

УДК 621.891.67-762

В. М. ГОЛУБ, кандидат технических наук, М. В. ГОЛУБ, доктор технических наук, П. В. ДЕМИДЕНКО, Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

## ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ПАР ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Проведено исследование материалов пар трения торцовых уплотнений валов насосов на износостойкость в абразивных средах. Разработан стенд для испытаний контактных колец торцовых уплотнений на трение и износ. Выбрана методика определения интенсивности объемного износа контактных поверхностей. Получена зависимость скорости изнашивания контактных колец от концентрации абразива в гидроабразивной смеси.

**Введение.** Подбор материалов фрикционной пары и ее способность работать длительный период времени в режиме сухого трения или дефицита смазки является важной задачей машиностроения. Фрикционный узел в процессе работы при высоких скоростях скольжения воспринимает как статические, так и динамические нагрузки и подвергается изнашиванию. На работу фрикционного узла влияет температурный режим, окружающая среда и наличие в ней абразива. Способность материалов поглощать или рассеивать тепловую энергию без катастрофического износа является важной характеристикой фрикционной пары.

Антифрикционные материалы должны сопротивляться терморастрескиванию в режиме сухого трения. На поверхности трения не должно возникать трещин в результате многократного колебания силового и теплового воздействия.

Для решения прикладных задач триботехники, связанных с оптимизацией состава композиционных материалов, применительно к антифрикционным устройствам, способным работать в сухом режиме трения и при дефиците смазки, проведены их испытания.

**1 Подбор материалов пар трения для работы в абразивных нейтральных средах.** Все торцовые уплотнения, применяемые для герметизации вращающихся валов насосов, компрессоров и других машин, несмотря на многообразие конструктивных схем, состоят из следующих основных элементов (рисунок 1): пары трения – двух уплотнительных колец, прилегающих друг к другу по плоскому торцу, причем одно из колец фиксируют либо в корпусе, либо на валу, а другое кольцо, имеющее свободу осевых и угловых перемещений, устанавливается в поджимном элементе. В поджимной элемент также входят пружины, поджимающие упруго установленное кольцо к ответному кольцу; вторичный уплотнительный элемент, обеспечивающий герметизацию упруго устанавливаемого уплотнительного кольца и поводковая группа, служащая для передачи момента трения с уплотнительного кольца.

Самым ответственным элементом торцового уплотнения, от которого в конечном счете зависит герметизирующие его свойства, является пара трения. Поэтому выбору материалов уплотняющих колец пары трения необходимо уделять первостепенное значение.

**1.1 Характеристика основных материалов, применяемых в парах трения торцовых уплотнений.** Выбор ма-

териалов контактирующих поверхностей пары трения является наиболее трудным из-за множества факторов, влияющих на ее работу. Совокупность явлений, происходящих в торцовой паре трения, весьма сложна. Здесь одновременно имеет место жидкостное и полусухое трение, кавитация, различные виды износа, тепловыделения, действие инерционных и вязкостных сил и т.д. На работу пары существенное влияние оказывает уплотняемая среда, ее температура и давление, содержание в ней механических и других примесей, величины скоростей скольжения и удельной нагрузки на контакте.

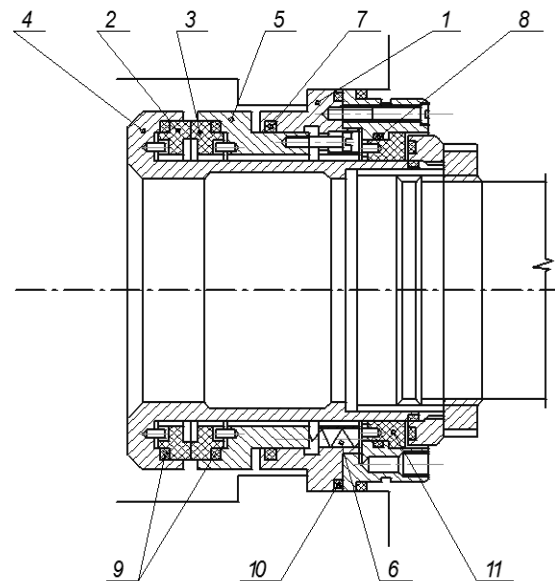


Рисунок 1 – Моноблочный вариант торцового уплотнения с резервным узлом защиты:

1 – гильза вала; 2, 3 – кольца контактные; 4, 7 – уплотнительные резиновые кольца; 5 – аксиально-подвижная втулка; 6 – манжета; 8 – пружины; 9 – корпус уплотнения; 10 – пластина упорная; 11 – стопорный винт

Выбор пары трения необходимо вести с учетом механико-физико-химических свойств уплотняемой среды и физико-химических свойств и структуры материалов, которые оказывают существенное влияние на работу пары трения. В частности, при работе в абразивных жидкостях к материалам пар трения торцовых уплотнений предъявляются следующие требования:

- износостойкость в абразивных гидросмесях;
- коррозионная стойкость в уплотняемой жидкости;

- термостойкость в пределах рабочих температур;
- антифрикционность.

При этом определяющими требованиями являются обеспечение износостойкости и коррозионной стойкости материалов.

В настоящее время созданы такие твердые материалы, которые, одновременно сочетая в себе свойства антифрикционности, имеют большую износостойкость. Если подходить с общих позиций, то износостойкие пары трения трудно разграничить от антифрикционных. Трущиеся пары торцовых уплотнений должны обладать как износостойкими, так и антифрикционными свойствами.

Согласно молекулярно-механической теории трения [1] основным свойством антифрикционной пары является обеспечение положительного градиента механических свойств по глубине в сочетании с упругим деформированием материала:

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_x$  – разрушающие напряжения в направлении плоскости касания;  $z$  – координата, перпендикулярная к плоскости касания.

Обычно положительный градиент обеспечивают смазки. Но так как смазкой пары трения является уплотняемая среда, которая не всегда обладает хорошими смазочными свойствами, то при разрыве смазочной пленки (режимы пуска, перегрузки) необходимо обеспечить положительный градиент в самом материале пары. Последнее возможно при таком составе материала пары трения, который обеспечивает образование на своей поверхности защитной антифрикционной пленки из структурных составляющих материала.

Структура антифрикционного материала, согласно правилу Шарпи [1], должно состоять из твердых зерен, распределенных среди пластичной основы. Такое строение наблюдается во всех антифрикционных сплавах, признанных наилучшими. При таком строении нагрузка на контакт воспринимается твердыми зёрнами, а пластичность и антифрикционность основы обеспечивает равномерность распределения давления по контакту и наименьший коэффициент трения.

Износостойкость материалов, особенно в условиях абразивного износа, зависит от структуры и твердости отдельных структурных составляющих. Поэтому твердые структурные составляющие должны обладать твердостью, большей твердости механических абразивных частиц, попадающих на контакт пары трения.

В качестве материалов пары трения в торцовых уплотнениях при работе на абразивных жидкостях используют ВК-2, ВК-4, ВК-6, ВК-8, Т15К6, карбид вольфрама (релит), минералокерамика ЦМ-332, силицированные графиты СГ-Т (ПГ-50С), СГ-П, СГ-М, ТМ-1 и др. Обычное сочетание материалов пар трения, таких как сталь – графит, сталь – бронза, стеллит – бронза, сормайт – бронза, твердый сплав – графит и т.д., подобранное с учетом их антифрикционности, в условиях перекачки абразивных жидкостей неприемлемо, так как абразивные частицы вдавливаются в более мягкое кольцо и часто вызывают абразивный износ другого сопряженного кольца.

В последнее время широкое применение нашел силицированный графит, получаемый пропиткой графита жидким кремнием. Силицированный графит состоит из углерода, карбида кремния и кремния. В процессе трения углерод создает графитовую пленку на поверхности трения, обеспечивая положительный градиент механических свойств и низкий коэффициент трения. Физико-механические свойства силицированного графита зависят от соотношения и распределения компонентов материала.

Различают три марки силицированного графита: СГ-Т (ПГ-50С), СГ-П и СГ-М. Первые две марки имеют практически одинаковый состав: карбида кремния – 60–70 %, углерода – 2–5 % и кремния – 12–20 %, но различаются технологией изготовления.

Кроме того, в качестве материалов пар трения применяют минералокерамику ЦМ-332, получаемую спеканием тонкоизмельченного корунда. Минералокерамика обладает высокой твердостью (75–80 НРА). Недостатком же её можно считать склонность к термораскрекиванию. По сравнению с твердыми сплавами типа ВК минералокерамика ЦМ-332 значительно более хрупка, что сдерживает ее широкое применение в парах трения.

В настоящее время, с целью повышения износостойкости контактных колец пар трения, широко применяют наплавку стеллита, сормайта, а также самофлюсующихся твердых сплавов СНГ и ВСНГ. При наплавке на стальные кольца эти сплавы, расплавляясь, вступают во взаимодействие с основным металлом, образуя на поверхности кольца твердый раствор. Однако твердость и износостойкость такого твердого раствора недостаточно высока (HRC 40–50). Поэтому применением наплавки значительно повысить срок службы пары трения торцового уплотнения, особенно при работе на абразивных жидкостях, не удастся. Кроме того, процесс наплавки поверхности стеллитом, сормайтом или сплавами типа ВСНГ довольно сложная операция, требующая строгого соблюдения разработанной технологии.

Характерную композицию можно получить из смеси твердосплавных порошков и крупки карбидов (релита), как наполнителя с последующей пропиткой их медью или сплавами на ее основе [2]. Полученный материал напоминает брекцию.

Для получения композиционных материалов на основе карбида вольфрама используют твердосплавные порошки: порошок карбида вольфрама или смесь твердосплавного порошка карбида вольфрама с крупкой релита, либо смесь карбидовольфрамокобальтового порошка с крупкой релита, а также медь, медно-никелевые сплавы, медно-цинковые сплавы (латуни) и прочие материалы, которые можно использовать для пропитки с целью получения сплавов с определенными свойствами. Релит представляет собой карбид вольфрама с размером частиц от 150 мкм и более.

По величине частиц (крупки) литой карбид вольфрама подразделяется на марки:

- релит 1 – 0,55–0,80 мм;
- релит 2 – 0,35–0,55 мм;
- релит 3 – 0,25–0,35 мм;
- релит 4 – 0,18–0,25 мм.

Основными структурными составляющими релита являются карбид WC и эвтектика WC + W<sub>2</sub>C.

В качестве пропиточных материалов, составляющих пластическую матрицу твердого металлокерамического материала, применяют медь или медно-никелевые сплавы [3]. Они обладают хорошей смачиваемостью, пластичностью и в условиях граничного трения способны к образованию защитных пленок на контакте. Однако эти материалы не лимитируют получение металлокерамических сплавов, которые обладали бы еще лучшими свойствами. Введение в пластичную основу таких элементов, как марганец, бор, цинк, кремний способствует повышению некоторых специальных свойств получаемых сплавов. При этом возможны широкие пределы изменения износостойкости, антифрикционности, коррозионной стойкости металлокерамических сплавов на основе карбида вольфрама.

Кроме того, подбирая пропиточные материалы, можно использовать уже готовые припои, выпускаемые промышленностью с необходимыми компонентами, находящимися в определенном соотношении. Так были получены пары трения, пропитанные припоем ВПр4 (27–30 Mn; 28–30 Ni; 0,8–1,2 Si; 1–1,5 Fe; 0,15–0,30 Li; 0,15–0,25 B; 4–6 Co; 0,01–0,2 K; 0,05–0,15 Na; 0,1–0,2 P; Cu – ост.), ЛМНЦ 60-9-5 (59–61 Cu; 8–10 Ni; 4–6 Mn; 0,03–0,1 B; Zn – ост.). Таким образом, можно отметить, что высокая износостойкость твердых композиционных материалов в умеренных коррозионных условиях обеспечивает повышение долговечности по сравнению с другими материалами.

*1.2 Технологический процесс нанесения износостойкого контактного пояска.* Процесс нанесения износостойкого контактного пояска на кольца пары трения основывается на методах порошковой металлургии, которые позволяют получить износостойкие композиционные материалы путем скрепления зерен карбидов вольфрама или других твердых соединений пластичными металлами. При этом наиболее простым способом, позволяющим получить комбинированную деталь, износостойкая часть которой состоит из твердосплавного материала и имеет заданные размеры, полученные в процессе формовки и спекания твердого сплава, а основная часть детали выполнена из стали, не представляющей трудности для обработки, является способ, заключающийся в следующем [2].

В стальной заготовке с необходимыми допусками на окончательную обработку делают кольцевую канавку глубиной не менее 5 мм, обеспечивающую необходимые размеры контактного пояска. Для лучшего сцепления твердосплавного слоя с металлом заготовки основание канавки выполняют рифленным. В канавку равномерным слоем засыпается шихта твердосплавного материала, которая затем прессуется пуансоном. Заготовка помещается в электропечь, где в восстановительной (H<sub>2</sub>) или нейтральной (Ar) среде происходит спекание, пропитка и припой спрессованного слоя. При этом температура спекания должна превышать температуру плавления пропиточного материала, но быть ниже температуры плавления стальной заготовки. При достижении необходимой температуры спекания следует выдержка 20–30 мин и постепенное снижение температуры печи до 200...100 °С. Дальнейшее охлаждение заго-

товки происходит в воздушной среде. При этом образуется композиционный материал, имеющий твердость, близкую к твердости введенных карбидов, высокую прочность и антифрикционность, обусловленную наличием в нем тонких прослоек связующего металла, скрепляющего твердые и хрупкие частицы карбида, прочно соединенные со стальной заготовкой.

Наплавленная таким образом и охлажденная заготовка кольца подвергается окончательной механической обработке. При этом твердосплавную контактную поверхность тонко шлифуют и притирают с последующей проверкой плоскостности.

Кроме того, износостойкий контактный поясок можно получить использованием индукционных печей. Спекание материала при этом производится либо под флюсом (бура техническая), либо под струей нейтрального газа (аргона). Применение индукционных печей позволяет производить процесс наплавки с большой производительностью, но при этом, если не принимать соответствующих мер, происходит довольно быстрое охлаждение заготовки, что приводит к накоплению в ее теле больших внутренних напряжений, а также появление на поверхности заготовки окалины. Чтобы этого избежать, рекомендуется наплавленные заготовки после спекания и затвердения контактного пояска помещать в печи для медленного охлаждения до температуры 200...100 °С.

**2 Исследование материалов пар трения на износостойкость в абразивных средах.** С целью выявления наиболее износостойкого материала, используемого в парах трения, были проведены исследования на износостойкость пар трения на лабораторном стенде. В качестве абразивного материала использовался кварцевый песок А2К 0315Б ГОСТ 2138–74.

Исследованию на износостойкость были подвергнуты следующие материалы пар трения:

- силицированный графит (СГ-П) – силицированный графит (СГ-П);
- карбид вольфрама + Si<sub>90</sub> Ni<sub>10</sub> (ТМ-1) – карбид вольфрама + Si<sub>90</sub> Ni<sub>10</sub> (ТМ-1);
- карбид вольфрама + ВПр-4 – карбид вольфрама + ВПр-4;
- карбид вольфрама + ЛМНЦ 60-9-5 – карбид вольфрама + ЛМНЦ 60-9-5;
- ВСНГН – ВСНГН;
- сталь 2Х13 – бронза (ОЦС-5-5-5).

Исследование проводили в два этапа:

- 1) исследовалось влияние крупности абразивного материала на интенсивность износа пары трения;
- 2) выявлялась зависимость интенсивности износа от концентрации абразивного материала. При этом концентрацию абразива в жидкости изменяли от 5 до 80 %.

*2.1 Описание устройства и работы экспериментального стенда.* Для исследования режимов работы контактных колец торцовых уплотнений применительно к условиям работы пары трения в гидроабразивных жидкостях был модернизирован экспериментальный стенд с горизонтальным расположением вала (рисунок 2), который позволяет в широком диапазоне удельных

нагрузок на контакте пары трения проводить испытания различных материалов на антифрикционность, износостойкость и герметичность.

На раме станда с помощью стоек 23 укреплены следующие узлы: электродвигатель 1 марки АОТ-42-2 мощностью 4,5 кВт, корпус подшипников 2 и головка станда 3. От электродвигателя 1 через муфту 4 вращающий момент передается на вал 5 головки станда. Вал 5 установлен в корпусе 2 на двух радиально-упорных подшипниках 6, между внутренними кольцами которых установлена распорная втулка 7. Корпус подшипников закрыт крышкой 8. Уплотнение по валу осуществляется фетровым сальником. Регулировка подшипников производится установкой комплектовочных шайб между крышкой 8 и корпусом 2.

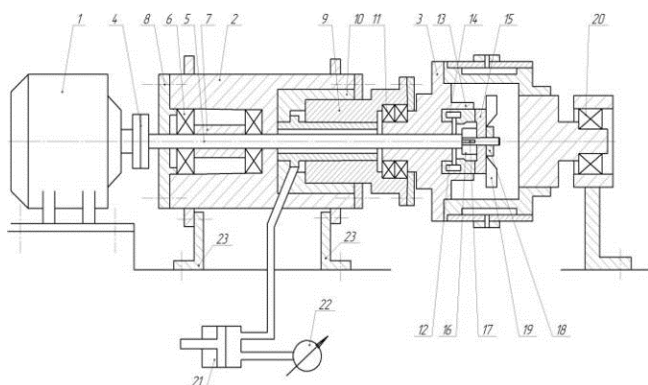


Рисунок 2 – Принципиальная схема экспериментального станда, для испытаний колец пар трения торцовых уплотнений

В расточке корпуса 2 установлен гидроцилиндр, выполненный как прецизионная пара – плунжер 9 и цилиндр 10. Цилиндр закреплен в корпусе фланцем.

В плунжере 9 установлены два радиально-упорных подшипника 11, на которых вращается корпус камеры 3. В корпусе установлены цилиндрические пружины 12. Аксиально-подвижное кольцо 13 пары трения (не вращающееся) опирается на эти пружины и зафиксировано от проворота двумя штифтами 14. Вращающееся кольцо 15 установлено на валу 5 при помощи втулки 16, шпонки 17 и гайки 18.

Испытательная головка 3 представляет собой камеру, заполненную рабочей жидкостью, предупреждение нагрева осуществляется рубашкой охлаждения. Для предотвращения образования застойных зон в процессе работы на абразивных жидкостях на вал насажен вертушок 19, который способствует завихрению рабочей жидкости и приближает лабораторные испытания к реальным условиям, имеющим место при работе насоса. Правая опора 20 испытательной головки станда выполнена плавающей с возможностью осевого перемещения камеры, возникающего от воздействия гидроцилиндра. Давление в гидроцилиндре создается масляным нагнетателем 21 и контролируется по манометру 22.

**2.1.1 Схема измерения силы трения на контакте пары трения.** На основании существующей зависимости между силой трения  $F_{тр}$  и коэффициентом трения  $f$  можем записать:

$$F_{тр} = fN, \quad (2)$$

где  $N$  – сила нормального давления, т.е.  $N = p_{уд.конт}$ ;  $p_{уд.конт}$  – удельная нагрузка на контакте пары трения.

Таким образом,

$$f = \frac{F_{тр}}{p_{уд.конт}}. \quad (3)$$

Для измерения силы трения на контакте используется устройство, представленное на рисунке 3.

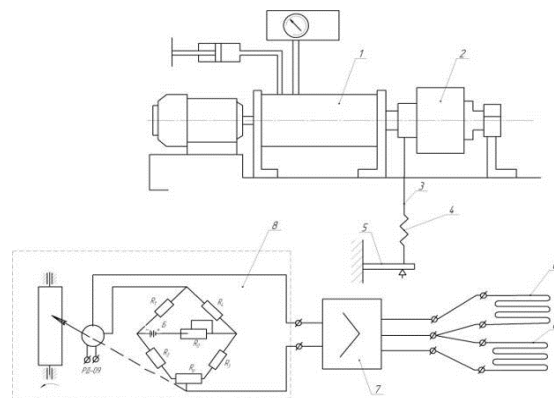


Рисунок 3 – Устройство для измерения силы трения

Сила трения гибкого тросика 3, огибающего цилиндрическую поверхность корпуса испытательной головки 2, передается на тензобалочку 5. Для приближенного контроля усилия натяжения тросика последовательно с ним включен пружинный динамометр 4. Более точно это усилие измеряется с помощью комплекса приборов, схематично представленных ниже.

Два датчика 6, наклеенных на тензобалочку 5, являются одним плечом моста, встроенного в тензоусилитель 7. Датчики и обмотка трансформатора усилителя мощности образуют измерительный мост, который запитывается напряжением 6 с частотой  $f = 7000$  Гц. Датчики при воздействии деформации меняют свое сопротивление, вследствие чего происходит разбаланс моста и на его диагонали появляется напряжение несущей частоты, модулированное напряжением деформации. Это напряжение через устройство, балансирующее измерительный мост и делитель, поступает на усилитель, а затем на кольцевой детектор, который выделяет сигнал модулированной частоты, пропорциональный величине и соответствующий направлению деформации. Полученный сигнал поступает на регистрирующее устройство 8.

Регистрация усилия натяжения тросика осуществляется электронным потенциометром. Этот прибор позволяет не только визуально наблюдать процесс регистрации, но и производить запись значений силы трения на диаграммной ленте.

Перед началом измерений система тарируется. Тарировка производится на схеме, аналогичной вышеописанной. Отличие лишь в том, что при этом усилие натяжения тросика, а следовательно, и деформация балочки заданное. По известному усилию отмечается величина отклонения стрелки потенциометра, и таким образом составляется шкала для данного этапа исследований. По отклонению стрелки потенциометра при стендовых испытаниях судят о величине силы трения на контакте.

2.1.2 *Подготовка к проведению испытаний.* Испытанию подвергались только доброкачественные пары трения. Перед испытанием каждое кольцо пары трения притиралось на притирочной плите до чистоты поверхности не ниже 5–4 качества. Оценка качества поверхности производилась визуально и профилографированием с целью определения характера поверхности. Чистота контактных поверхностей контролировалась профилографом-профилометром. Проверенная на профилографе-профилометре пара трения устанавливалась в испытательную камеру. Испытательная камера одевалась на головку, и ее внутренняя полость заполнялась гидроабразивной смесью через отверстие в боковой поверхности. Подготавливалась измерительная аппаратура, включающая в себя тензобалочку, тензоусилитель, потенциометр (см. рисунок 3). Потенциометр и тензоусилитель включались в сеть переменного тока напряжением 220 В. После прогрева (15–20 мин) тензоусилителя ручками на его передней панели «Баланс моста» и «Установка нуля» выводились нули тензоусилителя и потенциометра.

Удельная нагрузка на контакте пары трения, создаваемая нагнетателем 21 (см. рисунок 2) и контролируемая манометром 22, определяется по формуле

$$p_{уд} = \frac{p_{г.ц} F_{г.ц}}{F_{конт}}, \quad (4)$$

где  $p_{уд}$  – удельное давление на контакте;  $p_{г.ц}$  – давление масла в гидроцилиндре;  $F_{конт}$  – площадь контакта;  $F_{г.ц}$  – площадь плунжера гидроцилиндра.

При работе на стенде удельное давление на контакте создается в 0,6 МПа и держится постоянным на протяжении всех испытаний. Выбор  $p_{уд} = 0,6$  МПа обоснован тем, что при этом удельном давлении пара трения работает в наивыгоднейших условиях (на основании проведенных ранее исследований) [4].

После проведения каждого эксперимента пара трения снимается со стенда, очищается, промывается, просушивается и контролируется на профилографе-профилометре. По снятым профилограммам колец пары трения производится оценка интенсивности объемного износа.

2.2 *Исследование механизма изнашивания пар трения торцовых уплотнений при работе в гидросмесьях.* Как показали серии многочисленных экспериментов, проведенные на парах трения из различных материалов, работающих в гидросмесьях, содержащих абразив различной крупности, механизм процесса изнашивания материалов пар трения имеет общий рисунок, практически независимый от соотношения твердостей абразивных частиц и материала пары трения.

На рисунке 4 показан профиль уплотнительных колец торцового уплотнения, работающего в абразивной среде. На поверхностях трения можно выделить три характерных участка. На первом участке (со стороны гидросмеси – участок I) имеет место гидроабразивное изнашивание материалов колец. Суммарная глубина износа колец превышает крупность изнашивающих абразивных частиц. При этом наиболее глубокая выработка материала наблюдается у вращающегося кольца в месте контактирования с входной кромкой не вращающегося кольца (см. рисунок 4). Однако в исследованиях,

проведенных В. В. Гордеевым [5], наибольшая выработка наблюдается у не вращающегося кольца, причем ширина вращающегося кольца больше ширины не вращающегося кольца, и максимальная выработка материала происходит в месте контактирования с входной кромкой вращающегося кольца.

Таким образом, можно предположить, что наибольшая выработка может происходить как на вращающемся, так и на не вращающемся кольцах, в зависимости от того, какое из колец имеет меньшую ширину.

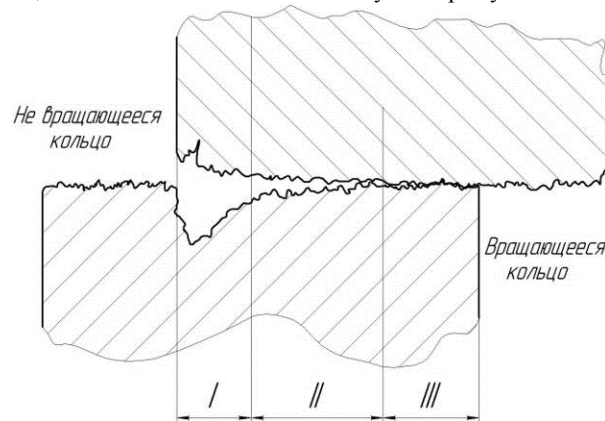


Рисунок 4 – Профиль поверхностей уплотнительных колец

Второй участок II имеет характерную клиновидность, изнашивание осуществляется полужагранным абразивом, сопоставимым по крупности с величиной зазора. На третьем участке III износ происходит в результате взаимодействия поверхностей трения без участия абразивных частиц.

Доминирующим видом изнашивания является изнашивание полужагранным абразивом. В процессе работы торцового уплотнения участок II увеличивается в радиальном направлении до тех пор, пока не исчезнет участок III, обеспечивающий герметичность. В этом случае значительно растут утечки абразивной среды, и торцовое уплотнение выходит из строя.

Возникновение износа поверхностей трения зависит от состояния входной кромки: дефектов (фасок, сколов) на входной кромке, пористости на рабочей поверхности входного участка. Определенную роль играет и эксцентricность расположения колец. Таким образом, основываясь на описанных выше явлениях, происходящих при работе пары трения на гидросмесьях, можно рекомендовать при конструировании колец пар трения придерживаться следующих требований:

- кольца пары трения должны иметь одинаковую ширину;
- ширина контактного пояса колец пары трения должна быть по возможности большей и выбираться из условий максимальной величины участка III и минимальной величины коэффициента трения;
- особое внимание следует обращать на состояние входных рабочих кромок и участков;
- следует избегать эксцентricности расположения колец пары трения.

2.3 *Методика определения интенсивности объемного износа контактных поверхностей.* Расположение уплотнительных колец на стенде можно видеть на рисунке 2. Схема работы пары трения представлена на

рисунке 5. Как видно из рисунка, на кольцах имеются базовые поверхности, обеспечивающие точность и удобство в измерении величины износа. Профилограммы вращающегося (а) и не вращающегося (б) колец представлены на рисунке 6.

Оценка интенсивности объемного износа производится следующим образом:

- проводится осреднение кривой износа (рисунок 7);
- проводятся оси ординат;
- кривая износа разбивается на равные интервалы, начиная с базисной ступеньки (для вращающегося кольца) и с начала профилограммы (для не вращающегося кольца) – с диаметра не вращающегося кольца  $D_0$ ;
- определяется число интервалов

$$n = \frac{x_n - x_0}{h}.$$

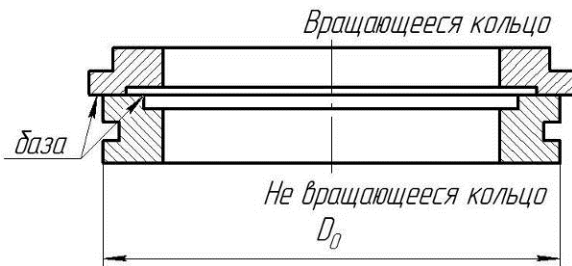


Рисунок 5 – Контактная пара трения с базовыми поверхностями

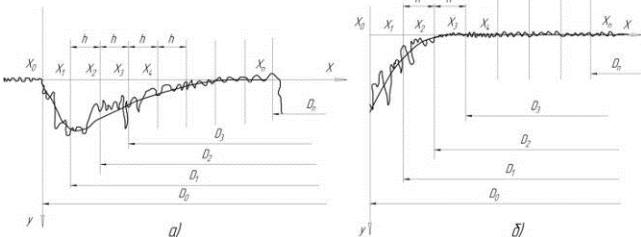


Рисунок 6 – Профилограммы контактных поверхностей:  
а – вращающегося кольца; б – не вращающегося кольца

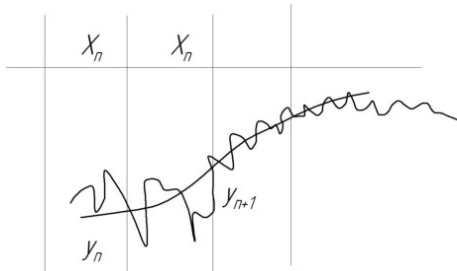


Рисунок 7 – Фрагмент профилограммы

Для удобства вычислений, так как ширина контактного пояса известна ( $b = 4$  мм;  $b' = 3$  мм), принимаем соответственно число интервалов  $n = 3...6$ . Тогда ширина интервала будет во всех случаях постоянной и равной:

$$h = \frac{x_n - x_0}{n} = 0,5 \text{ мм};$$

с учетом горизонтального увеличения (1:20).

– определяется интенсивность объемного износа,  $\text{мм}^3/\text{ч}$ , по формуле

$$v = Sy; \quad (5)$$

– выводится формула для определения кольцевых площадей износа.

Из рисунка 6 видно, что:

$$S_1 = \frac{\pi}{4}(D_0^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4}(D_0 - D_1)(D_0 + D_1) = \left| \begin{matrix} D_1 = D_0 - 2h \\ D_0 - D_1 = 2h \end{matrix} \right| =$$

$$= \frac{\pi}{4} 2h(D_0 + D_0 - 2h) = \pi h(D_0 - h);$$

$$S_2 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) = \frac{\pi}{4}(D_1 - D_2)(D_1 + D_2) = \left| \begin{matrix} D_1 = D_0 - 2h \\ D_2 = D_0 - 4h \end{matrix} \right| =$$

$$= \frac{\pi}{4} 2h(D_0 - 2h + D_0 - 4h) = \pi h(D_0 - 3h);$$

$$S_3 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_3^2) = \frac{\pi}{4}(D_2 - D_3)(D_2 + D_3) = \left| \begin{matrix} D_2 = D_0 - 4h \\ D_3 = D_0 - 6h \end{matrix} \right| =$$

$$= \frac{\pi}{4} 2h(D_0 - 4h + D_0 - 6h) = \pi h(D_0 - 5h);$$

$$S_n = \pi h [D_0 - (2n - 1)h] \text{ мм}^2; \quad (6)$$

– определяется изменение ординаты износа во времени,  $\text{мм}/\text{ч}$  (из рисунка 7):

$$V_n = S_n y_{n+1} + S_n \frac{y_n - y_{n+1}}{2} = S_n \left( y_{n+1} + \frac{y_n - y_{n+1}}{2} \right) = S_n \frac{y_n + y_{n+1}}{2};$$

$$y_{ni} = \frac{y_n + y_{n+1}}{2}; \quad (7)$$

– определяется интенсивность объемного износа,  $\text{мм}^3/\text{ч}$ :

$$V = \pi h [D_0 - (2n - 1)h] \cdot \frac{y_n + y_{n+1}}{2}, \quad (8)$$

где  $\pi = 3,14$ ;  $D_0$  – максимальный диаметр не вращающегося кольца, мм;  $n$  – номер интервала ( $n = \text{от } 1 \text{ до } 8$ );  $y_n$  – высота неровностей по профилограмме, мм;  $h$  – ширина интервала, мм ( $h = 0,5$  мм).

**3 Испытания материалов пар трения на износостойкость в абразивных средах.** С целью определения относительной износостойкости материалов пар трения были проведены исследования на описанном выше стенде. С тем чтобы ускорить испытания, для получения достаточно достоверных данных об износостойкости в течение не слишком долгого времени, была изучена зависимость интенсивности износа от крупности абразивного материала в гидросмеси. Для этого были приготовлены четыре фракции кварцевого песка А2К 0315 Б ГОСТ 2138–74 крупностью: менее 0,050 мм; 0,050–0,063 мм; 0,063–0,10 мм; 0,10–0,315 мм в количестве, составляющем 3,8 % от объема гидросмеси. Испытания проводили на паре трения СГ-П по СГ-П (силицированный графит). Удельное давление на контакте пары трения в процессе эксперимента поддерживалось постоянным и равным 0,6 МПа. Во время испытания

производилась запись потенциометром силы трения на контакте. При этом характер изменения силы трения во все время эксперимента оставался в общем-то одинаковым. В начальный момент пуска отмечалось значительная сила трения (до 100–120 Н), затем после 5–7 мин работы стэнда она снижалась до значений, равных 60–80 Н, и так сохранялась почти всегда до конца испытаний, что соответствовало коэффициенту трения в паре, равному 0,03–0,09. После проведения каждого испытания пары трения она подвергалась профилографированию, а затем по методике, описанной выше, вычислялась интенсивность изнашивания.

Как показали эксперименты, интенсивность износа с увеличением крупности абразивных частиц убывает, причем наиболее резко кривая падает в диапазоне крупностей менее 0,050 и 0,050–0,063 мм (кривые почти вертикальны (рисунок 8)). Дальнейшее снижение кривых идет более полого.

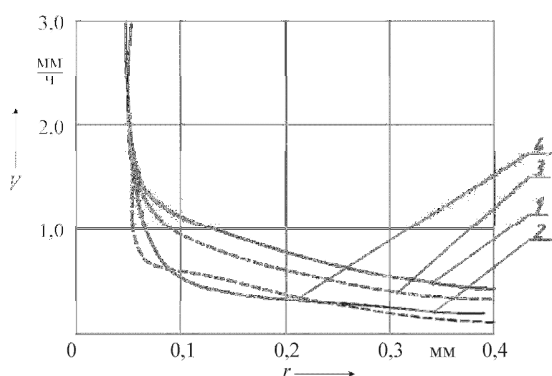


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности объемного износа от крупности абразивных включений в гидросмеси: 1, 3 – вращающегося кольца; 2, 4 – не вращающегося кольца; после одного часа работы (1, 2) и после двух часов работы (3, 4)

На рисунке 8 нанесены кривые зависимостей интенсивности износа  $V$  ( $\text{мм}^3/\text{ч}$ ) от крупности абразивных частиц  $r$  (мм) для вращающегося и не вращающегося колец при испытании в течение 1 и 2 ч. Из рисунка 8 видно, что интенсивность износа вращающегося кольца выше, чем не вращающегося, примерно в два раза. Другой особенностью является то, что с увеличением времени испытания интенсивность износа уменьшается.

Получено 20.02.2016

**V. M. Golub, M. V. Golub, P. V. Demidenko.** Hydroabrasive wear of the mechanical seal friction pairs.

The study materials of friction pairs of mechanical seals pump shafts to wear in abrasive environments. A test stand for slip rings of mechanical seals on friction and wear. Selected method of determining the intensity of the volume wear of the contact surfaces. The dependence of the wear rate of contact rings from abrasive waterjet concentration in the mixture.

Это характерно для любой пары трения и связано с ее периодом приработки. Но тем не менее этот вопрос еще будет изучаться нами.

Рисунок 8 показывает, что максимальный износ для данной пары трения имеет место при крупности абразивных частиц менее 100 мкм, так как при большей крупности интенсивность износа изменяется очень медленно (кривые пологие) и, очевидно, уже не зависит от абразивных частиц.

**Заключение.** После проведенных исследований можно сделать вывод, что на износ пары трения влияет абразив крупностью менее 100 мкм, при этом чем больше будет износ, тем меньше крупность частиц. Максимальный износ наблюдается при абразивных частицах крупностью, сопоставимой с величиной зазора пары трения, который составляет 3–5 мкм.

Кроме этого, были проведены исследования для выявления сопоставимости износостойкости различных пар трения. Наилучшие результаты при этом были получены при испытании следующих пар трения: ТМ-1 по ТМ-1; карбид вольфрама ВПр-4 по одноименной поверхности и карбид вольфрама + ЛМНЦ 60-9-5 по одноименной поверхности. Однако полностью вопрос еще не изучен и требует проведения дальнейших испытаний.

#### Список литературы

- 1 Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
- 2 А. с. 226353 / М. В. Голуб, А. И. Кравцов // Бюллетень изобретений. – 1968. – № 28.
- 3 Харламенко, В. И. Опыт эксплуатации торцовых уплотнений центробежных насосов / В. И. Харламенко, М. В. Голуб. – М. : ТНТО ВНИИОЭНГ, 1971. – 260 с.
- 4 Харламенко, В. И. Совершенствование торцовых уплотнений насосов магистральных трубопроводов / В. И. Харламенко, М. В. Голуб. – М. : ТНТО ВНИИОЭНГ, 1975. – 240 с.
- 5 Голубев, А. И. Создание торцовых уплотнений для насосов, перекачивающих жидкости со взвесью / А. И. Голубев, В. В. Гордеев // Сб. тр. ВНИИГИДРОМАШа. 1972. – Вып. 44. – С. 32–44.