to develop understanding of this process, by looking at the contacting pair of a blank - a tool, as a dynamic system. The theory of this type of grinding has evolved in this work from the point of view of a pair of tools - a machined cylinder performing frictional contact as a dynamic system. In the contact zone on the working surface of the circle appears a section that covers the processed cylindrical surface, which reduces the level of vibrations. As a result of this work, the theory of finishing grinding of cylindrical surfaces with diamond wheels was further developed.

Key words: grinding; cylindrical surface; diamond wheel.

Проблема шлифования цилиндрических поверхностей. Способ доводочного шлифования цилиндрических поверхностей до высоких классов чистоты кругами из синтетических алмазов известен сравнительно давно. Он заключается в том, что чашечный алмазный круг с помощью пружины поджимают к обрабатываемой детали с постоянным усилием и устанавливают так, что оси вращения круга и детали взаимно перекрещиваются под прямым углом (рис. 1). Это позволяет получить высокий класс чистоты обработанной поверхности [1].

© С.В. Рябченко, В.Т. Федоренко, Я.Л. Сильченко, Л.Г. Полонский², А.Л. Мельник

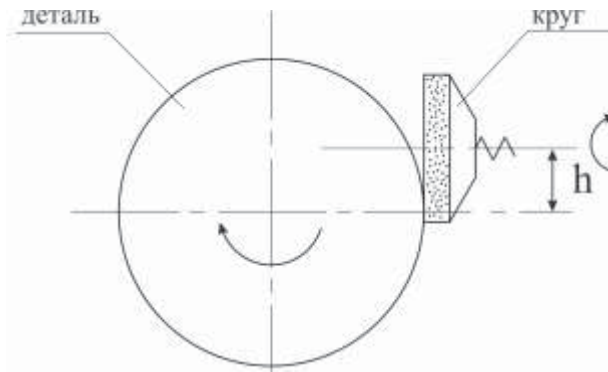


Рис. 1. Способ доводочного шлифования цилиндрической поверхности чашечным кругом (h – расстояние между осями)

Движение подачи осуществляется, как правило, перемещением вращающегося алмазного круга вдоль оси вращения детали. Несмотря на то, что этот способ изобретён сравнительно давно, в среде специалистов не прекращаются споры по поводу процессов, имеющих место в зоне контакта инструмент – деталь, дающих возможность произвести прецизионную обработку столь простыми и доступными средствами. Работы, посвящённые теории данного метода шлифования очень немногочисленны и, на наш взгляд, не отражают в полной мере сущности реальных явлений.

Анализ предыдущих исследований. Актуальность данной работы состоит в том, что до настоящего времени существует проблема финишной обработки валков большого диаметра (диаметром ~ 400 мм и длиной ~ 2000 мм) из нержавеющей стали, используемых в технологических процессах получения тонких органических плёнок [2]. Данная задача заставляет переосмысливать и пытаться развивать представления об этом процессе, в т. ч., и через взгляд на контактирующую пару заготовка – инструмент, как на динамическую систему.

Из-за сложности процессов, происходящих в данном случае шлифования, пока не ставится задача сформулировать условия получения наперёд заданной шероховатости, первоначально достаточным может быть объяснение эффективности данного способа обработки, попытки которого уже предпринимались в работах [1–4, 7].

Цель исследований. Дальнейшее развитие теории доводочного шлифования цилиндрических поверхностей алмазными кругами.

Основная часть. В упомянутых ранее работах, опираясь на классические представления о процессе шлифования, авторы построили свою теорию, взяв за основу два утверждения.

Утверждение первое – для достижения высокого класса шероховатости поверхности при шлифовании, необходимо создать такие условия, чтобы на единицу обрабатываемой поверхности приходилось максимально возможное количество режущих зёрен, с чем можно безоговорочно согласиться. Однако, далее автор делает к этому утверждению дополнение, связывающее получаемую шероховатость обработанной поверхности с величиной площадки контакта круга с деталью. При этом утверждается, что с увеличением площади контакта пропорционально повышается количество зёрен, участвующих в формировании обработанной поверхности, уменьшается нагрузка на зёрна, и как следствие этих факторов уменьшается величина микронеровностей обработанной поверхности. С этим дополнением можно согласиться только отчасти, дав соответствующие пояснения, а именно, что это дополнение в большей мере относится к случаям шлифования плоских поверхностей, как чашечными кругами, так и кругами формы 1А1. В рассматриваемом здесь случае шлифования дело обстоит несколько сложнее. При данной схеме шлифования обрабатывается не плоская, а цилиндрическая поверхность. Рассуждения на этот счёт мы приведём впереди.

Утверждение второе – для достижения высокого класса чистоты необходимо, чтобы образуемые при шлифовании риски-царапины имели наибольшую протяжённость. Что касается связи длины царапин, оставляемых зёрнами на обработанной поверхности, с параметрами шероховатости Rz и Ra , то такая связь представляется нам бездоказательной. В этом случае можно говорить только о «сетке», своеобразном узоре, при определённых условиях формируемой следами зёрен на поверхности изделия и которая может переноситься на плёнку. Угол наклона рисок-царапин при этом подчиняется зависимости:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{r^2 - h^2}}{h}, \quad (1)$$

где r – расстояние от центральной оси чашечного круга до режущего зерна.

Согласно [1], если $h = 0$ (рис. 2), то круг контактирует с изделием двумя плоскими участками b и суммарная площадь контакта минимальная (r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы алмазонасного слоя; L – длина пятна контакта).

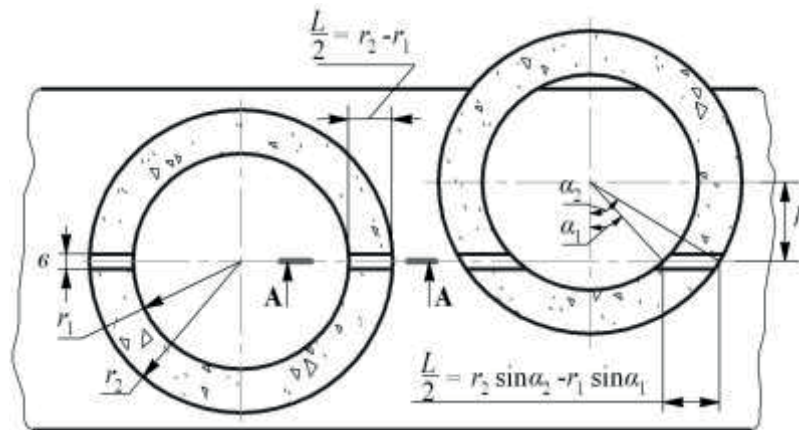


Рис. 2. Фронтальная проекция зоны контакта круг-цилиндр при $h < r_1$

Как видно (рис. 3), с изменением положения изделия относительно круга, а именно, с увеличением h до величины r_1 , увеличивается суммарная площадь контакта круга с изделием за счёт увеличения L (см. рис. 2).

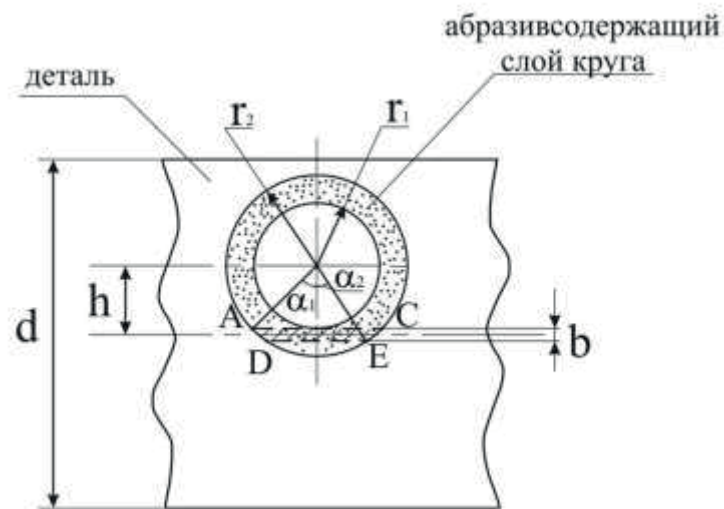


Рис. 3. Фронтальная проекция зоны контакта круг-цилиндр при $h > r_1$
(d – диаметр обрабатываемого цилиндра)

Одним из недостатков подхода, который используется в работе [1], мы считаем то, что авторы рассматривают формирование шероховатости на площадке контакта алмазонасного слоя с обрабатываемой поверхностью, исходя из того, что контакт является плоской площадкой. Некорректность такого подхода представляется нам по двум причинам.

Первая причина. Фрикционный контакт в случае, показанном на рис. 2 (при $h < r_1$), представляет собой часть поверхности вращения, радиальное сечение которой ограничено частью эллипса. На рис. 4 меньшая полуось равна глубине шлифования t (если считать технологическую систему абсолютно жёсткой). Об особенностях формы контакта круга с обрабатываемой поверхностью при $h > r_1$ (см. рис. 3), которая имеет очень важное значение для понимания процесса, можно сказать следующее.

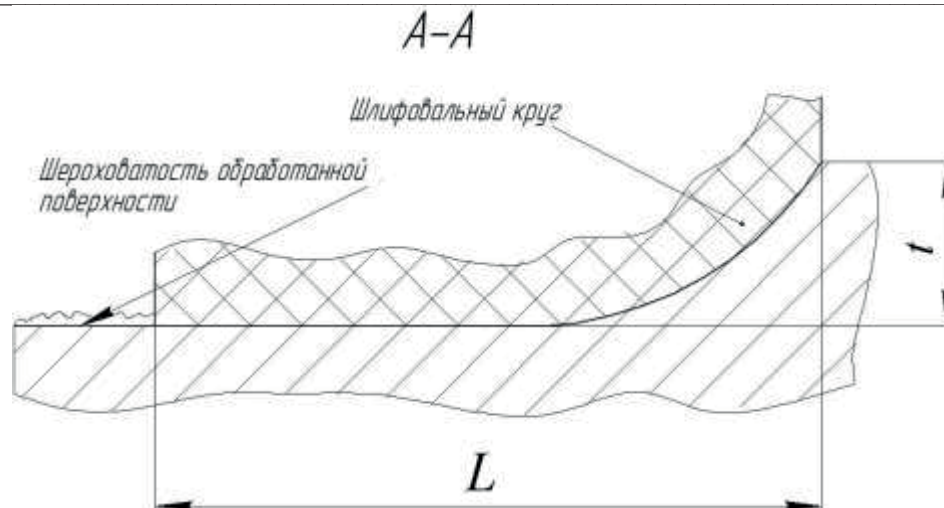


Рис. 4. Сечение А-А поверхности круга на рис. 2 плоскостью

Абсолютно жёсткая технологическая система подразумевает наличие в ней качества, заключающегося в том, что жёсткость $J = \infty$ [5].

Вторая причина. Представим процесс шлифования по описываемой схеме при абсолютно жёсткой технологической системе. Можно согласиться, что при доводочном шлифовании, когда глубина шлифования t составляет несколько микрон и меньше, кривизна площадки контакта очень мала и её можно признать плоской. Однако, это возможно только при $h < r_1$, (как это и делается в работах [1–2]) и при этом нужно отметить, что такая площадка может существовать лишь при неподвижном барабане. В реальности, при вращающемся барабане, такая площадка отсутствует. Как не существует и воображаемой шероховатости на этой воображаемой площадке, якобы зависящей от количества зёрен, одновременно её формирующих. К тому же, воображаемая шероховатость этой воображаемой площадки (если бы такая существовала) была бы неравномерной, так как зёрна, расположенные в центре контакта, делали бы самые глубокие царапины. Царапины, производимые остальными зёрнами, были бы по мере их удаления от центра всё мельче. Как станет ясно по ходу нашего исследования, такое упрощение, как признание формы контакта плоским, является непродуктивным. Отказавшись от такого упрощения, в дальнейшем будем представлять фрикционный контакт «алмазный круг-деталь» не плоским, а трёхмерным, называя его «зоной контакта». Это поможет нам в дальнейшем более ясно представлять ход процессов, протекающих при нём [5–6].

Пойдя на идеализацию, представим технологическую систему абсолютно жёсткой. Рассмотрение начнём с положения круга относительно обрабатываемого цилиндра, когда $h = 0$. При перемещении (подаче) вращающегося круга вдоль оси подвергнутого шлифованию цилиндра на поверхности последнего образуется след, представляющий собой винтообразную ленту (рис. 5).

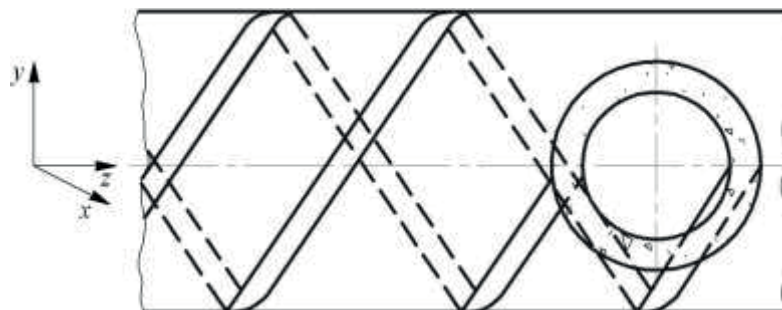


Рис. 5. След, оставляемый алмазоносным слоем круга на поверхности цилиндра

Винтовая линия записывается системой следующих уравнений [3]:

$$x = \frac{d}{2} \cos \phi ; \quad y = \frac{d}{2} \sin \phi ; \quad z = \frac{d}{2} p \phi , \quad (3)$$

где d – диаметр цилиндра; φ – угол поворота пятна контакта круга и обрабатываемого цилиндра вокруг оси цилиндра; $p = \frac{u}{\phi}$ – параметр винтообразной ленты; u – скорость перемещения; ϕ – ось вращения круга относительно оси вращения цилиндра.

Необходимые условия для того, чтобы цилиндрическая поверхность была полностью обработана (см. рис. 2 и 3 соответственно):

$$\sqrt{r_2^2 - h^2} - \sqrt{r_1^2 - h^2} \geq 2\pi p \text{ – для случая, когда } h < r_1;$$

$$\sqrt{r_2^2 - h^2} \geq 2\pi p \text{ – для случая, когда } h \geq r_1.$$

Однако, для чистовой обработки эти условия не представляют практического интереса. Из опыта известно, что высокое качество поверхности получается при подачах 0,2...0,3 мм на оборот изделия.

В реальном процессе технологическая система не обладает абсолютной жёсткостью, поэтому малая ось эллипса в разы превышает t , но это, в принципе, не отражается на ходе рассуждений. Шероховатость обработанной поверхности при шлифовании поверхности в общем случае зависит от многих факторов. В частности, от величины продольной подачи, скорости вращения круга, формы и характеристики рабочего слоя, физических и химических свойств обрабатываемого материала, жёсткости технологической системы, температурного режима, степени пластической деформации срезаемого и поверхностного слоёв материала. В данной работе мы не рассматриваем процесс финишного шлифования глубоко, с учётом вышеперечисленных факторов, а только ограничиваемся фактическим материалом, полученным из практики [8–9].

Он заключается в том, что при обработке барабанов диаметром 400 мм из нержавеющей стали наименьшая шероховатость ($Ra = 0,025$ мкм) получается при скорости шлифования $V_{кр} = 13...15$ м/сек, продольной подаче круга $S_{пр} \approx 0,2...0,3$ мм/об, скорости вращения обрабатываемого барабана $V_{вр} \approx 12$ об/мин, при использовании специальной органической связки и алмазов АСМ зернистостью 40/28, применении смазывающе-охлаждающих технологических сред. Это, с одной стороны, ведёт к сужению рамок исследования, определённой потере универсальности и общности выводов, их привязке к конкретному технологическому процессу [4, 10–11].

Такой подход не даёт возможности, в принципе, сформулировать условия для получения наперёд заданной шероховатости поверхности. Однако, с другой стороны, он вполне даёт возможность, исследуя процесс, установить, объяснить и теоретически обосновать наиболее благоприятное относительное расположение осей вращения обрабатываемой цилиндрической поверхности и чашечного шлифовального круга с точки зрения получения наименьшей шероховатости поверхности. При этом предоставляется возможность отказаться от рассмотрения факторов, установление влияния которых сопряжено с определёнными методологическими трудностями.

Выводы. В результате проведенной работы получила дальнейшее развитие теория доводочного шлифования цилиндрических поверхностей алмазными кругами. Уточнено условие обеспечения оптимального контакта алмазного чашечного круга и обрабатываемой цилиндрической поверхности. Это условие позволяет обеспечить получение минимальной шероховатости поверхности валков.

Литература:

1. Мишнаевский Л.Л., Карпусь А.Н., Рябченко С.В. Качество поверхности деталей машин при шлифовании кругами из сверхтвёрдых материалов / Л.Л. Мишнаевский, С.В. Рябченко, А.Н. Карпусь // Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин: сб. науч. работ / АН УССР. Ин-т сверхтвёрдых материалов. – К., 1987. – С. 39-45
2. Рябченко С.В., Федоренко В.Т., Сильченко Я.Л., Чуйко Л.Д. Финишная обработка валков из нержавеющей стали для получения полиамидных пленок / С.В. Рябченко, В.Т. Федоренко, Я.Л. Сильченко, Л.Д. Чуйко // Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 02-06 июня 2014 г., г. Свалява. Киев, АТМ Украины, 2014. – С. 135 – 137.

3. Рябченко С.В., Федоренко В.Т., Сильченко Я.Л. Процесс чистового шлифования цилиндрических поверхностей чашечными алмазными кругами. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – Вып.21. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля НАН Украины, 2018.- с. 427-433.
4. Рябченко С.В., Сильченко Я.Л., Федоренко В.Т., Полонский Л.Г., Яновский В.А. Исследование качества обрабатываемой поверхности зубчатых колес после шлифования кругами из КНБ Процеси механічної обробки в машинобудуванні, Зб. наук. праць. Житомир ЖДТУ, 2015. – Вип.. 15. с. 167-177.
5. Рябченко С.В., Середа Г.В. Перспективные технологии шлифования высокоточных зубчатых колес тарельчатыми кругами. «Инженер-механик»: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал. – Минск: «Белорусское общество инженеров-механиков», 2015, №2(67), - с. 28-29.
6. Riabchenko, S., Lavrinenko V, Sheiko M, Paschenko E. Elaboration of technology for making the European nomenclature high-porous abrasive wheels of monocrystalline corundum using a precision instrument of superhard materials for turbo-building of Ukraine Science and Innovation: Academic and Research Journal. – Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, 2018, volume 14(5). p. 49-56.
7. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рябченко С.В. Экспериментальні дослідження шліфувальних кругів. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо-и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 26-29 сентября 2018г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – с. 93-96.
8. Лавріненко В.І., Шейко М.М., Пащенко Є.О., Рябченко С.В. Відпрацювання технології формотворення високопористих абразивних кругів з монокристалічного корунду прецизійним інструментом з надтвердих матеріалів. Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 18-го Международного научно-технического семинара, 10-16 февраля 2018 г., г. Брно. – Киев: АТМ Украины, 2018. – с. 150-152.
9. Рябченко С.В. Шлифование зубчатых колес кругами из сверхтвердых материалов. Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky – Journal Academic Society of Michal Baludansky – Kosice, Slovakia, volume 7, No 1/2019.- p. 79- 83.
10. Riabchenko Serhii, Krivosheja Anatoliy. Grinding gears by superhard materials wheels 6th International BAPT Conference “POWER TRANSMISSIONS 2019” 19-22.06.2019, Varna, Bulgaria с. 93 – 97.
11. Pashchenko, E.O., Kukhareno, S.A., Riabchenko, S.V, Bychykhin, V.M., Shatokhin, V.V. Development of the Technology for Manufacturing and Introducing a New Class of Tools with CVD–Diamond for Grinding High-Precision Gear Wheels of Special Reducer Units. *Sci. innov.* 2020. V. 16, № 1. [https:// doi.org/10.15407/scin16.01.069](https://doi.org/10.15407/scin16.01.069).