

УДК 621.75

А. П. Минаков, Е. В. Ильюшина, П. В. Афанасьев, А. Г. Суворов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

UDC 621.75

A. P. Minakov, Y. V. Ilyushina, P. V. Afanasyev, A. G. Suvorov

MODERN TECHNOLOGIES OF HYDROCYLINDER LINERS FINISHING

Аннотация

Приведен анализ современных технологий финишной обработки гильз гидроцилиндров. Рассмотрены преимущества и недостатки методов абразивной обработки и способов поверхностного пластического деформирования рабочей поверхности гильз. Обобщен положительный опыт, достигнутый в результате использования суперфинишной пневмоцентробежной обработки (ПЦО) на финишной операции изготовления гильз.

Ключевые слова:

гильза гидроцилиндра, хонингование, полирование, доводка, поверхностное пластическое деформирование, роликовый накатник, суперфинишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка.

Abstract

The paper provides the analysis of modern technologies of hydrocylinder liners finishing. The advantages and disadvantages of methods of abrasive machining and techniques of surface plastic deformation of liners operating surface are presented. The paper summarizes the positive experience gained from the use of superfinishing pneumocentrifugal processing (SPP) in the finishing operation of liners manufacture.

Key words:

hydrocylinder liner, honing, polishing, refinement, surface plastic deformation, roller-burnishing tool, superfinishing strengthening pneumocentrifugal processing.

Машиностроительный комплекс Республики Беларусь располагает высокотехнологичным производственным и научным потенциалом. Высокими темпами будут развиваться экспортоориентированные и импортозамещающие производства автомобильной промышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения [1].

Неотъемлемой составной частью промышленного оборудования и мобильных машин является гидропривод. Современную машину без гидропривода представить невозможно. Поэтому качество машины в целом в значительной степени зависит от качества гидро-

привода и гидроцилиндра как составной его части.

Самая трудоемкая по механической обработке деталь гидроцилиндра – гильза. В большинстве случаев по категориям жесткости ее можно отнести к маложестким и тонкостенным деталям [2], а это сказывается на качестве внутренней поверхности и геометрической точности.

Способ обработки отверстия гильзы определяется комплексом факторов, среди которых учитывают габаритные размеры, материал заготовки и её массу; объем выпуска, форму и тип организации производства; наличие имеющегося

технологического оборудования и оснастки. К главным факторам относят точность, производительность и рентабельность каждого из способов.

Черновое растачивание отверстия гильзы производится с помощью расточных головок на вертикальных, горизонтальных или наклонных токарно-расточных станках [3]. К чистовым операциям обработки внутренней поверхности гильзы относят тонкое растачивание, поверхностное пластическое деформирование и абразивную обработку [4].

При большем значении финишных операций обработки конечный результат будет зависеть от того, сколько отрицательных факторов пройдет через весь комплекс операций вплоть до готовой детали и насколько они будут подавлены или нейтрализованы, положительными факторами тем самым уменьшая технологическую наследственность [5].

Достижение высокого класса шероховатости имеет прямую зависимость от трудоемкости обработки. Наибольшая трудоёмкость присуща абразивной обработке, в частности хонингованию.

Хонингование обеспечивает получение высокой точности размеров, геометрической формы и малой шероховатости обработанной поверхности [6].

Сущность процесса хонингования состоит в снятии припуска брусками хонинговальной головки, шарнирно соединенной с шпинделем станка и совершающей вращательное и возвратно-поступательное движения (а иногда и колебательное), в результате чего хонинговальные бруски движутся по винтовым линиям [7].

В процессе хонингования бруски снимают припуск 0,01...1,0 мм и более на диаметр. При этом удаляются гребешки микронеровностей и основной металл. В пределах снимаемого припуска обеспечивается исправление погрешностей предыдущих операций в виде конусности, эллипсности, бочкообразности, корсетности, огранки и в некото-

рой степени искривления оси отверстия.

После установления общего припуска назначают число операций, распределяют припуск по операциям и подбирают характеристику режущих брусков. Обработка в несколько операций вызвана невозможностью обеспечить большой съём металла и одновременно низкий параметр шероховатости поверхности одними и теми же брусками. Большой припуск при хонинговании можно снять крупнозернистыми брусками, которые, срезая металл, сохраняют параметр шероховатости поверхности, необходимый для самозатачивания брусков. Поэтому основной припуск следует снимать на первой операции. Параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,4 \dots 0,8$ мкм надежно обеспечивается одной операцией хонингования [6, 8, 9].

На чистовых операциях припуск должен быть достаточным лишь для удаления шероховатости поверхности после предварительного хонингования. При чистовом хонинговании с получением параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм и выше следует применять алмазные бруски [6].

Интенсивный износ и повышенный расход алмазов наблюдаются при обработке вязких металлов с низкой твердостью (сырые стали), что происходит за счет удаления сходящей сливной стружкой связки вокруг зерен и их выпадения.

При достижении более высокого класса шероховатости поверхности в значительной степени уменьшается производительность обработки за счет изменения величины продольной подачи, а применение мелкозернистых брусков ведет к быстрому засаливанию.

Большинство хонинговальных станков, выпускаемых как и в Беларуси, так и за рубежом, не снабжены механизмом осцилляции инструмента. Поэтому традиционный метод хонингования самый распространенный в странах СНГ. При традиционном методе хонингования

траектория рабочего движения инструмента образуется в результате вращения и возвратно-поступательного движения вдоль оси обрабатываемой детали [10].

Данная кинематика движения создает типичную для традиционного хонингования сетку следов в виде пересекающихся винтовых линий (рис. 1).

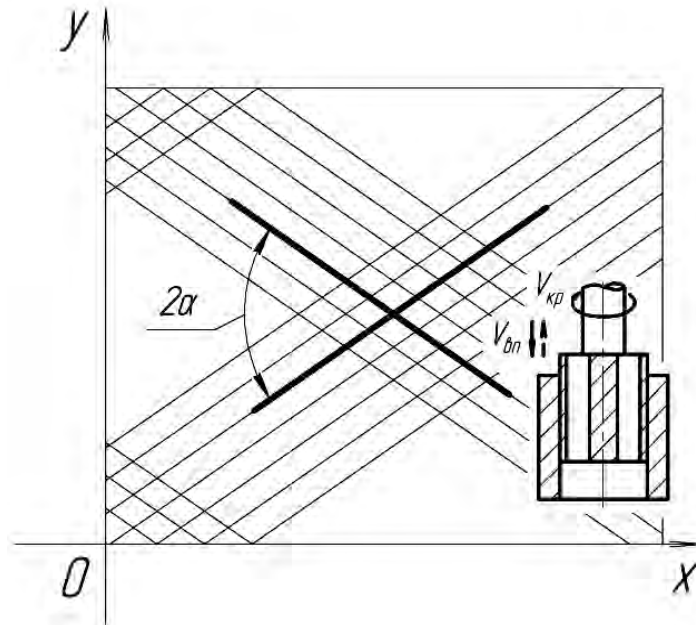


Рис. 1. Траектория движения абразивных частиц при традиционной схеме хонингования

Единственным параметром траектории, позволяющим изменять количественные и качественные показатели, является угол скрещивания следов обработки 2α , зависящий от соотношения скоростей вращения $V_{кр}$ и возвратно-поступательного движения $V_{ос}$.

Усложнение траектории относительного движения инструмента и детали выступает еще одним направлением совершенствования процесса хонингования. Известны схемы вибрационного хонингования, в которых усложнение траектории осуществляется путем наложения на основные движения дополнительных колебательных движений. Различают несколько схем вибрационного хонингования: с осевой, с круговой, с радиальной и с комбинированной осцилляцией инструмента [8]. Хонингование с

осевой осцилляцией позволяет существенно повысить производительность процесса в 1,5...2 раза, это связывают с увеличением частоты и амплитуды колебаний инструмента. Интенсивность износа брусков при этом также увеличивается, но в меньшей мере, чем интенсивность съема припуска металла [11].

Разнонаправленная траектория при круговой осцилляции, развернутая на плоскость, показана на рис. 2, а.

Развитием вибрационного хонингования является метод вихревого хонингования, разработанный в Рижском техническом университете (рис. 2, б). Главное его отличие от других методов в том, что инструменту одновременно сообщаются осевые и круговые колебания с одинаковыми частотами [12].

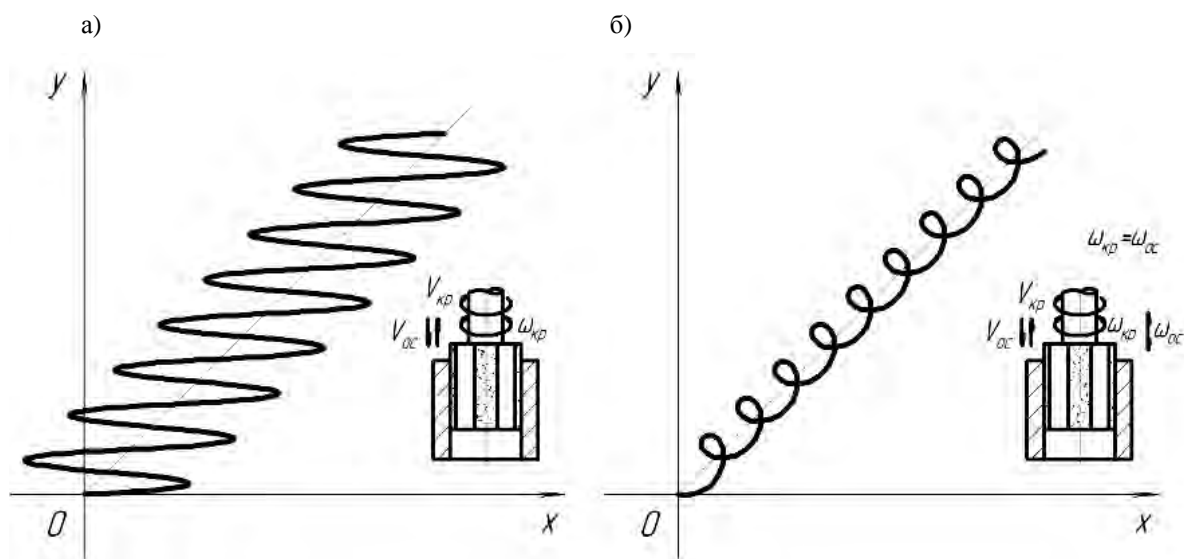


Рис. 2. Траектория движения абразивных частиц при вибрационном (а) и вихревом (б) хонинговании

Одно из самых новых направлений хонингования – «растровый» метод, разработанный в Пермском государственном техническом университете [13]. Схема элементарных движений при

«растровом» хонинговании приведена на рис. 3.

«Растровая» траектория рабочего движения, развернутая на плоскость, показана на рис. 4.

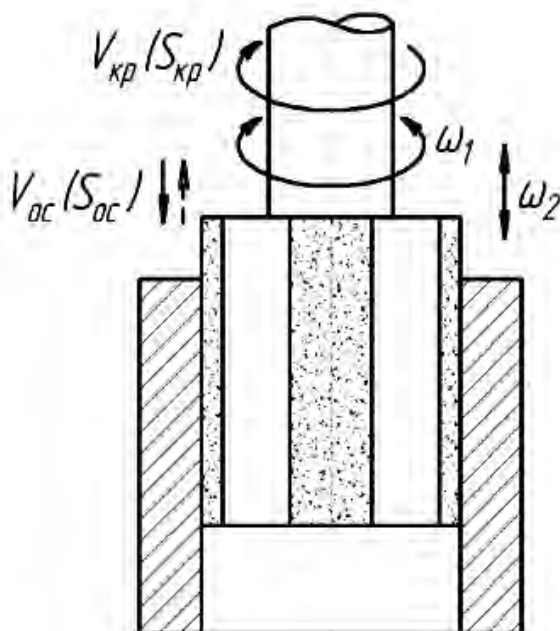


Рис. 3. Траектория движения инструмента

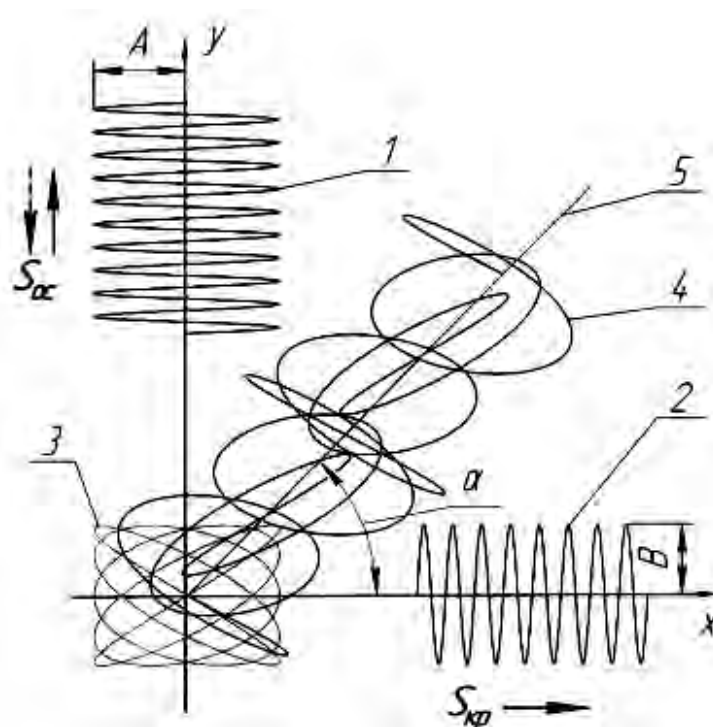


Рис. 4. Схема элементарных движений инструмента при растровом хонинговании

Одно из главных отличий «растрового» хонингования с кинематикой от традиционного и вибрационных методов заключается в том, что главное движение резания есть результат комбинации двух синусоидальных колебаний с различными частотами ω_1 , ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$) и амплитудами A и B во взаимно перпендикулярных направлениях – круговых 1 и осевых 2. Для равномерного распределения образующейся сетки (растра) 3 по всей обрабатываемой цилиндрической поверхности инструменту дополнительно сообщаются возвратно-поступательное V_{oc} и вращательное $V_{кр}$ движения с малыми скоростями, которые представляют собой осевую S_{oc} и круговую $S_{кр}$ подачи инструмента соответственно. 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.

Результаты исследований показали преимущество хонингования с «растровой» траекторией; при меньшей шероховатости обработанной поверхности производительность процесса в 1,5...2 раза выше, чем при традиционном методе хонингования [13].

Хонингование не находит широкого применения в серийном производстве при обработке отверстий гильз гидроцилиндров, это связано с имеющимися недостатками:

- получение высокого класса шероховатости связано с большой трудоемкостью, обработка выполняется за несколько операций, брусками различной зернистости;
- шаржирование поверхности абразивными зёрнами негативно сказывается на износе уплотнений поршня в гидроцилиндре;
- микропрофиль поверхности характеризуется наличием острых гребешков.

Однако, несмотря на все недостатки, хонингование широко применяется

при изготовлении гильз гидроцилиндров в единичном производстве. Это связано с легкостью переналадки оборудования и возможностью изготовления цилиндров без предварительно проводимой подготовки.

Полирование предназначено для снижения параметров шероховатости без устранения отклонения формы деталей.

В качестве абразивного инструмента при полировании применяют эластичные круги и абразивные шкурки.

Для получения низких параметров шероховатости обработку следует вести в несколько операций с применением абразивного инструмента разной зернистости.

Предварительное полирование с большим съемом осуществляется абразивными шкурками зернистостью 40...25, которые обеспечивают шероховатость поверхности $Ra = 0,8...1,6$ мкм.

При окончательном полировании лентами зернистостью 16...8 достигается параметр шероховатости $Ra = 0,2...0,4$ мкм; лентами зернистостью 6...3 обеспечивается $Ra = 0,05...0,1$ мкм. Для получения более низких параметров шероховатости ленты покрывают абразивными пастами [6, 14].

Абразивная доводка является окончательным методом обработки деталей, обеспечивающим высокое качество поверхности ($Ra = 0,04...0,02$ мкм) и отклонение геометрической формы обрабатываемой поверхности в пределах 0,1...0,3 мкм. Абразивная доводка – это сложный процесс удаления припуска с обрабатываемой поверхности детали, характеризуемый одновременным протеканием механических, химических и физико-химических процессов.

В зависимости от типа инструмента – притира – различают доводку незакрепленными зернами в составе абразивных паст и суспензий на притирах и доводку закрепленными зернами абразива (шаржированными притирами и абразивными кругами).

Доводку деталей абразивными пастами на притирах осуществляют при периодическом нанесении пасты на поверхность притира.

Доводка абразивными суспензиями на притирах осуществляется при непрерывной подаче суспензии в зону обработки или с периодической дозированной подачей.

Доводка прецизионных деталей осуществляется за две–пять операций с последующим снижением зернистости применяемого абразива в составе паст и суспензий, используемых на этапах предварительной, чистовой и окончательной доводки, и уменьшением припусков на обработку [6].

Недостатки полирования и доводки:

- обработка гильз гидроцилиндров затруднена из-за габаритов заготовки;
- плохая очистка обработанных поверхностей от микрочастиц абразива приводит к быстрому износу поверхности при эксплуатации;
- получение высокого класса шероховатости связано с высокой трудоемкостью.

С помощью широко применяемых методов окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма деталей с заданной точностью, но часто не обеспечивается оптимальное качество поверхностного слоя. Оно достигается поверхностным пластическим деформированием (ППД), при котором стружка не образуется, а происходит тонкое упрочнение поверхностного слоя [4].

Одним из современных направлений является *безабразивная ультразвуковая финишная обработка* (БУФО), которая была предложена Центром Ультразвуковых Технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [15]. Технологическое оборудование для такой обработки состоит из следующих узлов: источника питания, преобразователя частоты электрического тока, системы управления, акустической системы. Ос-

новным узлом оборудования для БУФО является акустическая система, которая служит для преобразования электрической энергии в механическую.

При технологии БУФО алмазы не примеряются, но общим требованием является термодинамическая устойчивость излучателя относительно свойств обрабатываемых металлов.

Излучатель ультразвука поджимается с определенным давлением к поверхности детали. Вступая во взаимодействие с обрабатываемой деталью, ультразвук пластически деформирует ее поверхность, сглаживает вершины микронеровностей и упрочняет поверхностный слой. Один финишный проход излучателя ультразвука при исходной поверхности $Ra = 6,3$ мкм дает поверхность с $Ra = 0,1$ мкм (10 класс). Этим уникальным методом обрабатывается большинство известных марок стали, алюминий, медь и их сплавы, латунь, бронза, другие цветные металлы и сплавы.

Использование технологии БУФО исключает ручной труд, необходимость применения абразивных материалов, упрощает технологический процесс.

БУФО в серийном производстве при обработке отверстий гильз гидроцилиндров имеет некоторые недостатки:

- для повышения твердости поверхностного слоя (для упрочняющей обработки) нужны, как правило, большая мощность колебательной системы и значительное время обработки;

- при внутреннем диаметре детали менее 75 мм используются две и более акустические головки;

- процесс требует применения сложного и дорогостоящего оборудования.

Одним из самых распространенных методов при финишной обработке внутренней поверхности гильз гидроцилиндров является накатывание *ролик* *вым инструментом* (рис. 5).

Главные преимущества обработки

ролик *вым инструментом:*

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура-текстура в поверхностном слое;

- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;

- стабильный процесс обработки обеспечивает стабильное качество поверхности;

- создается благоприятная форма микронеровностей с большей долей опорной площади.

При раскатывании жесткими сепараторными накатниками основное влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывают следующие параметры: конфигурация, размеры и количество роликов, угол вдавливания роликов, натяг, подача и угол установки роликов, скорость обработки, число рабочих ходов, применяемая СОЖ [4].

Относительная окружная скорость многороликового инструмента может изменяться от 2 до 200 м/мин. Увеличение окружной скорости инструмента сопровождается возрастанием тепловыделения, что снижает долговечность и ухудшает условия протекания процесса. Для диаметра менее 100 мм выбирают скорость 15...40 м/мин, для диаметра более 100 мм – 30...70 м/мин.

Накатывание целесообразно проводить за один рабочий ход, в некоторых случаях – за два, но не более [4].

Прогрессивным является применение станков, позволяющих изготавливать гильзы гидроцилиндров за один установ.

С целью наращивания мощностей по обработке гильз гидроцилиндров на ОАО «БЕЛАЗ» был закуплен и введен в эксплуатацию станок для глубокой обработки труб ML700-1-10000 немецкой фирмы «ТБТ Тифбортехник» (рис. 6).



Рис. 5. Роликовые накатники, применяемые при изготовлении гильзы гидроцилиндра в филиале ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» в г. Могилеве



Рис. 6. Станок модели ML700-1-10000 немецкой фирмы «ТБТ Тифбортехник»

На оборудовании используется инструментальная система, работающая по методу ВТА (расточивание / обточка / накатывание). При помощи насоса высокого давления смазочная охлаждающая жидкость (СОЖ) вместе с маслом подается в кольцевой канал, образуемый стенками отверстия и инструментом, к режущим кромкам. Выводимая из отверстия стружка и СОЖ выходят через канал внутри режущего инструмен-

та и сверлильного шпинделя. Проходя через фильтр очистки и охладитель, СОЖ попадает обратно в бак с чистым маслом [16].

Фирма «Экоролл» в настоящее время является бесспорным лидером по изготовлению накатников и комбинированного инструмента для растачивания и накатывания поверхностей отверстий (рис. 7).

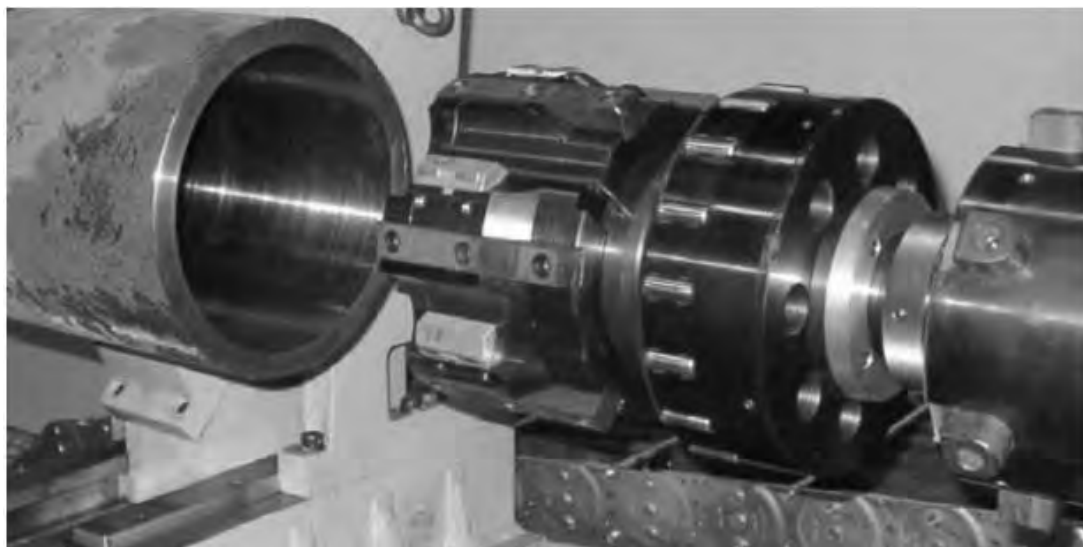


Рис. 7. Комбинированный инструмент фирмы «Экоролл»

Модельный ряд таких инструментов способен обрабатывать гильзы гидроцилиндров диаметром от 60 до 455 мм длиной до 10 м.

Режимы обработки при применении комбинированного инструмента: скорость резания – до 300 м/мин, скорость подачи – 3...6 мм/об [17]. Применение комбинированного инструмента позволяет значительно снизить трудоемкость обработки благодаря высокой производительности и получаемому качеству обработанной поверхности.

Однако современные технологии накатывания из-за отсутствия мировых и отечественных аналогов являются очень дорогими и порой непосильными для отечественного машиностроения.

Для решения этих проблем был предложен способ пневмовибродинамической обработки (ПВДО) внутренних поверхностей вращения заготовок из сталей без термообработки [18], позволяющий получать на внутренней цилиндрической поверхности стальных нежестких заготовок без термообработки шероховатость $Ra < 0,1$ мкм. Сущность способа на начальном этапе заключается в качественной лезвийной обработке отверстия, далее – в его по-

верхностном пластическом деформировании жесткими рабочими элементами до получения на обрабатываемой поверхности параметра шероховатости $Ra = 0,2...0,1$ мкм и в последующей суперфинишной пневмоцентробежной обработке (ПЦО) рабочими элементами – шарами, поверхность которых имеет параметр шероховатости $Ra \leq 0,08$ мкм.

Главным требованием для осуществления указанного способа обработки является получение хорошего качества поверхности на предшествующих операциях. Операции лезвийной обработки отверстий и ППД жесткими роликовыми накатниками хорошо изучены, они позволяют достигать необходимого качества поверхности для применения суперфинишной ПЦО.

Для ПЦО используется инструмент, показанный на рис. 8.

Перед началом обработки инструмент центрируется в заготовке. Затем подается воздух к инструменту и производится процесс накатывания. После обработки подача воздуха прекращается, а инструмент выводят в исходное положение.

После подачи сжатого воздуха шары перемещаются вдоль камеры и

получают вращательное движение, перекатываясь по обрабатываемой поверхности отверстия. Также шары осуществляют осциллирующее и радиаль-

ное перемещения по отношению к поверхности обработки и имеют шесть степеней свободы.

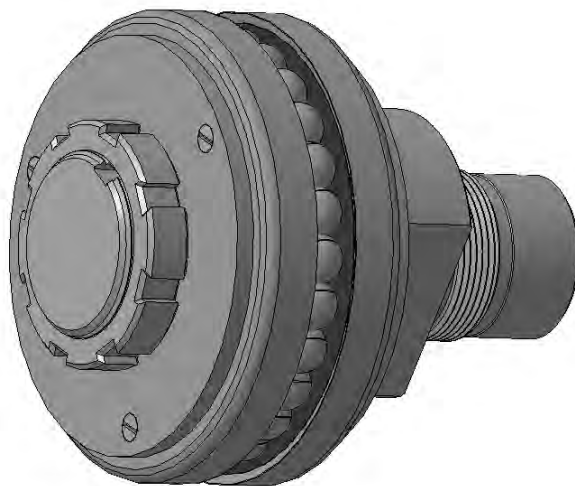


Рис. 8. Внешний вид модельного образца инструмента для суперфинишной ПЦО

Снижение шероховатости обрабатываемой поверхности достигается благодаря вибрационному воздействию шаров с низкой шероховатостью на гребешки микрорельефа. Следует отметить, что смятие и сглаживание неровностей поверхности происходит в различных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров.

Материал шаров намного тверже материала обрабатываемой заготовки, шары оставляют на поверхности следы в виде отдельных лунок, геометрия которых соответствует геометрии поверхности самих шаров. Используя шары с шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,08$ мкм, можно получить шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм.

Рассматриваемый способ обработки создает благоприятную форму микронеровностей, повышая износостойкость в паре трения гильза–уплотнитель, а также несущую способность поверхности.

Применение суперфинишной ПЦО

для обработки внутренних поверхностей отверстий позволило бы отменить операцию термообработки, что дает весомый экономический эффект и возможность получения качественных и недорогих гильз.

Выводы

1. Актуальной проблемой в современном машиностроительном производстве является качество обработки рабочей поверхности гильз гидроцилиндров. Ее решение поможет отказаться от импорта гильз и позволит изготавливать надежные и качественные гидроцилиндры.

2. Анализ современных технологий финишной обработки гильз гидроцилиндров показал, что в настоящее время в отечественном машиностроении нет эффективной технологии обработки внутренней поверхности гильз, которая позволила бы получать шероховатость рабочей поверхности $Ra < 0,1$ мкм и обеспечила бы повышение износостой-

кости пары трения гильза–поршневое уплотнение и, соответственно, увеличила бы ресурс работы гидроцилиндра без серьезных материальных затрат.

3. В качестве альтернативы способам финишной обработки внутренней поверхности гильз гидроцилиндров предлагается использовать новый способ, включающий последовательность операций: размерную лезвийную обработку, поверхностное пластическое де-

формирование жёсткими рабочими элементами и суперфинишную ПЦО шарами, поверхность которых имеет шероховатость R_a менее 0,08 мкм. Для реализации процесса суперфинишной ПЦО разработана конструкция инструмента – пневматического шарикового накатника, позволяющего получить шероховатость обработанной поверхности гильзы R_a менее 0,1 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство иностранных дел Республики Беларусь; Министерство экономики Республики Беларусь. Экономико-инвестиционный обзор 2009, Республика Беларусь. – Минск, 2009. – 35 с. – Режим доступа : http://www.latbel.lv/userfiles/file/rus_print.pdf. – Дата доступа : 25.05.2015.
2. **Куклев, Л. С.** Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности / Л.С. Сатель, В. В. Фролов, Д. А. Прокошин. – М. : Машиностроение, 1978. – 104 с.
3. **Кабаков, М. Г.** Технология производства гидроприводов / М. Г. Кабаков, С. П. Стесин. – М. : Машиностроение, 1974. – 192 с.
4. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. **Ящерицын, П. И.** Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжков, В. И. Аверченков. – Минск : Выш. шк., 1977. – 254 с.
6. Справочник технолога машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
7. **Бабичев, А. П.** Хонингование / А. П. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1965. – 100 с.
8. **Куликов, С. И.** Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов. – М. : Машиностроение, 1983. – 135 с.
9. **Куликов, С. И.** Хонингование : справ. пособие / С. И. Куликов, В. А. Романчук. – М. : Машиностроение, 1973. – 168 с.
10. **Фрагин, И. Е.** Новое в хонинговании / И. Е. Фрагин. – М. : Машиностроение, 1980. – 96 с.
11. **Подураев, В. Н.** Алмазное вибрационное хонингование отверстий в стальных закаленных деталях / В. Н. Подураев, А. А. Суворов, В. И. Карпов // Синтетические алмазы в промышленности : сб. ст. – Киев : Наукова думка, 1974. – С. 56–64.
12. Устройство для сообщения колебательного движения хонинговальной головке : а. с. 378313 СССР : МПК В 24 б 33/02 / И. К. Воробьев, П. А. Давыдов, А. В. Сандалов ; Риж. политехн. ин-т. – № 1609119/25-8 ; заявл. 11.01.71 ; опубл. 18.04.73. – 1973. – № 19. – С. 2.
13. **Муратов, К. Р.** Повышение эффективности финишной абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей методом растрового хонингования : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / К. Р. Муратов. – Пермь, 2010. – 153 л.
14. **Швачкина, М. В.** Судебное рассмотрение дел по заявлениям на нотариальные действия и отказ в их совершении : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.15 / М. В. Швачкина. – М., 2013. – 221 л.
15. **Киселев, С. П.** Полирование металлов / С. П. Киселев ; под ред. Г. Ф. Кудасова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1967. – 120 с.
16. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка поверхности металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bufo.ru>. – Дата доступа : 22.01.2015.
17. БЕЛАЗ – холдинг «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.belaz.by>. – Дата доступа : 22.01.2015.
18. ECOROLL AG Werkzeugtechnik [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ecoroll.de/en/ecoroll.html>. – Дата доступа : 22.01.2015.
19. Способ обработки внутренних поверхностей вращения заготовок из сталей без термообработки : пат. 2244619 РФ, С1 RU, МПК 7 В 24 В 39/02 / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая, А. В. Ткачев, Е. В. Титова. – № 2004102354/02 ; заявл. 27.01.04 ; опубл. 20.01.05. – 2005. – № 2. – С. 4.

Статья сдана в редакцию 11 июня 2015 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: 8-0222-24-18-15.

Елена Валерьевна Ильюшина, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: 8-0298-45-25-55.

Павел Викторович Афанасьев, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Александр Геннадьевич Суворов, студент, Белорусско-Российский университет.

Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Phone 8-0222-24-18-15.

Yelena Valeryevna Ilyushina, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Phone: 8-0298-45-25-55.

Pavel Viktorovich Afanasyev, MSc student, Belarusian-Russian University.

Aleksandr Gennadyevich Suvorov, student, Belarusian-Russian University.