

УДК 621.793

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ШТОКОВ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ**

**д-р техн. наук, проф. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск),  
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН  
(Полоцкий государственный университет),  
А.П. ЯЛОВИК  
(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк)

*Разработан технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров строительного-дорожных машин гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием, рекомендуемый при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа. Испытания показали, что износостойкость восстановленных по разработанной технологии рабочих поверхностей штоков выше, чем у новых, в 1,15–1,25 раза.*

**Ключевые слова:** восстановление штоков, гиперзвуковая металлизация, стендовые испытания.

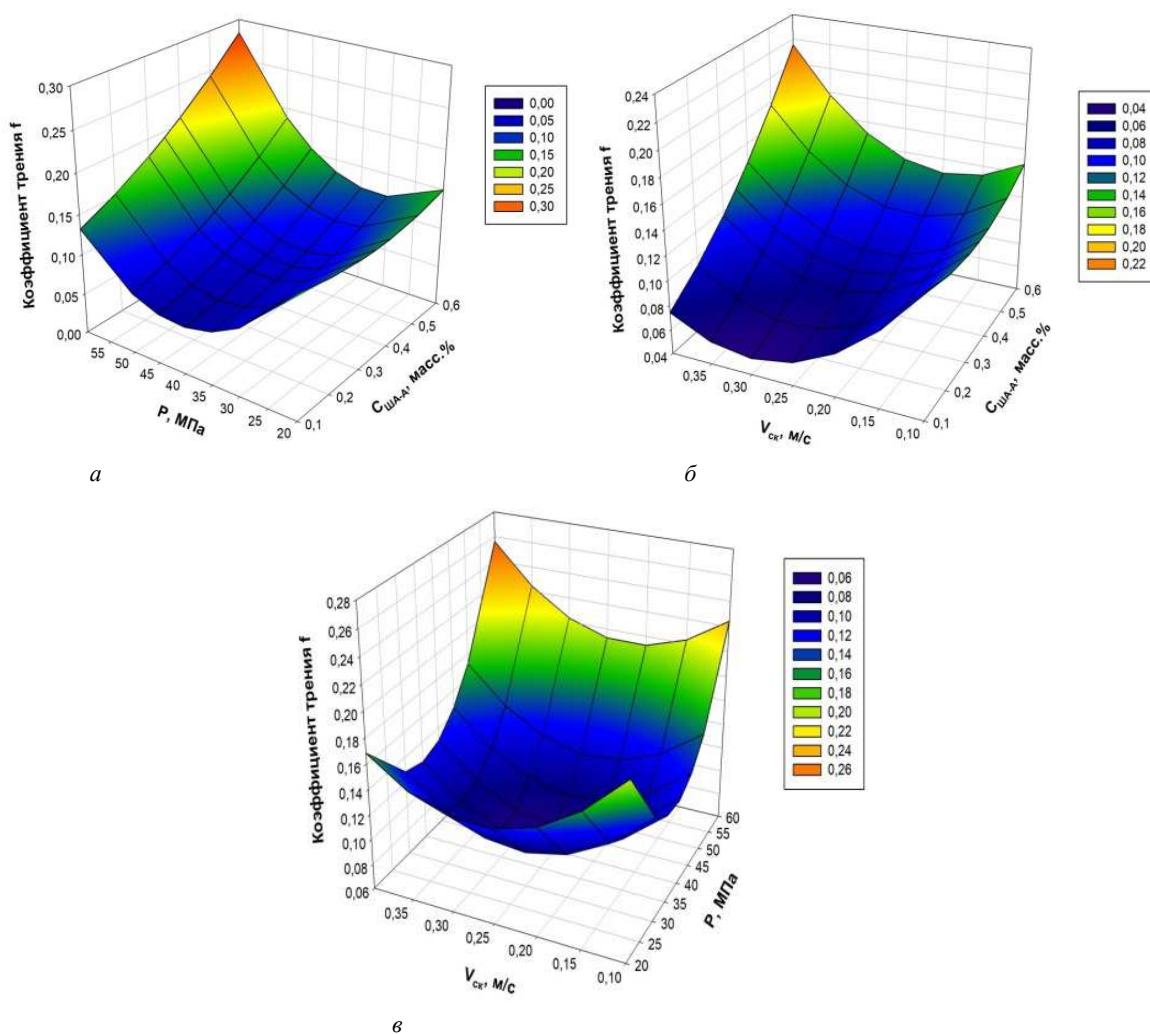
**Введение.** Тяжелые условия эксплуатации строительных и строительного-дорожных машин отрицательно сказываются на эффективности их использования, обусловленной выходом из строя быстроизнашивающихся деталей, в т.ч. компонентов гидропривода, среди которых одним из наиболее интенсивно изнашивающихся и дорогостоящих элементов является шток. Ежегодные суммарные затраты в Республике Беларусь на ремонт гидроцилиндров и приобретение новых штоков различных типов только для строительного-дорожных машин составляют более 600 тыс. долл. США.

Выполненные в Полоцком государственном университете и Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси исследования показали, что для восстановления штоков целесообразно использовать метод гиперзвуковой металлизации (ГМ), который в настоящее время является одним из наиболее эффективных и экономичных приемов формирования коррозионноустойчивых и износостойких покрытий [1]. Проанализирован эффект трибомеханического модифицирования поверхности трения, наблюдаемый в процессе фрикционного взаимодействия пар трения в присутствии смазки с алмазно-графитовой наноразмерной добавкой (АМНД) и проявляющийся в существенном улучшении противоизносных и антифрикционных свойств трущихся поверхностей [2; 3]. Отмечена необходимость разработки процесса, позволяющего восстанавливать изношенные поверхности штоков силовых гидроцилиндров нанесением покрытий гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомеханическим модифицированием [4].

**Основная часть.** *Определение режимов трибомодифицирования напыленных покрытий.* Характер протекания процесса трибомеханического модифицирования зависит от целого ряда факторов: свойств самих материалов, из которых изготовлены элементы трибосопряжения, параметров шероховатости поверхности трения, режимов трения, характеристик прирабочной композиции, включая концентрацию наноразмерного сверхтвердого модификатора в ней. Эффективность процесса трибомеханического модифицирования обычно оценивается по уровню повышения твердости (износостойкости) поверхности трения, степени снижения коэффициента трения и продолжительности стадии приработки трибосопряжения, фиксируемой по наступлению стабилизации коэффициента трения [5].

Определение режимов трибомеханической обработки газотермических покрытий и состав прирабочной композиции осуществлялись с учетом следующих экспериментальных данных, полученных в ходе триботехнических испытаний. Материалом покрытия являлся композит состава сталь 90Х18МФ – сталь 12Х18Н12Т, полученный гиперзвуковой металлизацией проволоками из мартенситной (90Х18МФ) и аустенитной (12Х18Н12Т) сталей с соотношением диаметров проволок  $D_1/D_2 = 1,20$ . Исходная шероховатость поверхности  $Ra = 0,63–0,80$  мкм. Основа прирабочной композиции – пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87), число пенетрации – 300 ед. Модифицирующая добавка – алмазно-графитовая шихта ША-А (ТУ РБ 1000561180.003-2003), размер частиц  $d_v = 10–50$  нм. Характеристика контртела: материал – сталь У8, твердость 64–65 HRC, исходная шероховатость поверхности  $Ra = 0,63–0,80$  мкм. Схема трибоконтакта – возвратно-поступательное перемещение контактирующих тел. Параметры оптимизации: концентрация добавки ША-А в смазке ( $C_{ША-А} = 0,10–0,60$  масс.%), давление в зоне трибоконтакта  $P = 20–60$  МПа и скорость скольжения в зоне трибоконтакта  $V_{ск} = 0,10–0,40$  м/с.

Анализ приведенных на рисунках 1–3 результатов показывает, что в случае использования приработочного состава с концентрацией алмазно-графитовой шихты в пределах  $C_{ША-А} = 0,25–0,50$  масс.% процесс приработки протекает достаточно интенсивно, и уже после пути трения  $L = 1000–1500$  м наступает стабилизация коэффициента трения. При использовании приработочной композиции с концентрацией алмазно-графитовой шихты  $C_{ША-А} < 0,25$  масс.% продолжительность процесса приработки рабочей поверхности газотермического покрытия чрезвычайно велика. Это обусловлено недостаточным содержанием в приработочном составе сверхтвердых частиц, обеспечивающих проявление эффекта трибомеханического модифицирования поверхности трения.



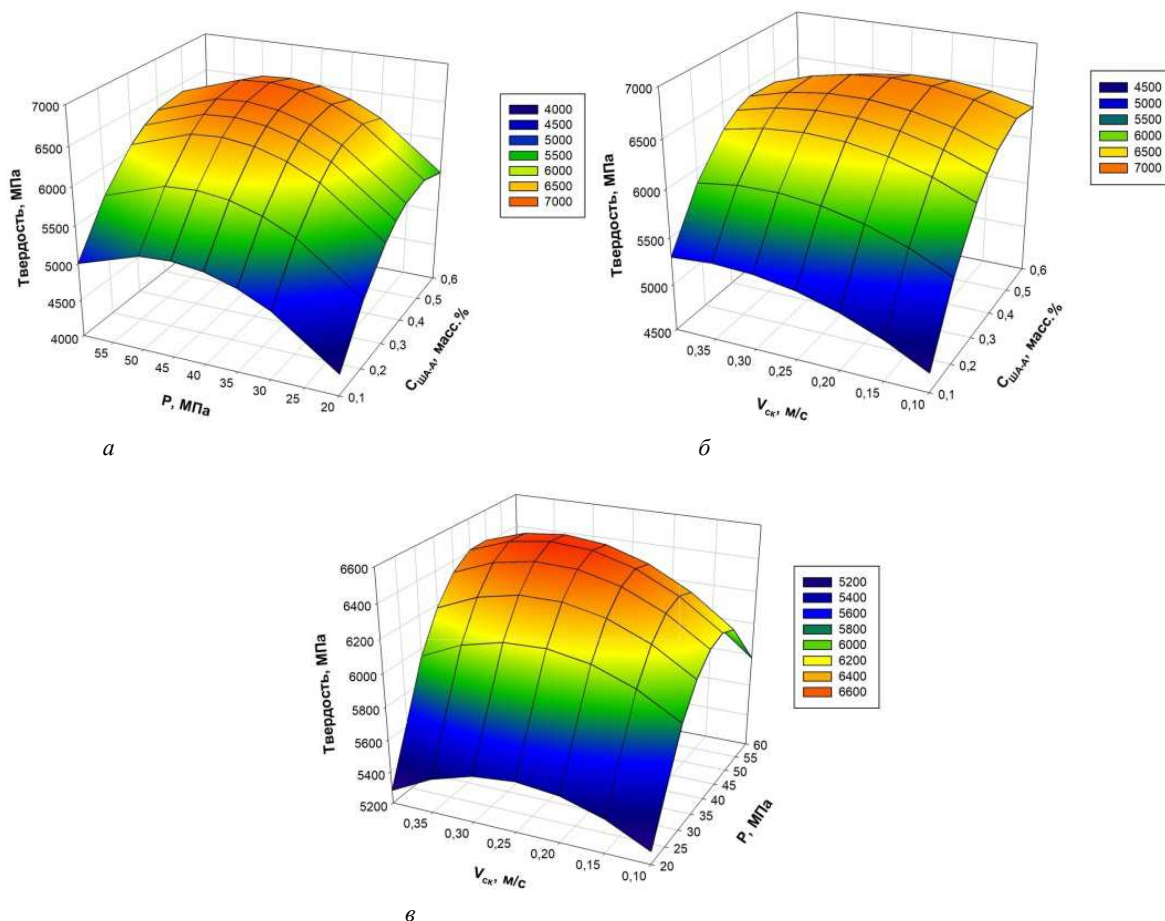
*a* – концентрации добавки  $C_{ША-А}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{ск} = 0,25$  м);  
*б* – концентрация добавки  $C_{ША-А}$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $P = 40$  МПа);  
*в* – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $C_{ША-А} = 0,35$  масс.%)

**Рисунок 1.** – Зависимость коэффициента трения  $f$  исследуемых факторов процесса

При концентрации алмазно-графитовой шихты в смазке  $C_{ША-А} > 0,50$  масс.% на начальной стадии происходит резкое снижение коэффициента трения, однако через некоторое время наблюдается такое же резкое его увеличение с последующим наступлением задира. Это, вероятно, связано с чрезмерно повышенной вязкостью смазочной композиции при таком содержании в ней модификатора, ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения. Наряду с этим повышенное содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции приводит к существенному увеличению стоимости последней.

Наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок  $P = 40–50$  МПа при скорости

скольжения  $V_{ск} = 0,20-0,35$  м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне  $f = 0,06-0,09$  наступает после приработки на пути трения  $L = 1480-1860$  м, твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50–70%. При давлениях  $P < 40$  МПа стадия приработки протекает на пути трения более  $L = 3000$  м, повышение твердости поверхности составляет не более 10–25%, а коэффициент трения стабилизируется на уровне  $f = 0,10-0,12$ . При давлениях  $P > 50$  МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира с резким возрастанием коэффициента трения, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

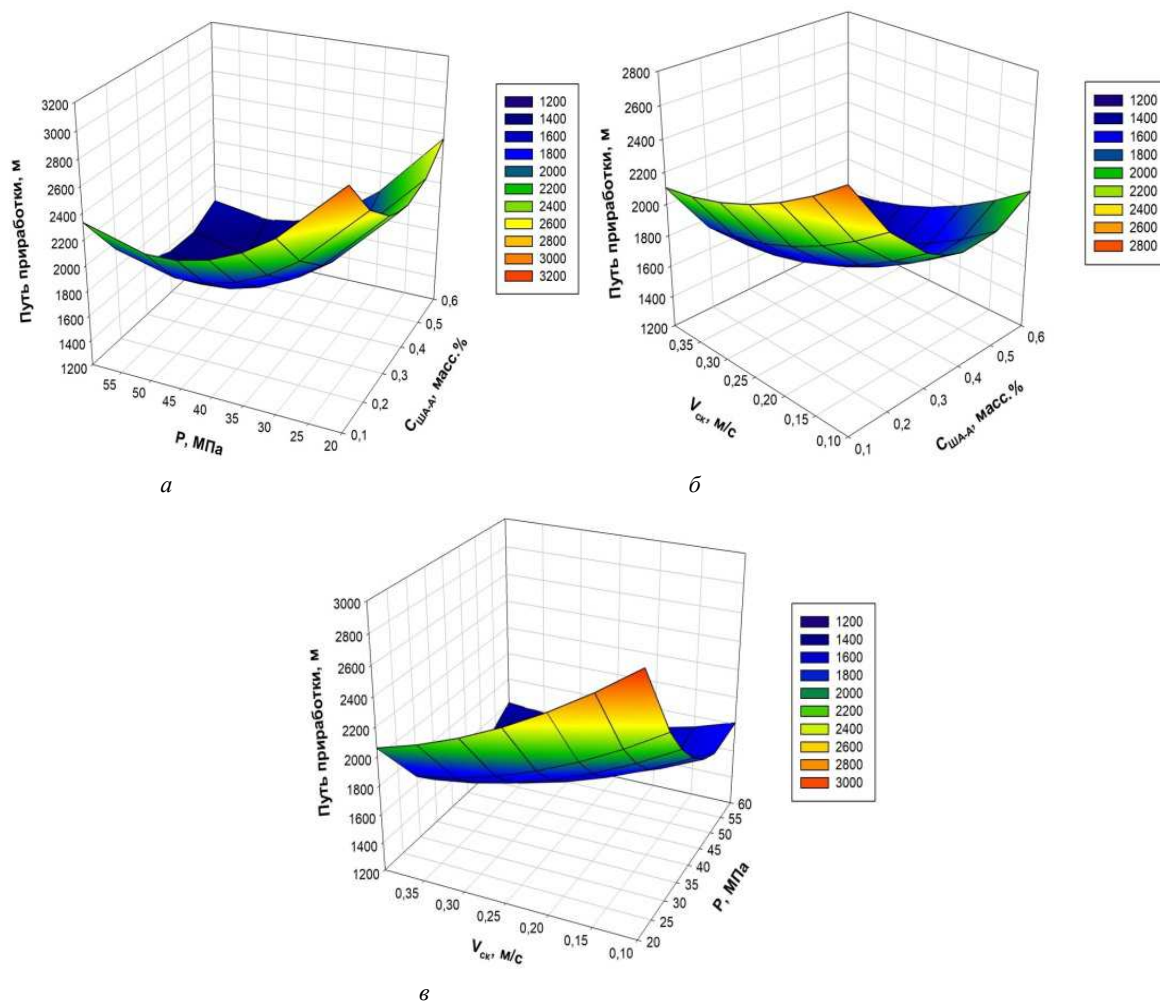


**а** – концентрации добавки  $C_{ША-А}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{ск} = 0,25$  м);  
**б** – концентрация добавки  $C_{ША-А}$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $P = 40$  МПа);  
**в** – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $C_{ША-А} = 0,35$  масс. %)

**Рисунок 2.** – Зависимость твердости  $HV$  от исследуемых факторов процесса

Скорость скольжения в меньшей степени, чем удельная нагрузка, оказывает влияние на протекающие процессы модифицирования поверхности. Однако при значениях скорости скольжения  $V_{ск} < 0,20$  м/с отмечено замедленное протекание процессов приработки поверхности трения, которые завершаются после пути трения более  $L = 2500$  м с фиксацией коэффициента трения на уровне  $f = 0,09-0,11$  и повышением твердости поверхности покрытия на 30–40%. В случае проведения приработки при скорости скольжения  $V_{ск} > 0,35$  м/с наблюдается резкое повышение коэффициента трения, обусловленное, вероятно, процессами разрушения дисперсной фазы пластичного смазочного материала и вытеканием последнего из зоны трибоконтакта с последующим появлением задиры на поверхностях трения.

На основании полученных результатов можно заключить, что для обеспечения необходимого сочетания показателей трибомеханического модифицирования газотермических покрытий из композиции мартенситной и аустенитной сталей (коэффициент трения  $f = 0,06-0,08$ , твердость  $HV = 5900-6200$  МПа, путь трения  $L = 1500-1700$  м) режимы приработки должны входить в следующие диапазоны: концентрация добавки шихты ША-А  $C_{ША-А} = 0,30 \pm 0,05$  масс.%; давление в контакте  $P = 45 \pm 5$  МПа; скорость скольжения  $V_{ск} = 0,25 \pm 0,05$  м/с.



*а* – концентрации добавки  $C_{\text{ШЛА-А}}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{\text{ск}} = 0,25$  м);  
*б* – концентрация добавки  $C_{\text{ШЛА-А}}$  и скорость скольжения  $V_{\text{ск}}$  (при  $P = 40$  МПа);  
*в* – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{\text{ск}}$  (при  $C_{\text{ШЛА-А}} = 0,35$  масс.%)

**Рисунок 3.** – Зависимость пути трения при приработке  $L$  от исследуемых факторов процесса

*Разработка технологического процесса.* Технологический процесс включает подготовку проволочных материалов для процесса гиперзвуковой металлизации, подготовку восстанавливаемой поверхности штока, нанесение покрытия гиперзвуковой металлизацией, шлифование покрытия, трибомодифицирование.

Для подготовки поверхности штоков использовали обдувку (струйно-абразивную обработку) в камере для струйно-абразивной обработки корундом или корундом в смеси с чугунной крошкой. Для этой цели применяли корунд с размером зерен 1,5 мм. По сравнению с пескоструйной очисткой производительность обработки с применением корунда на 10–30% выше. При отсутствии корунда можно применять стальную крошку или чугунную колотую дробь (твердость около 750 кг/мм<sup>2</sup>) с острыми углами и без ржавчины ДЧК 1 545 ГОСТ 11964-81. Учитывая, что поверхность штоков имеет твердость более 45HRC (после закалки), в колотую чугунную дробь добавляли корунд. Наилучшие результаты показывает обработка смесью дроби чугунной колотой ДЧК-1,8 ГОСТ 11964-81 с электрокорундом 1,7–1,4 ГОСТ 3647-80 в пропорции 1:1.

Режимы обработки: давление сжатого воздуха – 0,55–0,60 МПа; расход воздуха (ГОСТ 9.010-80) – 2,1–2,7 м<sup>3</sup>/мин; расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности – 80–100 мм; угол наклона струи абразива к поверхности – 70–80°. Параметр шероховатости после обработки поверхности должен быть  $R_z = 40$ –60 мкм.

Подготовка проволоки заключалась в проверке сохранности упаковки проволоки, извлечении расходного материала из упаковки, устранении изгибов и загрязнений, а также установке бухт проволоки на подающие вертушки.

Для восстановления штоков использовали одновременное распрыскивание двух проволок: из стали 95Х18-Ш  $d = 2,0$  мм ТУ 1039–2012 и из стали 12Х18Н10Т  $d = 1,8$  мм ГОСТ 18143-72. Для реализации процесса гиперзвуковой металлизации использовали установку АДМ-10 (рисунок 4).

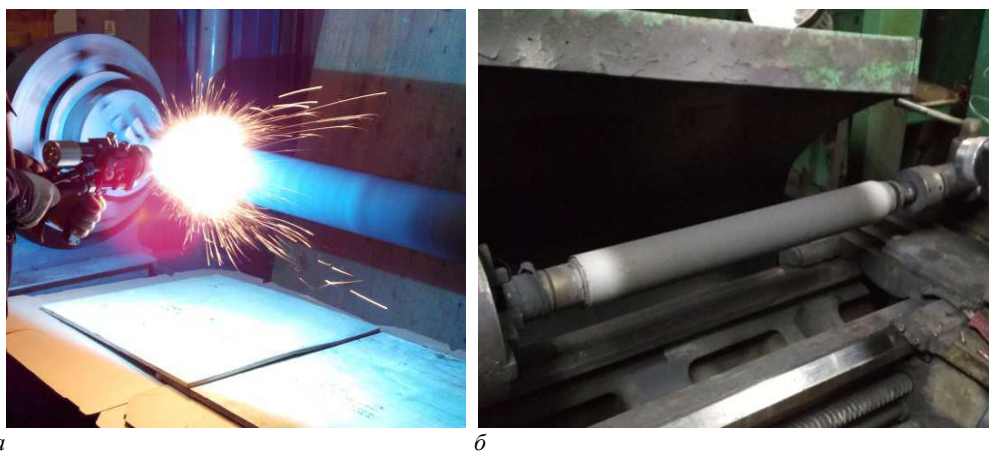


Рисунок 4. – Напыление покрытия (а) и шток после напыления (б)

Нанесение покрытия осуществляли при напряжении металлизации 32–34 В, при этом устанавливали скорость подачи проволок 3,2 м/мин, дистанцию напыления 170 мм. Расход воздуха составлял 1,75 м<sup>3</sup>/мин (105 м<sup>3</sup>/ч) при давлении 0,45–0,60 МПа, пропан-бутана – 0,9 м<sup>3</sup>/ч при давлении в 0,45 МПа. Используемая в камере сгорания металлизатора пропан-воздушная смесь подавалась с избытком пропана ( $\beta = 18–20$ ). Если в качестве горючего газа использовали газ МАФ, то его давление и расход составляли 0,37 МПа и 0,9 м<sup>3</sup>/ч. Частота вращения восстанавливаемого штока – 90 об/мин.

Толщина слоя наносимого покрытия зависит от глубины дефектов на восстанавливаемых штоках и составляет  $\delta = 1,0–1,8$  мм. После обработки шлифованием в номинальный размер рабочую поверхность смазывают смазкой ИТМОЛ-150Н, модифицированной шихтой ША-А ТУ РБ 1000561180.003-2003.

Разработанный технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров монтажного оборудования гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием рекомендуется применять при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа:

- штоки гидроцилиндров поршневого типа, двустороннего действия; например, типа Ц22А.000, которые устанавливаются на выносных опорах автомобильных кранов КС-3575А «Дрогобыч», а также на автокранах широкого модельного ряда «Ивановец» КС-3577, КС-3574, КС-35714, КС-35715 и их модификациях;

- штоки гидроцилиндров выдвижения телескопических стрел КС-3577, КС-35714-2.63.900-1 и др.;
- штоки гидроцилиндров Г-220.100.63.900 (аналог 73.04.000) ковша экскаватора ЕК-12;
- штоки гидроцилиндров ДЗ-122Б 08.05.000, предназначенные для подъема и опускания лопаты бульдозера и изменения угла резания автогрейдеров;

- штоки гидроцилиндров ELS-100.125.6000, КС-45719.63.900-01А выдвижения (втягивания) средней секции стрелы автокранов «Челябинец» КС-45721, КС-55730, «Галичанин» КС-4572А, КС-45719, КС-55713, КС-55729В;

- штоки гидроцилиндров КГЦ 321.3-100-710 подъема кузова тракторного прицепа 1ПТС-2 и др.

*Испытания восстановленных штоков.* Исходя из анализа конструкций стендов типа СГЦ-РСИ (ОАО «Гидроспецстенд», Москва) [6], СТИГ-10 (ОАО «Укрмашпром», Харьков) [7], КИ-28097М (ОАО «Автокапитал», Ярославль) [8], на которых осуществляются испытания гидроцилиндров с восстановленными штоками, а также требований ГОСТ 18464-96 «Гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытаний», был изготовлен стенд для испытаний штоков, восстанавливаемых методом ГМ с последующим трибомеханическим модифицированием.

Схема стенда для испытания на герметичность по штоку представлена на рисунке 5. Стенд включает гидроцилиндр с испытываемым штоком (1), нагрузочный гидроцилиндр (2), двухпозиционный гидрораспределитель с гидравлическим управлением (3), трехпозиционный гидрораспределитель с электромагнитным управлением (4), нагрузочный насос (5), насос привода (6), гидробак (7), предохранительный гидроклапан (8), трехпозиционный гидрораспределитель с гидравлическим управлением (9), кран-демпфер (10), манометр (11), выключатель (12), динамометр (13).

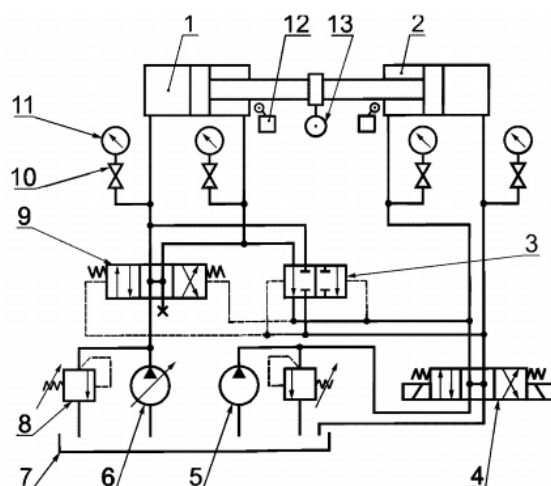


Рисунок 5. – Схема стенда для испытаний гидроцилиндров с восстановленными штоками

Работа на стенде проводится в ручном режиме. Максимальное давление в гидросистеме стенда – 25 МПа. Рабочая жидкость – масло М-10Г; температура рабочей жидкости при испытаниях –  $50 \pm 5$  °С; средние значения вязкости при температуре 50 °С – 65 сСт. Утечку рабочей жидкости (удельный объем выносимой рабочей жидкости) через уплотнитель плунжера проверяли при давлении 22 МПа.

Стендовые сравнительные испытания осуществлялись с новыми и восстановленными штоками гидроцилиндров выносных опор крана Ц22А.000. Сравнению подлежали характеристики следующих штоков: а) нового – сталь 40Х с последующим покрытием хромом; б) восстановленного в номинальный размер методом электродуговой металлизации распылением проволоки 95Х18; в) восстановленного в номинальный размер по разработанному технологическому процессу.

Перед испытанием и после него проводился микрометраж основных деталей гидроцилиндров, измерялись шероховатость поверхности штока и твердость по шкале Виккерса. В процессе испытаний давление при страгивании определялось при постепенной подаче масла в поршневую полость с последующим повышением давления от 0 до давления начала перемещения поршня, которое фиксировалось манометром. Давление холостого хода определялось при поочередной подаче масла в обе полости гидроцилиндра. Наружная герметичность гидроцилиндра проверялась при максимальном давлении в гидросистеме 21,0 МПа, а также при давлении холостого хода 0,5 МПа.

Испытания проводились в объеме  $\tau = 100\,000$  циклов, согласно рекомендациям [9; 10]. При испытании оценивались следующие параметры, характеризующие работоспособность гидроцилиндров: давление страгивания, давление холостого хода, наружная герметичность и внутренние утечки, интенсивность изнашивания (определялась методом искусственных баз).

Оценка параметров осуществлялась перед испытанием, после наработки  $1/3 \tau$ ,  $2/3 \tau$  и после полного  $\tau$ . При испытании использовалась рабочая жидкость – масло М-10Г, которое перед подачей подогревалось до температуры +50 °С. Температура рабочей жидкости контролировалась по термометру марки ТПГ-СК 0-160. Номинальная тонкость фильтрации рабочей жидкости при испытании составляла 120 мкм вместо паспортных значений 80 мкм, что позволило сократить продолжительность испытаний.

Измерение параметров гидроцилиндра осуществлялось со следующей точностью: давление – 1,5%, время – 0,5%, температура – 1%, расход жидкости – 1,5%, ход штока – 1%. Основной величиной, по которой оценивалось качество процесса восстановления, являлась износостойкость поверхности (таблица).

Таблица. – Значения интенсивности изнашивания поверхности испытываемых штоков

Продолжительность испытаний, циклов	Средняя интенсивность изнашивания за период испытаний, мкм/км		
	новый хромированный шток	восстановленный методом ЭДМ	восстановление методом ГМ + трибомодифицирование
$\tau = 33\,000$	5,26	7,13	5,33
$\tau = 50\,000$	4,95	7,01	4,88
$\tau = 100\,000$	4,43	6,85	4,31

В ходе испытаний шток, восстановленный по разрабатываемой технологии, показал давление холостого хода, давление страгивания и герметичность на уровне нового.

Износостойкость восстановленной по разработанной технологии поверхности штока на первом этапе испытаний несколько уступала износостойкости нового штока (см. таблицу), затем износостойкость сравнялась, и в конце испытаний этот показатель стал выше у восстановленного штока.

Шток, восстановленный методом ЭДМ, показал значительно меньшую износостойкость, чем новый и восстановленный методом ГМ с последующим модифицированием.

**Заключение.** Таким образом, разработан технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров монтажного оборудования гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием, рекомендуемый при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа. Износостойкость восстановленных по разработанной технологии рабочих поверхностях штоков выше, чем у новых штоков в 1,15–1,25 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36–42.
2. Восстановление валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 79–83.
3. Особенности получения покрытий из псевдосплавов методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 95–100.
4. Повышение износостойкости стальных покрытий, используемых для восстановления штоков / А.И. Ялович [и др.] // Перспективные материалы и технологии : сб. материалов междунар. симп., Брест, 27–31 мая 2019 г. / под. ред. В.В. Рубаника. – Витебск : ВГТУ, 2019. – С. 658–660.
5. Повышение работоспособности элементов трибосопрежений с металлическими покрытиями фрикционным модифицированием / В.И. Жорник [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 окт. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк : ПГУ, 2011. – С. 236–238.
6. Стенды для сборки/разборки и испытания гидроцилиндров. – Режим доступа: <http://hydrospecstand.ru/produktsiya/sgts>. – Дата доступа: 25.05.2017.
7. Стенд СТИГ-10. – Режим доступа: <http://dta-stend.ru/Catalogues/gidroagr/stig1.html?template=83>. – Дата доступа: 1.06.2017.
8. Стенд для проверки и регулировки гидроагрегатов КИ-28097М. – Режим доступа: <http://www.avk76.ru/catalog/detail.php?ID=3109>. – Дата доступа: 1.06.2017.
9. Кобзов, Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. / Д.Ю. Кобзов, В.А. Тарасов, А.А. Трофимов. – Деп. БрГТУ в ВИНТИ 27.01.2011 № 3552-1399. – Ч. 2 : Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения. – 108 с.
10. Гидравлика : в 2 т. – М. : Академия, 2012. – Т. 2 : Гидравлические машины и приводы / В.И. Иванов [и др.]. – 288 с. – (Бакалавриат).

Поступила 18.12.2020

#### RECONDITIONING AND TESTING OF A HYDROLIC POWER CYLINDER ROD

*M. BELOTSERKOVSKIJ, A. DUDAN, A. YALOVIK*

*The technological process of reconditioning hydrolic power cylinder rods of road construction machinery with the help of hypersonic metallization followed by tribromopyridine recommended in the repair of rods with a diameter of 30–120 mm, used in hydraulic cylinders with nominal working pressure from 10 to 22 MPa. Tests have shown that the wear resistance of the working surfaces of the rods restored according to the developed technology is higher than that of the new rods by 1.15–1.25 times.*

**Keywords:** rod reconditioning, hypersonic metallization, benchmark trials, tri-bomechanical modification, gas-thermal coatings.