

process]. *Promyshlennye izmereniia, kontrol, avtomatizaciia, diagnostika (PiKAD)*, 3, 24–26 [in Russian].

УДК 621.923

**С. В. Рябченко**, канд.техн.наук; **В. Т. Федоренко**, **Я. Л. Сильченко**, инженеры

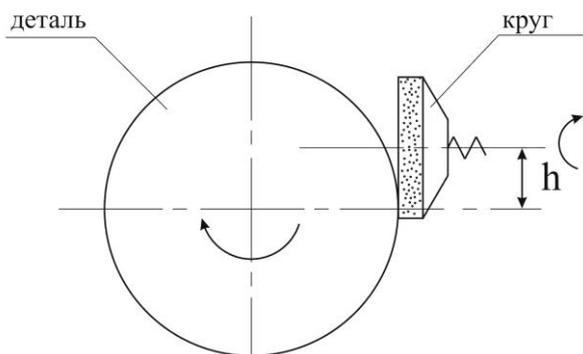
*Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская 2,  
04074 г. Киев, e-mail: s.riabchenko@ukr.net*

### ПРОЦЕСС ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧАШЕЧНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

*В работе представлен метод доводочного шлифования цилиндрических поверхностей до высоких классов чистоты алмазными кругами. 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.*

**Ключевые слова:** шлифование, цилиндрическая поверхность, алмазный круг.

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].



*Рис.1. Метод 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.

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 [5]. Эта задача стимулировала нас переосмыслить и попытаться развить представления об этом процессе, взглянув на контактирующую пару заготовка – инструмент, как на динамическую систему.

Из-за сложности процессов, происходящих в данном случае шлифования, мы не ставили перед собой задачу сформулировать условия получения наперёд заданного класса шероховатости, а лишь дать объяснение эффективности данного способа обработки.

В работах [1–3], опираясь на классические представления о процессе шлифования, авторы построили свою теорию, взяв за основу два утверждения.

Утверждение первое – для достижения высокого класса шероховатости обработанной 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. Именно на этом дополнении строятся дальнейшие рассуждения.

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 шероховатости необходимо, чтобы образуемые при шлифовании риски-царапины имели наибольшую протяжённость. Что касается связи длины рисок, оставляемых зёрнами на обработанной поверхности с

параметрами шероховатости  $R_z$  и  $R_a$ , то такая связь представляется нам бездоказательной. В этой связи можно говорить только о «сетке», своеобразном узоре, при определённых условиях формируемой следами зёрен на поверхности изделия и которая может переноситься на плёнку. Угол наклона риска, при этом, подчиняется зависимости следующей зависимости:

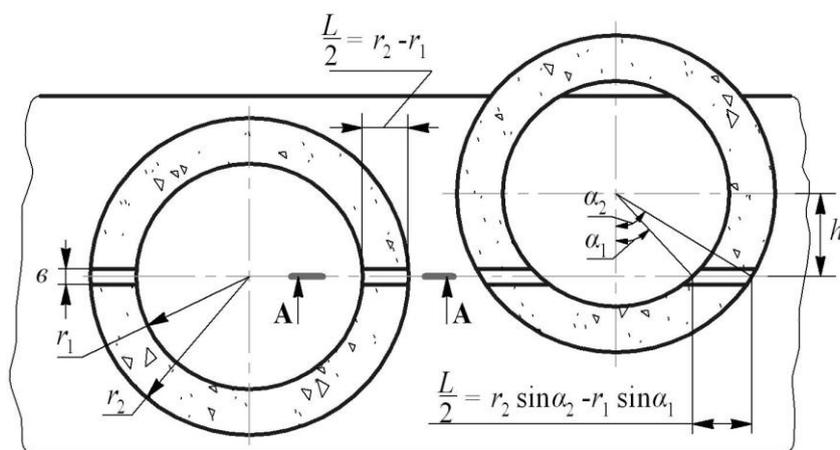


Рис. 2. Фронтальная проекция зоны контакта круг – цилиндр при  $h < r_1$

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

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

Согласно [1, 2], при этом условии  $h = 0$  (рис. 2) круг контактирует с изделием двумя плоскими участками и суммарная площадь контакта минимальна.

Как видно из рис. 2, 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 длины площадей контакта –  $L$  (рис. 3).

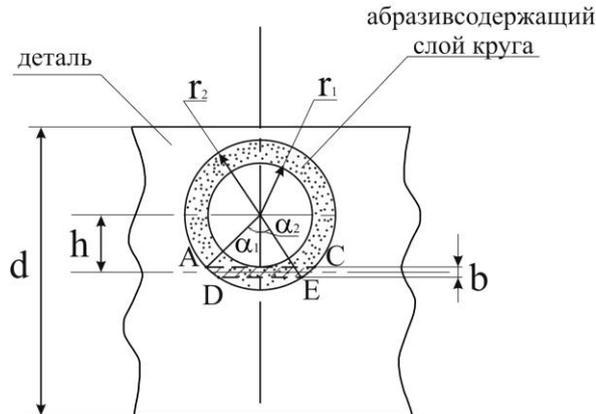


Рис. 3. Фронтальная проекция зоны контакта круг – цилиндр при  $h > r_1$

сечение которой ограничено частью эллипса. На рис. 4, меньшая полуось равна глубине шлифования –  $t$ , если принять систему СПИД абсолютно жёсткой. Об особенностях формы

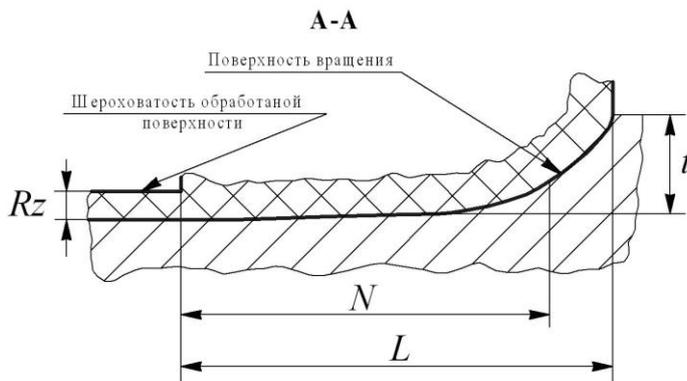


Рис. 4. Сечение A-A (на рис.2) поверхности круга плоскостью

мы понимаем наличие в ней качества, заключающегося в том, что  $J = \infty$ .

Причина вторая – представим процесс шлифования по описываемой схеме при абсолютно жёсткой системе СПИД. Можно согласиться, что при доводочном шлифовании, когда глубина шлифования составляет величину порядка нескольких микрон и меньше, кривизна площадки контакта очень мала и её можно, признать плоской. Однако, только при  $h < r_1$ , (как это и делается в работах [1, 2]) и при этом можно отметить, что такая площадка может существовать только при неподвижном барабане. В реальности, при вращающемся барабане, такая площадка не существует. Как не существует и воображаемая шероховатость на этой воображаемой площадке, якобы зависящей от количества зёрен, одновременно её формирующих. К тому же воображаемая шероховатость этой воображаемой площадки, была бы неравномерной, так как зёрна, расположенные в центре контакта делали бы самые

Одним из недостатков подхода, который используется в работах [1, 2], мы считаем то, что автор рассматривает формирование шероховатости на площадке контакта алмазоносного слоя с обрабатываемой поверхностью, исходя из того, что контакт является плоской площадкой. Некорректность такого подхода представляется нам по двум причинам.

Фрикционный контакт в случае  $h < r_1$  (рис. 2), представляет собой часть поверхности вращения, радиальное сечение которой ограничено частью эллипса. На рис. 4, меньшая полуось равна глубине шлифования –  $t$ , если принять систему СПИД абсолютно жёсткой. Об особенностях формы контакта круга с обрабатываемой поверхностью при  $h > r_1$  (рис. 3), которая имеет очень важное значение для понимания процесса, мы скажем ниже.

Жесткость  $J$  согласно [6] определяется следующим образом:

$$J = \frac{\Delta P}{\Delta \alpha} \left[ \frac{\text{кГ}}{\text{мм}} \right],$$

где  $\Delta P$  – приращение нагрузки, кГс;  $\Delta \alpha$  – приращение упругого отжатия, мм.

Под идеализированной, абсолютно жёсткой системой СПИД,

глубокие царапины. Царапины, производимые остальными зёрнами, были бы всё мельче, по мере их удаления от центра. Как станет ясно по ходу нашего исследования, такое упрощение, как признание формы контакта плоским, является непродуктивным. Мы откажемся от такого упрощения, и 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 в нём.

Пойдя на идеализацию, представим систему СПИД 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 цилиндра образуется след, представляющий собой винтообразную ленту (рис. 5).

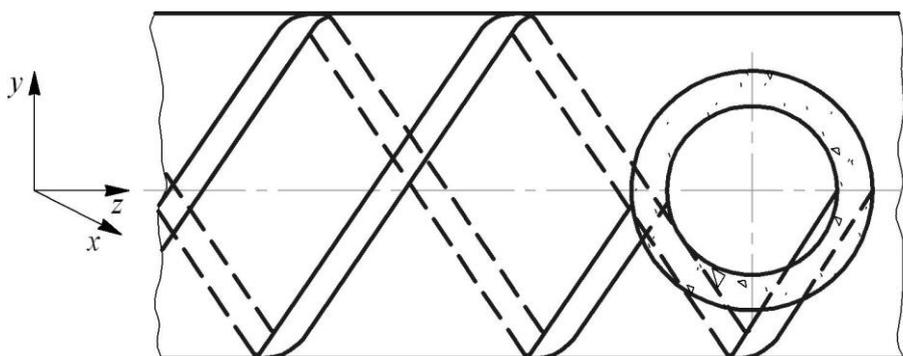


Рис. 5. След, оставляемый алмазосносным слоем круга на поверхности цилиндра

Винтовая линия записывается системой следующих уравнений [7]

$$x = \frac{d}{2} \cos \varphi; \quad y = \frac{d}{2} \sin \varphi; \quad z = \frac{d}{2} p \varphi,$$

где  $d$  – диаметр цилиндра;  $\varphi$  – угол поворота пятна контакта круга и обрабатываемого цилиндра вокруг оси цилиндра;  $p = \frac{u}{\omega}$  параметр винта,  $u$  – скорость перемещения;  $\omega$  – угловая скорость вращения цилиндра.

Необходимые условия, чтобы цилиндрическая поверхность была полностью обработана.

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

$$\sqrt{r_2^2 - h^2} \geq 2\pi p, \text{ для случая, когда } h \geq r_1, \text{ (рис. 3)}$$

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

В реальном процессе система СПИД не обладает абсолютной жёсткостью, поэтому малая ось эллипса в разы превышает глубину шлифования, 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 системы СПИД, температурного режима, степени пластической деформации срезаемого и поверхностного слоёв материала. В данной работе мы не рассматриваем глубоко процесс финишного шлифования, с учётом вышеперечисленных факторов, а только ограничиваясь фактическим материалом, полученным из практики.

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

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 шлифующего 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 получило дальнейшее развитие теория доводочного шлифования цилиндрических поверхностей алмазными кругами. Уточнено условие обеспечения оптимального контакта алмазного чашечного круга и обрабатываемого вала. Это условие позволяет обеспечить получение минимальной шероховатости цилиндрической поверхности валков.

*В роботі представлено метод доводочного шліфування циліндричних поверхонь до високих класів чистоти алмазними кругами. Набула розвитку теорія цього різновиду шліфування з погляду на здійснюючу фрикційний контакт пару інструмент – циліндр який обробляється, як на динамічну систему. В зоні контакту на робочій поверхні круга з'являється ділянка, яка охоплює циліндричну поверхню, яка обробляється, що знижує рівень вібрацій.*

**Ключові слова:** шліфування, циліндрична поверхонь, алмазний круг.

### **S. V. Riabchenko, V. T. Fedorenko, Ya. L. Silchenko THE FINISH GRINDING PROCESS OF CYLINDRICAL SURFACES BY CUP GRINDING DIAMOND WHEELS**

*The paper presents a method of finishing polishing cylindrical surfaces to high purity classes with diamond circles. The theory of this type of grinding has been developed, from the point of view of a tool that performs a frictional contact - a machining cylinder, as a dynamic system. In the contact area, a section appears on the working surface of the circle, which covers the cylindrical surface to be treated, which reduces the level of vibrations.*

**Key words:** grinding, cylindrical surfaces, diamond wheel.

### Литература

1. Мишнаевский Л. Л. Исследование процесса доводочного шлифования цилиндрических поверхностей торцом алмазного круга: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1963. – 24 с.
2. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов – К. : Наук. думка, 1982. – 192 с.
3. Карпусь А. Н. Алмазное шлифование титановых барабан-катодов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: 1984. – 25 с.
4. Мишнаевский Л. Л., Рябченко С. В., Карпусь А. Н. Качество поверхности деталей машин при шлифовании кругами из сверхтвёрдых материалов / Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин: Сб. науч. работ. АН УССР. Ин-т сверхтвёрдых материалов. – К., 1987. – С. 39–45.
5. Рябченко С.В., Федоренко В.Т., Сильченко Я.Л., Чуйко Л.Д. Финишная обработка валков из нержавеющей стали для получения полиамидных пленок / 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.
6. Балакшин Б. С. Теория и практика технологии машиностроения, книга 2. – М. : Машиностроение, 1982. – 367 с.
7. Люкшин В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов – М.: Машиностроение, 1968. – 372 с.

Поступила 28.05.18

### References

1. Mishnayevesky, L. L. (1963). Issledovanie processa dovodocnogo shlifovaniya cilindricheskikh poverhnostej torcem almaznogo kruga [Investigation of the process of finishing polishing cylindrical surfaces of the end face of a diamond circle]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Perm [in Russian].
2. Mishnaevskii, L. L. (1982). *Iznos shlifovalnikh krugov [Wear of grinding wheels]*. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
3. Karpus, A. N. (1984) Almaznoe shlifovanie titanovih baraban-katodov [Diamond grinding of titanium drum-cathodes]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kiev [in Russian].
4. Mishnaevskii, L. L., Riabchenko, S. V., & Karpus, A. N. (1987) Kachestvo poverkhnosti detalei mashin pri shlifovanii krugami iz sverkhтверdikh materialov [Surface quality of machine parts when grinding with circles of superhard materials ] *Kachestvo poverkhnosti i ekspluatacionnie svoistva detalei mashin [Surface quality and performance properties of machine parts]*. AN UkSSR. Institut sverkhтверdikh materialov. (pp. 39–45). Kiev [in Russian].
5. Ryabchenko, S. V., Fedorenko, V. T., Silchenko, Ya. L., & Chuiko, L. D. (2014). Finishnaia obrabotka valov iz nerzaveiuchei stali dla poluceniia poliamidnikh plenok [Finishing of stainless steel rolls for production of polyamide films]. Proceedings from Surface Engineering and Renovation of Products '14: *XIV Mezhdunarodnaia nauchnotekhnicheskaiia konferentsiia (2–6 iunია 2014 hoda, Svaliava) – 14th International Scientific and Technical Conference*. (pp. 135–137). Kiev [in Russian].
6. Balakshin, B. S. (1982). *Teoriia i praktika tekhnologii mashinostroeniia, kniha 2 [Theory and practice of engineering technology, book 2]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

7. Liukshin, V. S. (1968) *Teoriia vintovikh poverkhnostei v proektirovanii rezhuzhchikh instrumentov [Theory of screw surfaces in the design of cutting tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

УДК 621.941: 534.647

**Л. М. Девін, д-р техн. наук; С. В. Ричев, С. Н. Іванов**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,  
04074 м. Київ, e-mail: ldevin@ism.kiev.ua*

### **ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТ - ДЕТАЛЬ ДЛЯ РІЗНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПІДСТАВІ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**

*В роботі досліджено вплив вибору інструментального надтвердого матеріалу і режимів тонкого точіння на рівень сигналів акустичної емісії. Для цього при точінні алюмінієвого сплаву при терті задньої поверхні інструмента об оброблений матеріал для монокристалічних різців із природного, синтетичного алмазу, а також твердого сплаву ВК6 сигнали АЕ поділяли на дві частини. Вдалося встановити відмінності реєстрованих сигналів АЕ в залежності від вибраного ріжучого матеріалу, а також проаналізувати вплив глибини, подачі та швидкості різання на середньоквадратичне відхилення сигналів  $AE_{RMS}$ , внаслідок чого вдалося визначити експериментальні константи. На підставі експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільш високий рівень сигналу  $AE_{точ}$  має місце при точінні твердосплавним різцем ВК6, менш високий – при точінні різцем з синтетичним алмазом, найменший рівень сигналу  $AE_{точ}$  – для різця з природним алмазом.  $AE_{тр}$  при алмазному точінні природним алмазом практично наближається до нуля, в той час як для твердосплавного різця цей сигнал вище в декілька разів*

**Ключеві слова:** акустична емісія, процес тертя при механічній обробці, режими різання, тонке точіння

Інтелектуальний моніторинг ріжучого інструменту є одним з напрямків підвищення ефективності сучасного машинобудування. Дослідження останніх десятиліть показали, що високочастотні пружні коливання (сигнали акустичної емісії (АЕ)), які випромінюються під час обробки, містять значну інформацію про процес різання. Дослідження акустичної емісії в процесах різання, а особливо при обробці високотвердими матеріалами вивчався багатьма зарубіжними вченими, серед яких – *R.Teti, D. Dornfeld* [1, 2], а також *В. Н. Подураєвим, О. В. Кібальченко* [3, 4]. У процесі таких досліджень були отримані математичні залежності амплітуди сигналів акустичної емісії від стану інструменту при тих чи інших режимах обробки. Запропоновані математичні моделі і знайдені залежності справедливі лише для конкретних умов обробки. Для прикладу, модель з обмеженнями, запропонована *D. Dornfeld* [2], досить точно описує процес стружкоутворення на основі сигналу АЕ.

Всі спроби *R. Teti, D. Dornfeld* моделювати і вивчати процес точіння на основі сигналу АЕ були спрямовані на опис контактних взаємодій в зоні стружкоутворення. Однак при цьому не враховувалися особливості контактної тертя задньої грані інструменту по поверхні деталі в процесі різання. Дана складова сигналу АЕ, що реєструється в процесі різання, істотна і відрізняється для різних матеріалів. Особливості контактної взаємодії