

**А.Х. Абукаев**

**A.H. Abukaev**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **МЕТОДЫ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

## **TECHNIQUES OF FINISHING TREATMENT OF EXTERNAL AND INTERNAL CYLINDRICAL SURFACES**

Представлены методы финишной обработки цилиндрических наружных и внутренних поверхностей. Показаны их преимущества, недостатки и достигаемые параметры качества обработанной поверхности.

The methods of finishing the cylindrical inner and outer surfaces. Showing their advantages, disadvantages and expected parameters of surface quality.

**Ключевые слова:** растровое хонингование, традиционное хонингование, кинематическая схема, производительность, шероховатость обработанной поверхности.

**Keywords:** raster honing, traditional honing, kinematics chart, productivity, roughness of a treat surface.

Обеспечение высоких технических требований по точности геометрической формы и шероховатости цилиндрических поверхностей с высокой твердостью (HRc 59–64) возможно лишь с помощью абразивной обработки. При выборе метода финишной абразивной обработки необходимо учитывать не только технические требования по качеству обработки, но и планируемый объем выпуска изделий, а также общие принципы построения всего технологического процесса изготовления прецизионных деталей.

Эффективным методом финишной абразивной обработки высокоточных цилиндрических отверстий, позволяющим обеспечить даже в условиях серийного и массового производства высокое качество, является процесс хонингования. По сравнению с механизированной доводкой абразивными пас-

тами и суспензиями преимуществом хонингования является более высокая производительность и стабильность технологического процесса.

Наиболее распространен традиционный метод хонингования, так как большинство хонинговальных станков, выпускающихся как у нас, так и за рубежом, не снабжено механизмами осцилляции\* [1–2]. При традиционном методе хонингования траектория рабочего движения инструмента образуется в результате вращения и возвратно-поступательного движения вдоль оси обрабатываемой детали. Такая кинематика обуславливает типичную для традиционного хонингования сетку следов обработки в виде пересекающихся винтовых линий. Единственным параметром траектории, позволяющим в какой-то мере варьировать количественные и качественные показатели процесса, является угол скрещивания следов обработки  $2\alpha$ , зависящий от соотношения скоростей вращения  $V_{кр}$  и скорости возвратно-поступательного движения  $V_{ос}$ . Скорость резания  $V$  является геометрической суммой скоростей вращения и возвратно-поступательного движения инструмента:

$$V = \sqrt{V_{кр}^2 + V_{ос}^2},$$

$$\alpha = \arctg \frac{V_{ос}}{V_{кр}}.$$

При повторных ходах возможно совпадение или смещение фаз положений брусков. Это зависит от размера брусков, их количества и от соотношения скоростей вращательного и возвратно-поступательного движений [3–5]. При заданных условиях обработки определяется оптимальное значение  $V_{ос}/V_{кр}$  из условий обеспечения наименьшего относительного смещения фаз положений брусков и количества двойных ходов, необходимого для равномерного заполнения обрабатываемой поверхности следами резания. Это способствует снижению шероховатости и повышению точности формы.

При традиционной кинематике не полностью используется режущая способность брусков, так как наибольшее участие в резании принимают зерна, встречные направлению движения, а остальные – меньше, поскольку попадают во впадины, образованные предыдущими зернами. Для интенсификации процесса и более полного использования режущей способности инструмента при традиционном методе хонингования применяют схему обработки с периодическим реверсированием вращения\*\* [6]. На рис. 1 схематично изо-

---

\* ОАО «Стерлитамакский станкостроительный завод». Генеральный каталог, 2006. – С. 36–37.

\*\* Пат. ФРГ № 2013109, В 24 b, 33/00, 1974. Управляющее устройство для моторного привода вращения хонинговального станка.

бражено контактирование отдельного зерна с обрабатываемой поверхностью в трех различных фазах:

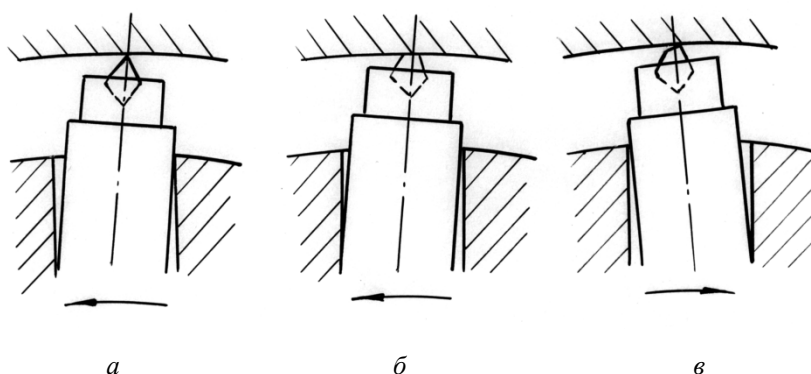


Рис. 1. Контактное взаимодействие режущего зерна с обрабатываемой поверхностью при традиционном методе хонингования с периодическим реверсированием вращения: *a* – начало работы зерна; *б* – притупившееся зерно; *в* – контактирование зерна при реверсе вращения

В результате более интенсивного самозатачивания брусков при увеличении частоты реверсирования относительный износ брусков возрастает. Шероховатость поверхности изменяется незначительно. Необходимо также отметить, что с увеличением частоты реверсирования процесс хонингования приобретает более динамичный характер, поэтому большое значение имеет правильный выбор брусков.

Характерным отличием процесса хонингования является большая площадь контакта режущих брусков с обрабатываемой поверхностью и малые скорости резания (0,3–1,0 м/см). Следовательно, силовые и температурные напряжения, возникающие в процессе хонингования, незначительны. Результат этого – сравнительно малые остаточные напряжения поверхностного слоя и отсутствие фазовых и структурных превращений. В поверхностный слой, таким образом, не вносятся дефекты, как при шлифовании.

Возможности хонингования резко возросли в результате применения брусков на основе синтетического алмаза и кубического нитрида бора (КНБ), которые во многих случаях полностью вытеснили абразивные бруски. Огромные преимущества алмаза и КНБ по своим физико-механическим свойствам, особенно твердости, прочности и абразивной способности, позволили существенно расширить технологические возможности процесса хонингования. Высокие режущие свойства и стойкость алмазных и кубанитовых брусков обеспечили повышение производительности и стабильности процесса, а также высокую размерную точность и точность геометрической формы обрабатываемого отверстия [4].

Широкое внедрение алмазных и кубанитовых брусков вызвало к жизни ряд модификаций процесса хонингования точных отверстий. Одним из таких методов обработки сквозных отверстий является однопроходное хонингование, или алмазное развертывание [2, 7]. В отличие от традиционного хонингования, весь припуск до 0,1 мм удаляется за один или два прохода. Кинематика аналогична лезвийному развертыванию. Инструменту с жестко закрепленными на требуемый размер алмазными или кубанитовыми брусками сообщают вращение и осевую подачу 0,5–0,1 м/мин до полного прохода через обрабатываемое отверстие. Преимущества данного метода – простота и возможность реализации его на сверлильном станке. Однако процесс чувствителен к колебаниям припуска, т.е. натяга, а достаточно стабильные результаты обеспечиваются при обработке крупнозернистыми брусками. Данный метод может быть рекомендован на предварительной (черновой) операции обработки отверстий в деталях типа установочного кольца.

Другим направлением совершенствования процесса хонингования является усложнение траектории относительного движения инструмента и детали. Установлено, что сложное рабочее движение интенсифицирует процесс резания, способствует повышению производительности и точности обработки и создает условия для управления формированием требуемого микрорельефа обработанной поверхности.

Известны различные схемы вибрационного хонингования, в которых усложнение траектории осуществляется путем наложения на основные движения дополнительных колебательных движений. Различают схемы вибрационного хонингования с осевой осцилляцией, круговой, радиальной и комбинированной осцилляцией [2, 8, 9].

Хонингование с осевой осцилляцией было реализовано на ранее выпускавшихся отечественных вертикальных хонинговально-доводочных станках моделей 3820 и 3821, а также на горизонтальном хонинговальном станке «Хон-1», который выпускался Владимирским ВПКО «Техника». Процесс хонингования с круговой осцилляцией был реализован на опытном вертикально-хонинговальном станке модели 3К83, выпускавшимся Стерлитамакским станкозаводом.

Дальнейшим развитием рассмотренных схем является растровый метод хонингования, разработанный на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» ПНИПУ и реализующий растровый способ абразивной обработки, получивший широкое применение при обработке прецизионных плоскостей [10–12]. Создан опытный образец хонинговального станка для обработки отверстий диаметром до 70 мм, который позволяет осуществлять два способа хонингования; традиционный и растровый [13, 14].

Схема элементарных движений при растровом хонинговании цилиндрических поверхностей приведена на рис. 2. Растровая траектория рабочего движения, развернутая на плоскость, показана на рис. 3. Принципиальное отличие процесса хонингования с растровой кинематикой от традиционного и вибрационных методов заключается в том, что главное движение резания – это результат комбинации двух синусоидальных колебаний с различными частотами  $\omega_1, \omega_2$  ( $\omega_1 > \omega_2$ ) и амплитудами  $A$  и  $B$  во взаимно перпендикулярных направлениях – круговых 1 и осевых 2. Для равномерного распределения образующей сетки (растра) 3 по всей обрабатываемой цилиндрической поверхности инструменту дополнительно сообщаются возвратно-поступательное  $V_{oc}$  и вращательное  $V_{кр}$  движение с малыми скоростями, которые представляют собой соответственно осевую ( $S_{oc}$ ) и круговую ( $S_{кр}$ ) подачи.

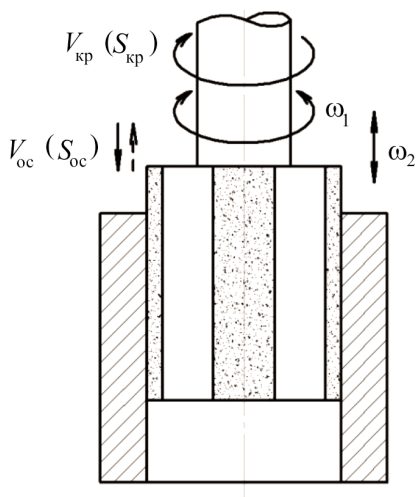


Рис. 2. Растровая траектория рабочего движения инструмента

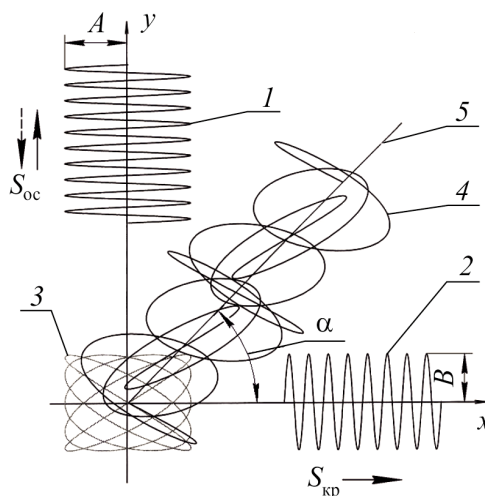


Рис. 3. Элементарные движения инструмента при растровом хонинговании

Таким образом, при растровом хонинговании траектория 4 рабочего движения режущих зерен образуется в результате комбинации четырех движений и представляет собой растровую траекторию 3, растянутую в направлении винтовой линии 5. Такую результирующую кривую можно условно назвать «растровой циклоидой» [15, 16].

В общем случае траектория движения точки по цилиндрической поверхности представляет собой весьма сложную кривую двойкой кривизны, которая задается тремя параметрическими уравнениями. Не нарушая общности задачи, исследование свойств таких сложных кривых удобнее и нагляднее

произвести на развертке цилиндрической поверхности на плоскость, направив ось  $y$  вдоль образующей цилиндра, а ось  $x$  – вдоль развертки направляющей окружности.

В этом случае траектория движения точки – плоская кривая и задается двумя параметрическими уравнениями, определяющими декартовы координаты  $x, y$  точек кривой в функции времени  $t$ :

$$\begin{aligned}x &= A \sin \omega_1 t + V_{кр} t, \\y &= B \sin(\omega_2 t + \varphi_0) \pm V_{ос} t,\end{aligned}$$

где  $\varphi_0$  – начальный сдвиг фаз [17].

Хонингование – это достаточно оснащенный технологическим оборудованием процесс. В нашей стране и за рубежом выпускается большая номенклатура хонинговальных станков, позволяющих обрабатывать широкий диапазон отверстий, от 3 до 500 мм и более. Станки выпускаются главным образом с традиционной кинематикой различных компоновок, одношпиндельные и многошпиндельные, с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделей, универсальные и специализированные. В связи с широким внедрением хонинговальных брусков из сверхтвердых абразивных материалов большинство хонинговальных станков снабжены устройством активного контроля и работают в полуавтоматическом и автоматическом режиме, что позволяет использовать этот процесс в автоматизированных технологических комплексах.

Хонинговальные станки отечественного производства выпускаются в основном Стерлитамакским станкозаводом: это 3Е 820, 3Е 820-2, 3К 83, 3К 83-2, 3Р84-2 и др. Среди зарубежных фирм, специализирующихся на выпуске прецизионных, автоматизированных хонинговальных станков, можно отметить фирмы *Gegung* и *Nagel* (Германия), *XLO Micromatic* (США), *Citroen* (Франция) и др.

**Обработка наружных цилиндров.** Финишная обработка наружных прецизионных цилиндрических поверхностей, так же как и отверстий, осуществляется различными методами доводки свободным абразивом в виде паст и суспензий и связанным абразивом, т.е. абразивными брусками.

Наружное хонингование, наш взгляд, неэффективно по следующим причинам. Во-первых, возможна обработка только одной детали, что непроизводительно. Во-вторых, конструктивные особенности коротких цилиндрических деталей, а именно короткая необрабатываемая часть, не позволяют надежно базировать деталь при хонинговании. Кроме того, по этой же причине весьма ограничена возможность варьирования наладок, т.е. изменения перебега и рабочего хода брусков, что негативно влияет на достижение необходимой точности геометрической формы.

Для финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей более эффективен процесс суперфиниширования [18]. При общности механизма абразивного воздействия процессы хонингования и суперфиниширования до настоящего времени имели различие в системе поддержания контакта бруска с обрабатываемой поверхностью. При хонинговании контакт замыкается кинематически с жестким прижимом бруска. При суперфинишировании ранее использовался упругий, пружинный поджим бруска, поэтому процесс применялся главным образом для снижения шероховатости поверхности. В связи с широким внедрением алмазных и кубанитовых брусков в современных станках применяются суперфинишные головки с более жесткой системой прижима брусков, что позволило существенно повысить производительность и точность обработки [19, 20].

При обработке наружных цилиндрических поверхностей применяются различные схемы суперфиниширования, отличающиеся способом базирования обрабатываемых деталей, – в центрах и бесцентровое, по виду подачи – продольное перемещение, врезание, напроход. Для реализации этих схем суперфиниширования выпускаются как универсальные, так и специализированные станки. Суперфинишные станки для обработки в центрах с одной инструментальной головкой являются более универсальными и предназначены для обработки цилиндрических и конических поверхностей в условиях мелкосерийного производства. Обработку в центрах производят также унифицированными суперфинишными головками, установленными на токарных, круглошлифовальных и других станках [19].

В условиях серийного и массового производства для финишной обработки гладких цилиндрических поверхностей чаще применяют бесцентровое суперфиниширование напроход (рис. 4).

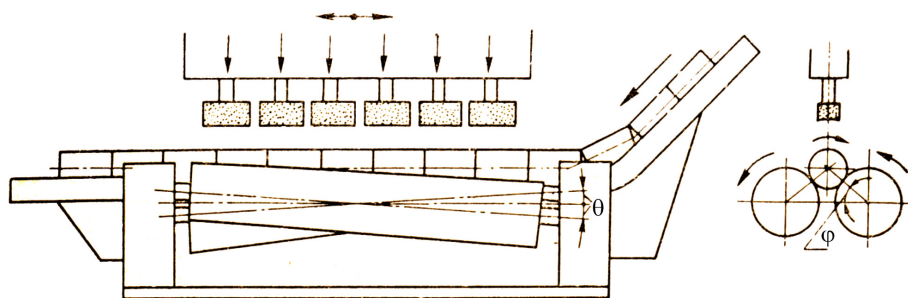


Рис. 4. Бесцентровое суперфиниширование

При бесцентровой обработке напроход вращение детали и ее осевое перемещение осуществляется двумя валками, развернутыми на некоторый угол  $\theta$  относительно оси детали. Необходимая сила трения обеспечивается путем

подбора угла контакта  $\phi$  между валками и изделием. Обрабатываемое изделие последовательно проходит под осциллирующими брусками разной зернистости. Первыми брусками обеспечивается съём металла и исправление исходной погрешности формы, последующими создается требуемая шероховатость поверхности. Основное преимущество бесцентрового суперфиниширования напроход по сравнению с обработкой в центрах – это высокая производительность процесса, обусловленная одновременной обработкой нескольких деталей и непрерывностью размерного и отделочного суперфиниширования.

Для бесцентрового суперфиниширования напроход выпускаются три модели станков: 3Д878, 3Д879, 3Д880, которые охватывают диаметры цилиндров от 1,5 до 125 мм. Основные узлы станков унифицированы. Базовой моделью является станок 3Д878, предназначенный для обработки гладких цилиндрических деталей диаметром от 1,5 до 32 мм. Из зарубежных фирм, выпускающих автоматизированные станки для бесцентрового суперфиниширования напроход, можно отметить фирмы Nagel и Supfina (Германия) и соответственно модели станков SCD 80, HSM 80 и HSM 461.

Точность геометрической формы при бесцентровом суперфинишировании во многом зависит от жесткости и точности изготовления валков, от правильного выбора параметров наладки, а также от жесткости системы прижима брусков. Следует отметить, что суперфиниширование эффективнее исправляет огранку, чем круглая доводка. Это объясняется условием контакта инструмента с обрабатываемой деталью. При суперфинишировании обеспечивается достаточно высокая точность геометрической формы; отклонение от круглости 0,3–0,7 мкм, волнистость 0,1–0,15 мкм, отклонение профиля продольного сечения в пределах 1 мкм. Шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,02–0,04 мкм.

На финишных операциях обработки прецизионных цилиндрических поверхностей широко применяются различные методы доводки свободным абразивом в виде паст и суспензий чугунами притирами, а также притирами с закрепленным абразивным слоем. Наиболее совершенным и производительным методом доводки наружных цилиндрических поверхностей в условиях серийного и массового производства является «круглая доводка», которая осуществляется на универсальных двухдисковых доводочных станках с эксцентриковой наладкой [21]. Схема наладки для «круглой доводки» показана на рис. 5.

На цапфе эксцентрика 1 свободно устанавливается сепаратор 2 с зазором относительно рабочих поверхностей притиров 4 и 5. Обрабатываемые детали



3 свободно размещают в пазах сепаратора, выполненных под углом 5–30° к его радиусу.

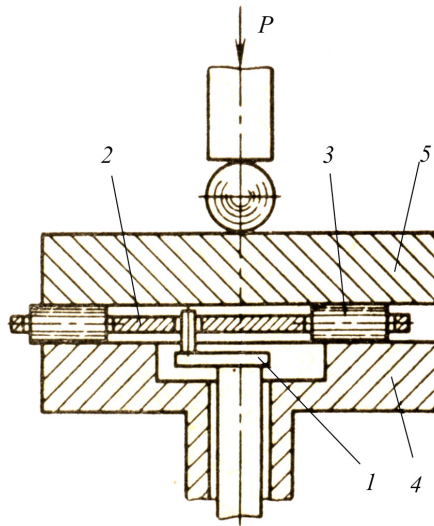


Рис. 5. Наладка для «круглой доводки»

При доводке перемещением верхнего притира создается необходимое давление  $P$  и в зависимости от выбранных условий наладки сообщается вращение одному или двум притирам и эксцентрику  $1$ . Детали под действием сил трения в контакте с притирами получают вращение вокруг своих осей с проскальзыванием относительно рабочих поверхностей притиров. Благодаря обкатыванию деталей по притирам сепаратор получает вращение с частотой, равной алгебраической сумме частот вращения притиров. Одновременно за счет вращения эксцентрика сепаратору с деталями с той же частотой сообщается дополнительное поступательное движение.

Для реализации «круглой доводки» рабочих поверхностей всей номенклатуры измерительных роликов наиболее подходят универсальные двухдисковые станки отечественного производства следующих моделей: 3Б814, 3Е814, 3Е813, а также станки зарубежных фирм Peter Wolters (Германия), модели AL-1, AL-2 и фирмы Hahn & Kolb (Германия), модели ZL 500, ZL 800 и др.

Процесс «круглой доводки» используется на отечественных предприятиях, специализирующихся на выпуске топливной и гидравлической аппаратуры. В технической литературе даны рекомендации по наладке станков и построению технологического процесса [21, 22]. При круглой доводке может быть получена достаточно высокая точность геометрической формы в пределах 0,4–0,6 мкм, а шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,02–0,04 мкм. Сложнее всего исправляется низкочастотная составляющая огранки – оваль-

ность и трехгранность. Преимуществом данного метода по сравнению с суперфинишированием является достаточно высокая однородность обработанных деталей.

Применяется также доводка прецизионных наружных цилиндрических поверхностей небольшого диаметра 1,5–5,0 мм на станках с исполнительным механизмом возвратно-поступательного действия [23]. Преимуществом данного метода по сравнению с «круглой доводкой» является постоянство скорости относительного движения для всех точек образующей цилиндра по притиру. Вследствие этого стабильно обеспечивается требуемая точность размера с отклонением от цилиндричности не более 0,5–0,6 мкм. Реализуется данный метод на модернизированных станках Д.С. Семенова. К недостаткам можно отнести ограниченность диаметров обрабатываемых деталей из-за необходимости большего хода поступательного движения, а также ограниченность скорости резания из-за больших инерционных нагрузок.

Производительным методом окончательной обработки высокоточных наружных цилиндрических поверхностей является бесцентровая доводка напроход [22, 24]. Этот метод доводки реализуется на ранее выпускавшемся станке модели ВЕ-33, который разработан Вильнюсским филиалом ЭНИМС. Схема бесцентровой доводки напроход представлена на рис. 6.

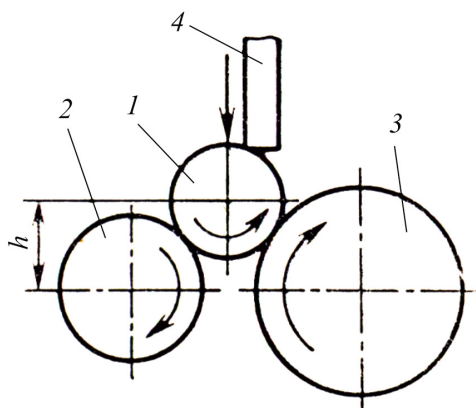


Рис. 6. Бесцентровая доводка напроход

Обрабатываемая деталь 1 устанавливается между ведущим 2 и притирочным 3 валками и прижимается к их поверхностям с помощью ножа 4, расположенного сверху. В процессе доводки деталь получает вращательное и поступательное движение за счет угла разворота между осями ведущего и притирочного валов. Схема наладки аналогична схеме наладки суперфинишных станков. Как и при суперфинишировании, точность обработки в продольном сечении во многом определяется точностью изготовления ва-

лов и прижимных ножей. По сравнению с «круглой доводкой» данный метод лучше устраняет погрешность формы цилиндрических деталей в поперечном сечении. При бесцентровой доводке напроход обеспечивается точность геометрической формы с отклонением профиля продольного сечения не более 1 мкм, и отклонением от круглости 0,2 мкм.

### Список литературы

1. Сверлильные и хонинговальные станки / С.И. Куликов, П.В. Волоценко [и др.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Фрагин И.Е. Новое в хонинговании. – М.: Машиностроение, 1980. – 96 с.
3. Кудояров Р.Г. Влияние кинематики процесса хонингования на точность обработки деталей // Актуальные проблемы финишной обработки деталей машин абразивными и алмазными брусками. – Уфа, 1981. – С. 24–27.
4. Кудояров Р.Г. Точность деталей машин при алмазном хонинговании. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 170 с.
5. Савитский Т. Кинематика процесса хонингования цилиндрических отверстий // *Mechanik*. – 1977. – Р. 50.
6. Исаков А.Э. Хонингование с дозированной подачей и оборудование для его реализации // Хонингование цилиндрических и фасонных поверхностей. – Пермь, 1988. – С. 64–67.
7. Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий / С.Г. Бабаев, Н.К. Мамедханов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 103 с.
8. Прогрессивные методы хонингования / С.И. Куликов, Ф.Ф. Ризванов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
9. Ермаков Ю.М. Перспективы эффективного применения абразивной обработки. Обзор / НИИ Маш. – М., 1982. – 56 с.
10. Некрасов В.П. Растровый способ абразивной доводки // *Машиностроитель*. – 1977. – № 5. – С. 15.
11. Технология и оборудование с растровой кинематикой для формирования шероховатости поверхностей постоянной кривизны в нанометровом интервале / А.М. Ханов, Р.А. Муратов, Е.А. Гашев, К.Р. Муратов // *СТИН*. – 2010. – № 2. – С. 13–16.
12. Ханов А.М., Муратов К.Р., Гашев Е.А. Управление траекторией рабочего движения при доводке плоскостей // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. – 2011. – Т. 13, № 1 (3). – С. 667–669.
13. Муратов К.Р., Гашев Е.А. Сравнительные исследования методов хонингования // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. – 2012. – Т. 14, № 4 (5). – С. 1266–1269.

14. Хонинговально-доводочный станок и его кинематические возможности / А.М. Ханов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев, Р.А. Муратов // СТИН. – 2011. – № 3. – С. 21–23.

15. Ханов А.М., Гашев Е.А., Муратов К.Р. Образование растровых траекторий при хонинговании цилиндрических поверхностей // СТИН. – 2012. – № 12. – С. 13.

16. Гашев Е.А., Муратов К.Р. Анализ основных кинематических параметров растрового рабочего движения при хонинговании цилиндрических поверхностей // СТИН. – 2013. – № 9. – С. 30–34.

17. Муратов К.Р. Повышение эффективности финишной абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей методом растрового хонингования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2010. – 21 с.

18. Неделин Ю.Л. Износ алмазных зерен при хонинговании // Теория и практика алмазной обработки / НИИ Маш. – М., 1969. – С. 197–199.

19. Хонингование и суперфиниширование деталей / З.И. Кремь [и др.]. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 137 с.

20. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

21. Доводка прецизионных деталей машин / П.Н. Орлов, А.А. Савелова [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.

22. Бабаев С.Г., Садыгов П.Г. Притирка и доводка поверхностей деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.

23. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методом доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

24. Панин Г.И., Фефелов И.А. Механизация и автоматизация процессов обработки прецизионных деталей. – Л.: Машиностроение, 1972. – 343 с.

Получено 2.10.2013

**Абукаев Альберт Халилович** – магистрант, ПНИПУ, МТФ, гр. ТМК-12м.