

*Г.А. Аврунин, к.т.н., доц.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
И.В. Кабаненко, В.В. Дудко, С.В. Токарь, С.В. Початовский, инженеры
Казенное предприятие "Харьковское конструкторское бюро по машиностроению
им. А.А. Морозова" (КП ХКБМ)*

ИСПЫТАНИЯ ШАРИКОВ-ПОРШНЕЙ ДЛЯ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОМАШИН

Розглянуте питання про вибір матеріалу кульок для поршнів гідромашин.

Ключові слова: кулька-поршень, гідропередача, зносостійкість.

Рассмотрен вопрос о выборе материала шариков для поршней гидромашин.

Ключевые слова: шарик-поршень, гидropередача, износостойкость.

Tendencies of material selection of the balls for hydrostatic machinery pistons are shown.

Key words: ball-piston, hydrostatic transmission, endurance.

Постановка проблеми. Радиальнопоршневые объемные гидромашины с шариковыми поршнями получили распространение в трансмиссиях передвижения строительно-дорожных и сельскохозяйственных машин мощностью до 15 кВт (относятся к классу минитехники) и мощностью до 400 кВт в составе гидромеханических коробок передач тяжелых гусеничных машин массой до 60 тонн, обеспечивая бесступенчатое регулирование скорости передвижения и плавный, пропорциональный отклонению штурвала, поворот машины. О перспективах использования шарико-поршневых гидropередач в отечественной практике можно судить, исходя из их успешного применения в составе гидромеханических трансмиссий за счет реализации параллельных потоков гидравлической и механической мощности [1, 2].

Анализ последних исследований и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Гидropередача ГОП-900 обладает уникальными скоростными возможностями и превосходит по этому показателю самые совершенные на сегодняшний день аксиальнопоршневые гидромашины фирм, специализирующихся в производстве гидроприводов для мобильных машин [3].

Гидropередача ГОП-900 обладает минимальными осевыми габаритами, что позволяет использовать ее в составе гидромеханической трансмиссии при существующих габаритных ограничениях мобильных машин.

В связи с отсутствием в Украине производства шариков диаметром 63,5 мм в первом макетном образце гидropередачи ГОП-900 использовались шарики фирмы "PBG" («Precision Ball and Gauge Co», Англия) при степени точности 40. Однако при испытаниях гидropередачи были обнаружены повышенный износ и трещины на поверхности шариков.

Формулирование целей статьи. Целью статьи является выбор материала для производства «поршня-шарика» гидropередачи ГОП-900, который бы обладал стабильными свойствами.

Изложение основного материала. На рис. 1 представлена объемная гидropередача [3], состоящая из двух радиальнопоршневых гидромашин однократного действия, отличительной особенностью которых является применение в качестве поршней шариков 5, установленных в блоках цилиндров насоса 3 и гидромотора 4, и опирающихся постоянно на реактивные кольца (обоймы) 7 насоса и гидромотора. Статор 6 насоса имеет регулируемый эксцентриситет для изменения его рабочего объема и частоты вращения гидромотора. В корпусе 1 установлен блок цапфенных распределителей 2. Блоки цилиндров насоса и гидромотора соединены с валами 8 и 9, соответственно. Шарики выполняют функцию поршней и совершают вращательное движение по беговой дорожке аналогично работе в радиальном шариковом подшипнике качения и как поршня совершают скольжение по боковой стенке цилиндра. При этом на шарики действуют следующие нагрузки:

- статическая нагрузка от давления рабочей жидкости на шарик составляет порядка 100 кН при давлении 32 МПа, что эквивалентно предельной нагрузке на шарик при испытаниях на сжатие согласно ГОСТ 3722-51 (при этом допускается линейная деформация до 3 мкм);
- скоростная, обусловленная частотой вращения до 15500 об/мин;
- контактные нагрузки на поверхности шарика, достигающие 2400 МПа,
- скорость скольжения по стенке цилиндра до 52 м/с;
- рабочая температура на поверхности шарика до 280°С, обусловленная высокой статической нагрузкой, частотой вращения и скольжением по стенке цилиндра в условиях, когда температура рабочей жидкости в гидropередаче достигает температуры 100...130°С.

На рис. 2 представлены объемная гидropередача типа ГОП-900 в сборе и ее отдельные детали – блок цилиндров и шарик-поршень.

Основные технические характеристики гидropередачи типа ГОП-900 с рабочим объемом гидромашин 680 см³, полученные при стендовых испытаниях в КП ХКБМ им. А.А. Морозова:

- выходная мощность до 370 кВт;
- частота вращения до 3100 мин⁻¹;
- давление до 32 МПа;
- крутящий момент до 2800 Н.м;

– температура рабочей жидкости до 130 °С;
– КПД до 80% (при частоте вращения 2400 мин⁻¹ и перепаде давлений 13,5 МПа).

Диаметр гидropередачи 560 мм, длина 215 мм, масса 260 кг.

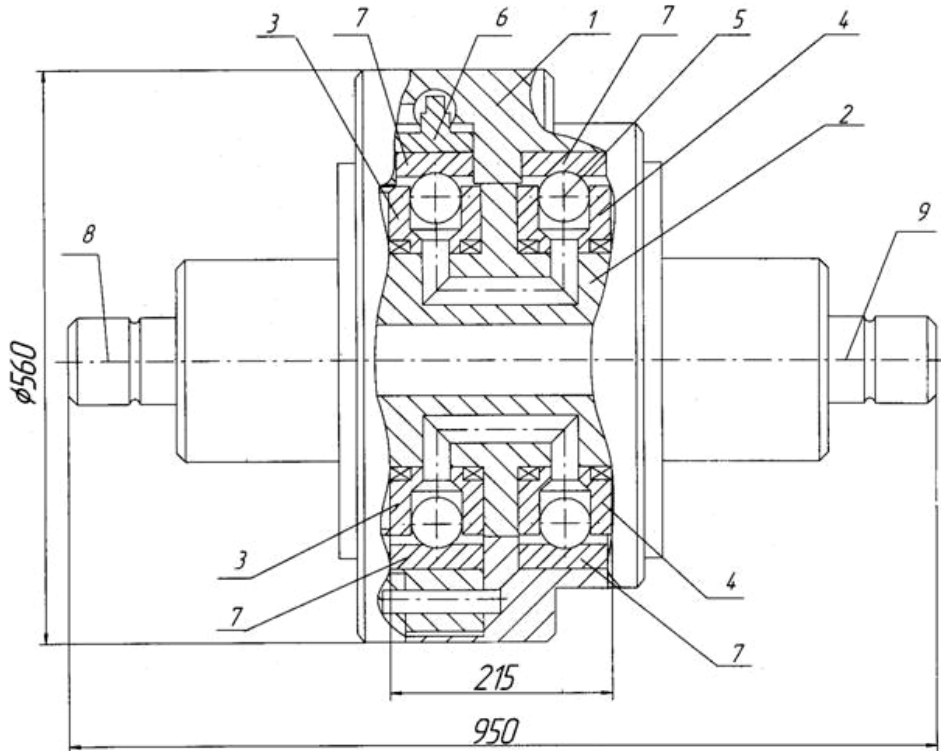


Рисунок 1 – Объемная гидropередача типа ГОП-900 на базе гидромашин радиальнопоршневого типа с шариковыми поршнями

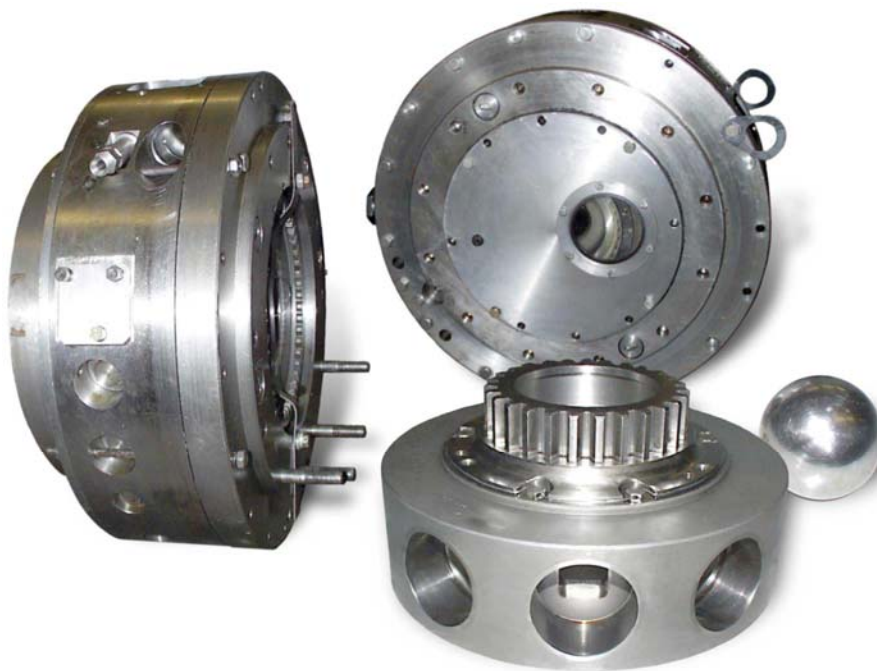


Рисунок 2 – Объемные гидropередачи типа ГОП-900 и отдельные детали

Рабочий объем радиальнопоршневой гидромашины с шариковыми поршнями определяют по формуле

$$V_p = 10^{-3} \cdot S_n \cdot h \cdot z = 10^{-3} \cdot S_n \cdot 2e \cdot z, \text{ см}^3,$$

где S_n – площадь шарика-поршня, мм²;

$h = 2 \cdot e$ – ход поршня (мм), равный удвоенному эксцентриситету между осями блока цилиндров и опорного кольца (статора) гидромашины, причем значение хода ограничено соотношением [4]

$$h \leq 0,365 \cdot d_{ш}, \text{ мм},$$

где $d_{ш}$ – диаметр поршня-шарика, мм;

z – количество поршней.

Выходные параметры гидропередачи определяют по формулам

Крутящий момент гидромотора

$$M_m = 0,159 \cdot V_p \cdot \Delta p \cdot \eta_{гм}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где V_p – рабочий объем гидромотора, см³;

Δp – перепад давлений на гидромоторе, МПа;

$\eta_{гм}$ – гидромеханический КПД.

Выходная (или полезная) мощность гидропередачи

$$P_m = \frac{M_m \cdot n_m}{9550}, \text{ кВт}.$$

где n_m – частота вращения гидромотора, мин⁻¹.

Для испытаний гидропередачи в качестве рабочей жидкости использовалось масло трансмиссионное АЗМОЛ ТАД-17и, ТУ У 23.2-00152365-142-2001 (ранее ГОСТ 23652-79), выбор которого обоснован более высокими трибологическими характеристиками по сравнению с обычно используемыми гидравлическими и трансмиссионными маслами (например, МГЕ-46В и МТ-8П) [5].

В результате проведенных испытаний установлена функциональная работоспособность гидропередач при частоте вращения вала насоса до 3100 мин⁻¹. С точки зрения получения оптимального значения КПД предпочтительна работа гидропередачи в диапазоне частот вращения 1800...2400 мин⁻¹. Проведена проверка функционирования гидропередачи при температуре рабочей жидкости до 130 °С, при которой коэффициент кинематической вязкости снижается до 9 мм²/с, т.е. до предельно-допустимого значения для большинства аксиально- и радиальнопоршневых гидромашин.

При общей оценке технического уровня гидропередачи ГОП-900 прежде всего следует отметить достигнутый рабочий объем гидропередачи в 680 см³, что позволяет получить высокие выходные значения крутящего момента на выходном валу.

В результате проведенного анализа была обнаружена пониженная до 58...59 HRCэ твердость в поверхностной зоне (для замера твердости сошлифовывались две лыски глубиной 1,5 мм). Причем, твердость заметно снижалась по мере приближения к центру лыски от 60 HRCэ до 58 HRCэ, что свидетельствует о резком градиенте изменения твердости по мере удаления от поверхности шарика. Для изучения микроструктуры вырезались секторные образцы электроискровым методом. Судя по результатам микроисследований, пониженная твердость объясняется появлением темнотравящихся немартенситных продуктов распада переохлажденного аустенита в процессе закалки. Причем количество немартенситных структур резко увеличивается по мере удаления от поверхности шарика. При этом структуры перлитного типа появляются даже на поверхности, что объясняет пониженную твердость поверхностного слоя. Подобная разнородная структура, имея различные прочностные характеристики и деформируясь неравномерно, ведет к образованию микротрещин в процессе эксплуатации шарика. При принятых режимах закалки в масле сталей типа ШХ-15 описанный эффект связан с недостаточной прокаливаемостью стали именно для данной массы заготовки шарика. Таким образом, нагрев стали под закалку произведен до температур выше оптимальных, что вызвало полное растворение карбидов хрома и рост аустенитного зерна. В то же время охлаждение шаров при закалке произведено с недостаточной скоростью, что привело к наличию включений перлита не только в центральной части шарика, но и в поверхностном слое. Наличие вышеперечисленных недостатков резко снизило работоспособность шариков, причем в обеих полученных от фирмы партиях с интервалом в несколько месяцев. Сталь типа ШХ-15 используется обычно для изготовления шариков и роликов диаметром до 25,0 мм. Для деталей подшипников повышенных габаритов применяются более легированные стали типа ШХ-15 СГ или 20Х2Н4А.

В связи с полученными негативными результатами было принято решение об освоении шариков диаметром 63,5 мм из стали типа ШХ-15СГ на харьковском предприятии ОАО "ХАРП".

Стендовые испытания радиальнопоршневых гидропередаточных устройств типа ГОП-900 с шариками-поршнями из стали ШХ-15СГ дали положительные результаты. В то же время недостаточная для тяжело нагруженных гидропередаточных устройств теплостойкость шариков и тенденция к самопроизвольному нерегламентированному росту диаметра вынуждает для обеспечения работоспособности иметь повышенный гарантированный зазор в поршневых группах во избежание заклинивания шариков-поршней в цилиндрах, что приводит к повышенным утечкам и снижению КПД гидропередаточных устройств.

Поэтому с целью получения стабильного качества шариков при их изготовлении на ОАО "ХАРП" необходимо соблюдение следующих требований:

1. Использование сталей электрошлакового или вакуум-дугового переплава;
2. Проведение входного контроля проката согласно ГОСТ 801-78, в том числе ультразвукового контроля;
3. При изготовлении шариков методом горячей штамповки необходимо контролировать:
 - качество отжига (выборочно);
 - на перегрев стали при штамповке и на наличие нафталинистого излома (выборочно);
 - значение обезуглероженного слоя (выборочно).
4. Контроль по твердости шариков (100%);
5. Контроль на прижоги (100%);
6. Магнитный или магнитно-люминисцентный контроль (100%);
7. Стабилизирующий отпуск;
8. Поплавочное изготовление партий шариков.

Анализ результатов проведенных стендовых испытаний гидropередач и информационный поиск в данном направлении показал на возможность повышения надежности работы поршневых групп за счет использования шариков-поршней из следующих материалов:

- стали марки P5M5Ф3-ПМ, ГОСТ 28393-89 (пруток кованный из порошковой быстрорежущей стали для горячей обработки давлением);
- керамических материалов (нитрид кремния, карбид кремния, карбид Бора).

Сравнительные технические характеристики указанных материалов приведены в таблице 1.

Следует отметить, что шарики из керамики обладают рядом преимуществ перед стальными, в том числе из быстрорежущей стали:

- более чем в 2 раза (для карбида Бора в 4 раза) большим значением модуля упругости, что снижает степень риска пластической деформации шарика или позволяет повысить давление в гидropередаче;
- более чем в 2 раза (для карбида Бора в 3 раза) меньшим значением плотности, что позволяет снизить динамические нагрузки на шарик при работе на повышенных частотах вращения;
- более чем в 6 раз (для нитрида кремния в 4 раза) меньшим значением коэффициента термического расширения, что снижает степень риска заклинивания шарика в цилиндре при пуске гидropередачи и позволит работать без предварительного прогрева, а также позволит уменьшить зазор в паре поршень-цилиндр, способствуя повышению КПД гидropередачи и уменьшению установочной мощности насоса подпитки;

– высокая твердость поверхности позволит снизить износ контртел в поршневой паре (наряду с применением высококачественной по трибологическим характеристикам рабочей жидкости).

Как показал зарубежный опыт последних лет, радиальнопоршневые двигатели внутреннего сгорания, компрессоры и насосы с шариковыми поршнями привлекают внимание специалистов благодаря своим скоростным характеристикам и простоте конструкции. В результате испытаний шаров из тефлона и нейлона, стальных шариков, в том числе из хромосодержащих сталей, предпочтение отдано шарикам из керамики, в частности из карбида кремния [3].

В частности, керамические шарики из карбида Бора производства Института сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины подвергались стендовым испытаниям в составе блока цилиндров гидромотора гидропередачи ГОП-900. Предварительно шарики прошли испытания на машине МУП-20 с циклической нагрузкой 30000 Н в количестве 30 тыс. циклов. Отсутствие трещин и сколов поверхности шаров дали основание для проведения натурных стендовых испытаний. Однако, после проведения стендовых испытаний гидропередачи в течение 11 часов при частоте вращения 1500...2900 мин⁻¹ и давлении в гидросистеме до 10...14 МПа (что соответствует нагрузке на шар до 43000 Н) на всех 3-х испытанных шарах обнаружено выкрашивание на поверхности.

Таблица 1 – Основные свойства материалов для изготовления шариков-поршней

Наименование параметра	Материал				
	Нитрид кремния Si ₃ N ₄	Карбид кремния SiC	Карбид Бора B ₄ C	Сталь Р6М5Ф3-МП	Сталь ШХ-15СГ
Модуль упругости, МПа	4,7x10 ⁵	(4...5)x10 ⁵	(7...8)x10 ⁵	2,2x10 ⁵	2,1x10 ⁵
Плотность, г/см ³	3,2	3,2	2,5	8,2	7,65
Кoeff. терм. расширения, x 10 ⁻⁶ / ⁰ С	2,75	1,82	1,4	12	13,4
Кoeff. теплопроводн., кал/см.сек °С	0,041	0,098...0,1	0,2	0,059	0,09
Твердость, НV	1700	> 1700	> 1700	830...940	804...900
Цена (относ.)	400	30	30	12	1

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

1. Проведенные испытания макетных образцов радиальных шарикопоршневых гидropередач типа ГОП-900 позволили сделать вывод о том, что их надежность и дальнейшее совершенствование в значительной мере обусловлено надежностью работы шарика-поршня, к которому предъявляются высокие требования по износостойкости, минимальной степени силовой и температурной деформаций;

2. С учетом негативного опыта использования импортных стальных шариков из хромистой стали, позитивного опыта использования шариков из стали ШХ-15СГ, освоенных производством ОАО "ХАРП", и в то же время необходимостью повышения теплостойкости и износостойкости шариков, следует считать перспективными исследования при использовании шариков из порошковых быстрорежущих сталей типа Р6М5Ф3-МП, шариков из керамики, обладающих более высокими прочностными характеристиками, чем стальные.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гидромеханические трансмиссии – средство повышения конкурентоспособности колесных и гусеничных машин* / [О.М. Бабаев, В.А. Глушенков, В.И. Голубев и др.] // *Приводная техника.* – 1998. – №9. – С. 14–19.

2. *HMPT-1250. Компактная трансмиссия для AFAS/FARV. Transmission Programs Defence Sestems Martin Marietta* – 1993.

3. *Новое поколение шарико-поршневых гидropередач* / [М.Д. Борисюк, Ю.М. Бусяк, Г.А. Аврунин и др.] // *Промышленная гидравлика и пневматика.* – 2003. – №1. – С. 67–70.

4. *Объемные гидромеханические передачи: расчет и конструирование* / [О.М. Бабаев, Л.Н. Игнатов, Е.С. Кисточкин и др.]; под общ. ред. Е.С. Кисточкина. – Л.: Машиностроение, 1987. – 256 с.

5. *Исследование характеристик масла Тад-17и при испытаниях в объемном гидropроводе* / [Г.А. Аврунин, А.В. Истратов, Ю.Ф. Мартынов и др.] // *Прикладная гидравлика и пневматика.* – 2005. – № 2 (8). – С. 20–24.