

УДК 621.787

А. П. МИНАКОВ, М. Е. ЛУСТЕНКОВ, доктора технических наук,  
Е. В. ИЛЬЮШИНА, канд. техн. наук, П. В. АФАНАСЬЕВ  
(Белорусско-Российский университет, Беларусь, г. Могилев),  
e-mail: lenatit@tut.by

## Повышение качества гильз гидроцилиндров разной жесткости финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработкой

При изготовлении гильз гидроцилиндров для упрочняющей финишной операции предложено использовать неэнергоемкое универсальное оборудование для пневмоцентробежной обработки, повышающее эксплуатационные показатели пары трения гильза-уплотнитель.

**Ключевые слова:** гильза гидроцилиндра, финишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка, шероховатость поверхности, работа выхода электронов, контактная разность потенциалов, жесткость, износостойкость.

At manufacturing of hydraulic cylinder barrels for finishing strengthening operation it is suggested to use non-energy intensive universal equipment for pneumocentrifugal treatment, increasing performance characteristics of barrel-seal friction pair.

**Keywords:** hydraulic cylinder barrel, finishing strengthening pneumocentrifugal treatment, surface roughness, electronic work function, contact potential difference, stiffness, wear resistance.

Гильзы гидроцилиндров можно разделить на четыре группы [1]: I — жесткие; II — средней жесткости; III — малой жесткости; IV — тонкостенные [2].

Для упрочнения поверхностей деталей применяют пластическое деформирование. В работе [2] рассмотрены аспекты проектирования и осуществления чистового накатывания внутренних цилиндрических поверхностей деталей роликовым и шариковым накатниками. Жесткость внутренних цилиндрических поверхностей деталей, например, гильз, труб и втулок, определяет коэф-

фициент (табл. 1)  $K_c = \frac{t_n}{\sqrt{d_n}}$ , где

$t_n$  — толщина стенки;  $d_n$  — внутренний диаметр раскатываемой поверхности.

Сложность финишной обработки гильз заключается в том, что при использовании жесткого роликового накатника имеют место значительные отклонения в макро- и микрогеометрии, так



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 46)

### Выводы

1. Уточнены силовые взаимодействия деталей однодискового грузоупорного тормоза с винтовым замыканием, определяющие условие работоспособности тормозов данного типа на этапе проектирования.

2. Получены аналитические зависимости для определения основных параметров рассматриваемых тормозов, обеспечивающих их проектирование с рациональными энергозатратами при эксплуатации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. М.: Металлургия, 1983. 183 с.

2. **Александров М. П.** Подъемно-транспортные машины. М.: Высшая школа, 1985. 517 с.

3. **Александров М. П.** Тормоза подъемно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1976. 338 с.

4. **Грузоподъемные** машины / М. П. Александров, Л. Н. Колобов, Н. А. Лобов и др. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.

5. **Бондаревский Ф. П., Корнеев Г. Б.** Детали машин и подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1962. 552 с.

6. **Иванов М. Н., Комаров М. С.** Детали машин и подъемно-транспортные машины. Львов: Изд-во Львовского университета 1961. 558 с.

7. **Справочник** по кранам. В 2 т. Т. 2 / Под ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1988. 509 с.

8. **Справочник** по кранам. В 3 т. Т. 2 / Под ред. А. И. Дукельского. М.: Машгиз, 1962. 352 с.

9. **Иванченко Ф. К.** Конструкции и расчет подъемно-транспортных машин. Киев: Вища школа, 1983. 332 с.

10. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. М.: Наука, 1988. 720 с.

как в процессе обработки происходит не только поверхностное пластическое деформирование (ГШД) микровыступов, но и объемное деформирование [3].

К финишной обработке внутренней поверхности гильз, например, центрального опрокидывающего механизма (ЦОМ) предъявляют жесткие требования по допуску на цилиндричность по всей длине детали [4], а также по макрогеометрии и шероховатости обработанной рабочей поверхности гильзы, которая должна составлять  $Ra = 0,16 \div 0,63$  мкм.

При обработке внутренних цилиндрических поверхностей тонкостенных заготовок предусмотрена более грубая шероховатость, так как в целях исключения объемного деформирования заготовок и снижения риска некачественного изготовления применяют меньший натяг, чем при раскатывании жестких заготовок.

Известно, что 44 % отказов машин и механизмов связано с изнашиванием уплотнений [5]. Критерием предельного состояния гидроцилиндров является уменьшение общего КПД или увеличение более чем в 1,2 раза от установленного удельного объема выносимой рабочей жидкости, что не устраняется заменой уплотнителей и опорных колец.

Гидроцилиндры изготавливают в соответствии с учетом требований ГОСТ 16514—96 и ГОСТ 17411—91. Для гидроцилиндров с номинальным давлением  $p \geq 10$  МПа КПД должен составлять не менее 90 %.

Показатель долговечности гидроцилиндров — гамма-процентный ресурс, т. е. суммарная наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с гамма-вероятностью, выраженной в процентах.

Ресурсы гидроцилиндров, составляющие 90 %, должны соответствовать:

для одноступенчатого гидроцилиндра при  $p \leq 16$  МПа и хо-

де  $s \leq 500$  мм — не менее  $2,5 \times 10^6$  циклов (двойных ходов); при  $s > 500$  мм — не менее  $2,5 \cdot 10^9 / (2s)$  циклов; при  $p > 16$  МПа и  $s \leq 500$  мм — не менее  $10^6$  циклов; при  $s > 500$  мм — не менее  $10^6 / (2s)$  циклов;

для телескопических гидроцилиндров — не менее  $0,5 \cdot 10^5$  циклов.

Показатель безотказности гидроцилиндров — гамма-процентная наработка до отказа, т. е. наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с гамма-вероятностью, выраженной в процентах.

Наработки гидроцилиндров до отказа, составляющие 90 %, должны соответствовать:

для одноступенчатых гидроцилиндров при  $p \leq 16$  МПа и  $s \leq 500$  мм — не менее  $0,8 \times 10^6$  циклов; при  $s > 500$  мм — не менее  $0,8 \cdot 10^9 / (2s)$  циклов; при  $p > 16$  МПа и  $s \leq 500$  мм — не менее  $0,3 \cdot 10^6$  циклов; при  $s > 500$  мм — не менее  $0,3 \times 10^9 / (2s)$  циклов;

для телескопических гидроцилиндров — не менее 104 циклов. Нарработку до отказа и ресурс проверяют в соответствии с ГОСТ 22976—78 на режимах, установленных нормативными до-

кументами. Допускается надежность оценивать по пройденному гидроцилиндром пути [6, 7].

Высокая эффективность гидроцилиндра обеспечивается полной герметичностью. При этом его долговечность зависит от всех составляющих. Основные причины отказов силовых гидроцилиндров:

вынос масла по штоку из-за нарушения уплотнений штока; внутренние перетечки рабочей жидкости в результате изнашивания резиновых уплотнений поршня;

деформации и изнашивание корпуса цилиндра, поверхностей гильзы, поршня, штока.

Основные отказы в работе связаны с изнашиванием уплотнений, чуть меньше отказов в результате изогнутости штока, остальные отказы составляют  $\approx 5 \div 7$  % [5, 8].

Наибольшему изнашиванию подвергаются резиновые уплотнения поршня, крышки цилиндра и грязесъемника [9, 10], в результате чего повышаются внутренние и наружные утечки рабочей жидкости, снижается КПД гидроцилиндра. Ввиду потери эластичности и изнашивания уплотнений в сливную полость гид-

Таблица 1

Значения коэффициента  $K_c$  для цилиндрических деталей (трубы и втулки) в зависимости от категории жесткости и диаметра отверстия

Диаметры отверстий, мм	Категория жесткости			
	Жесткие	Средняя жесткость	Малая жесткость	Тонкостенные детали
До 25	1,50	1,00÷1,50	0,50÷1,00	0,50
25÷50	1,55	1,05÷1,55	0,55÷1,05	0,55
50÷75	1,60	1,10÷1,60	0,60÷1,10	0,60
75÷100	1,65	1,15÷1,65	0,65÷1,15	0,65
100÷125	1,70	1,20÷1,70	0,70÷1,20	0,70
125÷150	1,75	1,25÷1,75	0,75÷1,25	0,75
150÷175	1,80	1,30÷1,80	0,80÷1,30	0,80
175÷200	1,85	1,35÷1,85	0,85÷1,35	0,85
200÷225	1,90	1,40÷1,90	0,90÷1,40	0,90
225÷250	1,95	1,45÷1,95	0,95÷1,45	0,95
250 и более	2,00	1,50÷2,00	1,00÷1,50	1,00

роцилиндра попадают абразивные частицы, которые ускоряют процесс изнашивания, что приводит к разрыву резиновых уплотнений.

Наибольшее изнашивание уплотнений происходит в подвижных соединениях "поршневое кольцо — гильза гидроцилиндра" и "уплотнение — шток".

Рассмотрим пару трения "поршневое кольцо — гильза гидроцилиндра" и возможности повышения ее надежности и долговечности.

Гильзы гидроцилиндров изготавливают в основном из бесшовных горячекатаных труб (ГОСТ 8732—78), холоднотянутых и холоднокатаных труб (ГОСТ 8734—75) из сталей 20, 35 и 45 (ГОСТ 1050—88) [11, 12].

Для уплотнения поршня чаще всего применяют резиновые круглые кольца (ГОСТ 9833—73), которые ввиду эластичности плотно прилегают к мельчайшим неровностям металлической поверхности, что обеспечивает герметичность. В процессе эксплуатации из-за воздействия рабочей жидкости, температуры и нагрузок упругие свойства уплотнений ухудшаются, они изнашиваются. При этом в зависимости от физико-механических свойств резины изнашивание может быть трех видов: усталостное, абразивное и в результате заеданий [13].

Усталостное разрушение поверхностных слоев уплотнительного элемента происходит из-за циклических нормальных напряжений и сил трения. Многократное деформирование резины в отдельных пятнах контакта приводит к разрушению, происходит отрыв материала.

Абразивное изнашивание характеризуется микрорезанием, которое происходит при движении внедрившихся выступов металлической поверхности по уплотнению.

Изнашивание при заедании происходит из-за увеличения

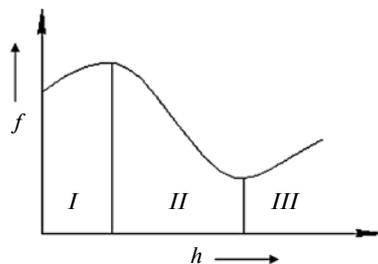


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $f$  трения от относительной толщины  $h$  пленки смазочного материала (I — трение без смазочного материала; II и III — трение со смазочным материалом)

контактного давления, которое может возникать, например, при попадании абразивных частиц под уплотняющую кромку, в результате этого значительно увеличивается сила трения, что приводит к интенсивному изнашиванию.

Механизм трения определяет наличие или отсутствие пленки смазочного материала между контактирующими поверхностями. На рис. 1 приведена зависимость коэффициента  $f$  трения от относительной толщины  $h$  пленки смазочного материала — отношение толщины  $\delta$  пленки между контртелами к параметру  $Rz$  шероховатости поверхности [5]. Поскольку уплотнения поршня контактные, пленка в паре трения может отсутствовать или ее толщина будет очень незначительной. Поэтому на изнашивание элементов значительно влияет шероховатость поверхности гильзы. Чтобы снизить параметр  $Rz$ , надо увеличить толщину  $h$  пленки смазочного материала (см. рис. 1, обратная зависимость), следовательно, режим трения перейдет в трение со смазочным материалом, коэффициент трения уменьшится. Очевидно, что на подвижные элементы в металлополимерной паре действуют и силы сухого трения, а при наличии тонкого слоя рабочей жидкости трение может быть смешанным и граничным [14].

Для уплотнений поршня установлены требования по надеж-

ности. При номинальных значениях давления и скорости движения поршня ресурс резиновых уплотнений должен составлять не менее 300 км, а для комбинированных (наполненный полиамид или фторопласт, термопластичный полиуретан) — не менее 700 км (ГОСТ 14896—84, ГОСТ 18829—73).

Согласно ГОСТ 30408—96 подвижные уплотнения должны обеспечивать герметичность в течение 4000 ч.

Уплотнительное кольцо поршня при установке сжимается и заполняет впадины микрорельефа гильзы, по которым просачивается масло. Работа пары трения характеризуется тремя этапами нагружения уплотнителя [15]. Сначала в поверхностном слое уплотнителя в результате деформации создаются напряжения, способствующие заполнению микронеровностей, и начальная поверхность контакта сопряженных поверхностей, которая исключает утечки. На втором этапе площадь контакта постепенно уменьшается, наблюдаются старение уплотнительного элемента и его изнашивание. Третий этап характеризуется наибольшим изнашиванием уплотнителя, в результате рабочая жидкость проникает в полости микрорельефа гильзы, что приводит к полному разъединению поверхностей трения, следовательно, ресурс уплотнения полностью израсходован.

Ресурс уплотнительного элемента зависит от рабочего давления, размеров площадки контакта поверхностей трения, шероховатости сопряженных поверхностей, особенностей микрорельефа гильзы и физических свойств сопрягаемых материалов.

Для увеличения износостойкости материалов пары трения необходимо соблюдать правило положительного градиента механических свойств и минимизировать внедрение контактируемого тела в сопряженную поверхность. Положительный градиент меха-

нических свойств обеспечивается изготовлением уплотнений с заданной точностью и шероховатостью поверхностей, а также применением материалов, позволяющих снизить коэффициент трения. Минимальное внедрение поверхностей обеспечивается снижением показателя шероховатости поверхности гильзы [15].

Установлено, что главным фактором для трения и изнашивания резинового уплотнения является шероховатость рабочей поверхности гильзы.

Установлено, что в паре трения сталь—полимер (гильза гидроцилиндра — уплотнительное кольцо) при шероховатости стальной поверхности  $Ra > 0,1$  мкм полимер начинает интенсивно изнашиваться [16, 17].

Эксплуатационные характеристики гильзы гидроцилиндра зависят от качества поверхностного слоя рабочей поверхности, получаемого при механической обработке.

Поверхностный слой может отличаться от основного металла структурой, фазовым и химическим составами. Эти изменения происходят в процессе обработки заготовки. Значительное влияние на формирование поверхностного слоя оказывает последовательность и сочетание операций обработки, а также технологическая наследственность [18, 19].

На рис. 2 представлена структура поверхностного слоя, состоящая из следующих зон [20—22]:

зона 1 — адсорбированные из окружающей среды молекулы и атомы органических и неорганических веществ (толщина  $1 \div 0,001$  мкм);

зона 2 — продукты химического взаимодействия металла с окружающей средой (оксиды) (толщина  $10 \div 1$  мкм);

зона 3 — граничная, толщина которой составляет несколько межатомных расстояний, имеет иные, кристаллическую и элект-

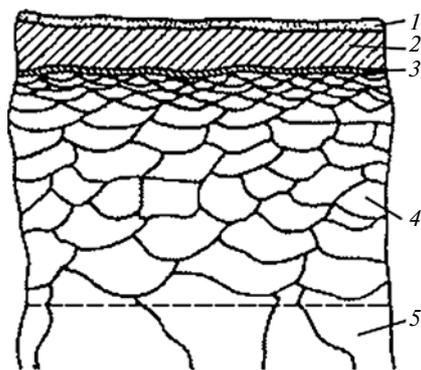


Рис. 2. Структура поверхностного слоя металла

ронную структуры, чем в объеме материала;

зона 4 — измененные (по сравнению с основным металлом) структура, фазовый и химический составы, которые возникают при изготовлении детали и изменяются в процессе эксплуатации;

зона 5 — основной металл.

Разделение поверхностного слоя на зоны условное. Толщина каждой зоны может меняться в зависимости от состава металла, условий обработки и эксплуатации изделия.

Исследования показали, что выделить один показатель, определяющий качество поверхностного слоя деталей, невозможно. Для оценки состояния поверхностного слоя используют комплекс показателей. Их делят на геометрические (шероховатость поверхности, волнистость и макроотклонения) и физико-механические (твердость, остаточные напряжения, наклеп).

Изнашивание в паре трения "гильза — поршневое уплотнение" имеет усталостный характер и происходит в результате циклического нагружения. Основные показатели, определяющие эксплуатационные свойства данной пары трения: сопротивление усталости, износостойкость и герметичность соединения.

Герметичность соединений зависит от формы уплотнения, физико-механических свойств его

материала, параметров микро- и макрогеометрии, степени упрочнения.

Существует ряд методов исследования свойств поверхностей и качества их обработки. Для управления свойствами обработанных поверхностей необходимо знать изменения физических и химических показателей, характеризующих твердое тело, например, таких, как работа выхода электронов (РВЭ) [23].

Процессы в паре трения гильза—уплотнитель зависят от энергетического состояния поверхностного слоя отверстия гильзы. Так как молекулы и атомы, находящиеся на поверхности твердого тела, имеют свободные связи, то поверхностный слой твердого тела обладает избытком энергии, что способствует возникновению адсорбции (поглощение), когезии (сцепление), адгезии (прилипание), смачивания и пр. Избыток энергии, приходящийся на единицу поверхности, называется поверхностной энергией [16].

Одним из показателей энергетического состояния поверхности является РВЭ [23]. По изменению РВЭ можно судить о многих процессах, происходящих на поверхности твердого тела и межфазных поверхностных слоях. РВЭ зависит от состояния поверхности и структурных изменений, а следовательно, от качества и способа ее обработки, наличия оксидов, адсорбционных газов, молекул смазочного материала и пр. Чем выше РВЭ в поверхностном слое, тем выше эксплуатационные характеристики изделия. Чем ниже РВЭ, тем интенсивнее изнашивание поверхности.

При изучении трибофизических и трибохимических процессов для измерения РВЭ используют метод контактной разности потенциалов (КРП). Разность потенциалов  $\Delta U_k$  — обратная величина РВЭ, т. е. наименьшему КРП соответствует наибольшее РВЭ.

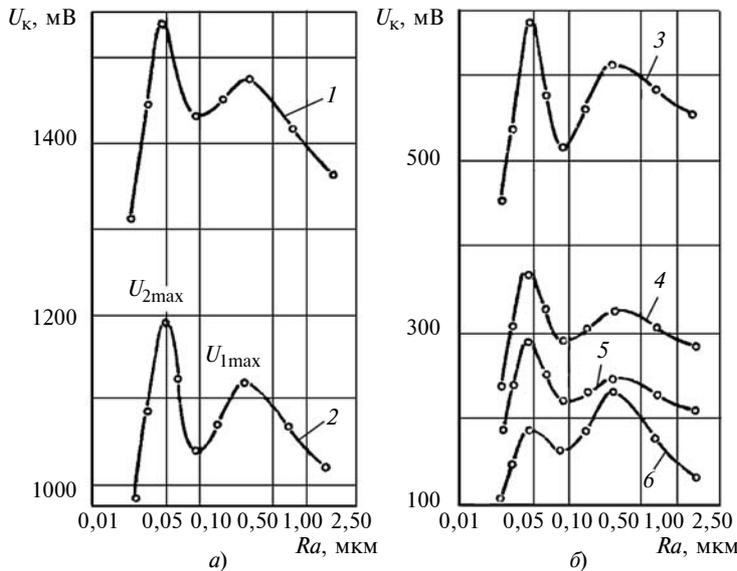


Рис. 3. Зависимости  $U_k$  (КПП) от параметра шероховатости  $Ra$  поверхностей деталей из алюминия (1) и цинка (2) (а), латуни Л63 (3), стали 40Х (4), бронзы БрКМц3-1 (5) и меди (6) (б)

На рис. 3 представлены зависимости поверхностного потенциала  $U_k$  от параметра  $Ra$  шероховатости поверхностей для разных материалов [23]. Данные зависимости имеют по два максимума ( $Ra = 0,32$  и  $0,05$  мкм). Наибольшая РВЭ наблюдается при  $Ra \leq 0,025$  мкм, т. е. при такой шероховатости поверхность имеет наибольшую износостойкость, но для достижения данного параметра требуются большие трудозатраты.

Характер зависимости КПП от качества обработанной поверхности объясняется теорией усталостного разрушения материалов [24]. Кроме того, величина РВЭ зависит от числа, вида и динамики дефектов в поверхностном слое.

При механической обработке поверхностей образуется рельефный слой, под ним слой, насыщенный трещинами, а за ним слой со значительными остаточными напряжениями с повышенной плотностью дислокаций (рис. 4). Максимальные напряжения находятся на границе между зонами А и В, минимальные — на границе между зоной В и исходным ненарушенным метал-

лом. Соотношение толщин зон А и В 1:9.

При финишной обработке абразивным инструментом нарушаются толщины слоев А и В, их границы залегания, высоты неровностей профиля поверхности, изменяются структуры поверхностных слоев, что обуславливает разную плотность дефектов по всей обработанной поверхности.

При грубой обработке поверхности ( $Ra = 1,25 \div 2,00$  мкм) наблюдается плавное повышение КПП. Это объясняется формиро-

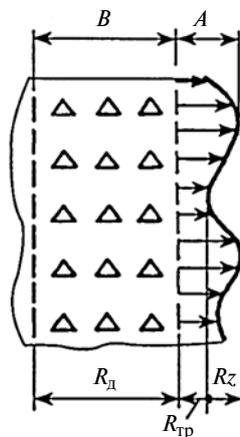


Рис. 4. Схема поверхностного слоя ( $R_{тр}$  — слой с трещинами;  $R_d$  — зона многочисленных дислокаций)

ванием поверхностного слоя, содержащего большое число дефектов разных видов, которые являются активными центрами с низкими РВЭ. При снижении  $Ra$  до  $0,32$  мкм происходит рост КПП. Это объясняется значительной разориентацией и большим размельчением блоков зерен металла и интенсивным образованием дефектов, а также новых поверхностей [23].

Анализ зависимости  $U_k$  от  $Ra$  для стали 40Х показал, что при финишной обработке внутренней цилиндрической поверхности гильзы гидроцилиндров необходимо избегать шероховатостей, соответствующих двум максимумам КПП, т. е.  $Ra = 0,05$  и  $0,32$  мкм. Предпочтительные назначения:  $Ra > 0,05$  мкм,  $Ra < 0,32$  и  $Ra = 0,08 \div 0,10$  мкм, что подтверждено экспериментальными исследованиями с применением суперфинишной пневмоцентробежной обработки (ПЦО) гильз гидроцилиндров [25].

Рентгеновские и электронографические исследования полированных поверхностей показали, что на тонкие поверхностные слои (слои Бейльби), толщина которых колеблется от  $10^{-3}$  мкм до нескольких микрометров, состоят из большого числа беспорядочно расположенных и чрезвычайно мелких кристаллов [23], т. е. поверхность металла находится в высокодисперсном кристаллическом состоянии.

Измельченная ультрадисперсная (размер частиц  $0,10 \div 0,01$  мкм) структура поверхности характеризуется высокой прочностью. Полирование устраняет дефекты и значительно увеличивает объемную прочность [23].

Зависимость  $U_k$  от параметров  $Ra$  нельзя объяснить только различием параметров профиля поверхности, важно и физическое состояние поверхности при достижении данной шероховатости. Данные зависимости для разных материалов имеют одинаковый характер. Это указывает на то,

Таблица 2

Значения натяга  $t$  при раскатывании жесткими сепараторными раскатниками при разных исходном и требуемом параметрах шероховатости, мкм

Исходный $Ra$ , мкм	Требуемый $Ra$ , мкм			
	0,32	0,16	0,08	0,04
1,25	0,010±0,040	0,015±0,050	0,02±0,06	0,02±0,08
2,50	0,030±0,060	0,040±0,070	0,06±0,09	0,08±0,11
5,00	0,060±0,100	0,080±0,130	0,09±0,16	0,14±0,19
10,00	0,120±0,170	0,140±0,190	0,17±0,22	0,19±0,24
20,00	0,015±0,220	0,180±0,230	0,21±0,27	—

что есть единый механизм возникновения дислокаций и управления их движением, а также появлением и ростом трещин [23].

В работе [26] представлены технологические возможности достижения шероховатости  $Ra = 0,04$  мкм внутренней цилиндрической поверхности с помощью жесткого роликового накатника (табл. 2). Обеспечение данной шероховатости обусловлено полем допуска (натяг) для рабочей поверхности гильзы. Однако технологические возможности отечественного оборудования недостаточны для финишной обработки гильз растачиванием с последующим ППД поверхности заготовки.

Износостойкость рабочей поверхности гильзы можно повысить рациональным сочетанием

технологических операций, т. е. определенной их последовательностью (табл. 3) [25]. Оптимальной обработкой для внутренних поверхностей гильз гидроцилиндров является ПЦО [25].

Для изготовления гильз высокого качества необходимо дальнейшее совершенствование финишной упрочняющей ПЦО.

Деформационное упрочнение поверхности выполняют стальными шарами, движущимися по кольцевой траектории в турбулентном кольцевом потоке сжатого воздуха и перемещающимися по обрабатываемой поверхности относительно продольной оси заготовки. Происходит импульсно-ударное воздействие на исходный микрорельеф, полученный в результате лезвийной обработки [1].

Исследовали применение ПЦО для внутренней поверхности выдвигной трубы ЦОМ из стали 45 (ГОСТ 1050—89,  $HV = 156 \div 217$ ), прошедшей нормализацию: наружный диаметр — 100 мм; диаметр отверстия —  $87^{+0,14}$  мм; длина 867 мм; допуск на цилиндричность — 0,04 мм;  $Ra = 0,63$  мкм. Указанный в технической документации параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,63$  мкм является оптимальным.

Финишную упрочняющую ПЦО опытной партии гильз выполняли на токарно-винторезном станке 1М63 в специальном приспособлении.

Исходная шероховатость поверхности под упрочняющую ПЦО составляла  $Ra = 2,5$  мкм. Использовали двухрядный накатник пневмоцентробежного действия, оснащенный стальными шарами. Параметры режима обработки: давление подводимого к инструменту сжатого воздуха  $p = 0,25$  МПа; частота вращения заготовки  $n = 800$  мин<sup>-1</sup>; подача инструмента  $s = 240$  мм/мин; число ходов инструмента  $i = 1$ .

В результате обработки опытной партии заготовок достигнуты следующие параметры поверхности:  $Ra \leq 0,63$  мкм; цилинд-

Таблица 3

Последовательность выполняемых операций и значение показателя качества обработки отверстий при разных сочетаниях технологических операций

Вариант	Номер операции					$Ra$ , мкм	Износ, мкм
	1	2	3	4	5		
1	Ш	ЧШ	Х	Р	Н	0,21	6
2	Ш	ЧШ	Х	ЧХ	ЧП	0,24	8
3	Ш	ЧП	Х	П	ЧП	0,17	7
4	Ш	Х	ЧХ	ЧП	Н	0,17	4
5	Ш	Х	П	ЧП	Н	0,19	2
6	Ш	Х	П	Н	—	0,22	7
7	Ш	Х	ЧХ	ЧП	—	0,23	10
8	Ш	Х	ЧХ	Н	—	0,27	6
9	Ш	Х	ЧП	Н	—	0,21	5
10	ЧР	ПЧР	ЧИР	Н	Упрочняющая ПЦО	0,16	—
11	ЧР	ПЧР	ЧИР	Н ( $Ra = 0,16$ мкм)	Суперфинишная ПЦО	0,10±0,16	—

Примечание. Обозначения: Ш — шлифование; Х — хонингование; ЧШ — чистовое шлифование; ЧХ — чистовое хонингование; Н — накатывание; П — притирка; ЧП — чистовая притирка; ЧР — черновое растачивание; ПЧР — полустивое растачивание; ЧИР — чистовое растачивание.

ричность  $\leq 0,04$  мкм; внутренний диаметр гильзы  $87^{+0,14}$  мм.

При исходной шероховатости поверхности под накатку  $Ra = 0,8 \div 0,5$  мкм ( $s = 600$  мм/мин) достигается шероховатость  $Ra = 0,14 \div 0,16$  мкм.

По сравнению с жестким роликовым накатником, традиционно используемым для изготовления нежестких заготовок гильз гидроцилиндров, пневмонакатник центробежного действия имеет неоспоримые преимущества: не искажает геометрию, полученную на предшествующей ПЦО операции; не требует применения СОЖ, потребляет значительно меньше электроэнергии; заготовка при обработке не нагревается; стоимость инструмента существенно ниже ввиду простоты изготовления. При ПЦО отверстия диаметром 100 мм развиваемая шаром диаметром 10 мм центробежная сила составляет 30 Н, крутящий момент — 1,5 Н·м.

В отличие от традиционных процессов резания (хонингование, обработка щетками) для повышения износостойкости можно применять финишную упрочняющую ПЦО для обработки внутренней рабочих поверхностей картеров автогидроусилителей и других корпусных деталей, где требуется цилиндричность внутренней поверхности не выше 3 мкм, что обеспечивается предшествующей операцией хонингования и сохраняется после упрочняющей ПЦО.

Таким образом, разработана высокотехнологичная энергосберегающая финишная упрочняющая ПЦО для нежестких гильз гидроцилиндров. Применяемый инструмент — пневматический шариковый накатник центробежного действия со стальными шарами, прост, надежен и не требует применения СОЖ.

Финишная упрочняющая ПЦО для внутренней поверхности гильз гидроцилиндров обеспечивает требуемую цилиндричность, сохраняя данный показа-

тель от предшествующей ПЦО технологической операции.

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей гильз гидроцилиндров предлагается назначать их шероховатость с учетом КРП, избегая двух максимумов, которым соответствуют минимальные значения РВЭ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Технологические** основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении / А. П. Минаков, И. Д. Камчицкая, Е. В. Ильюшина и др. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. 251 с.

2. **Парфиянович В. С.** Руководство по проектированию процессов чистового накатывания. Минск: Польша, 1983. 88 с.

3. **Технология** поверхностного пластического деформирования автомобильных деталей: РТМ 37.002.0024—71 / Под ред. В. А. Карпова. М.: Типография НИИТавтопрома, 1971. 100 с.

4. **Справочник** конструктора машиностроителя. Т. 1 / Под ред. М. Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2006. 928 с.

5. **Богдан Н. В.** Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Пневматические и гидравлические системы. Минск: Ураджай, 2002. 426 с.

6. **ГОСТ 18464—96.** Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытаний. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 13 с.

7. **ГОСТ 16514—96.** Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 3 с.

8. **Гидравлика**, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

9. **Токаренко В. М.** Надежность гидропривода автомобилей-самосвалов. Киев: Высшая школа, 1989. 183 с.

10. **Крившин А. П., Суриков А. Я., Баженов В. Г.** Повышение надежности и долговечности дорожных машин / Под ред. А. П. Крившина. М.: Транспорт, 1966. 187 с.

11. **Марутов В. А., Павловский С. А.** Гидроцилиндры. Конструкции и расчет. М.: Машиностроение, 1966. 171 с.

12. **Кабаков М. Г., Стесин С. П.** Технология производства гидроприводов. М.: Машиностроение, 1974. 192 с.

13. **Техническая** диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта и др.; под общ. ред. Т. М. Башты. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.

14. **Попов Д. Н.** Механика гидро- и пневмоприводов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 320 с.

15. **Березин М. А., Кузнецов В. В., Водяков В. Н.** Прогнозирование ресурса уплотнительных соединений в гидросистемах // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 10. С. 36—41.

16. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника: Износ и безызносность. М.: МСХА, 2001. 616 с.

17. **Мышкин Н. К., Петроковец М. И.** Трибология. Принципы и приложения. Гомель: ИММС НАНБ, 2002. 310 с.

18. **Гасанов Ю. Н.** Износ поверхностей деталей, обработанных при различных сочетаниях технологических операций // Вестник машиностроения. 2001. № 4. С. 50—52.

19. **Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И.** Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Высшая школа, 1977. 254 с.

20. **Богданович П. Н., Прушак В. Д.** Трение и износ в машинах. Минск: Высшая школа, 1999. 374 с.

21. **Рудзит Я. А.** Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Рига: РПИ, 1982. 102 с.

22. **Фельдштейн Е. Э., Баршай И. Л., Шелег В. К.** Управление формированием качества поверхности деталей при механической обработке: Монография. Минск: БИТУ, 2006. 227 с.

23. **Шпеньков Г. П.** Физикохимия трения. Минск: Университетское, 1991. 397 с.

24. **Иванова В. С., Терентьев В. Ф.** Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 455 с.

25. **Ильюшина Е. В.** Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров: Дис. ... канд. техн. наук. Могилев, 2009. 157 с.

26. **Одинцов Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.