А. Н. Жуков, главный инженер («Сумское НПО», г. Сумы, Украина)

Проблемы повышения качества рабочих поверхностей элементов торцевых импульсных уплотнений центробежных насосов

В работе, на основании анализа литературных и патентных источников, посвященных повышению износостойкости поверхностей пар трения скольжения, определены задачи для разработки методики направленного выбора технологии повышения качества рабочих поверхностей элементов торцевых импульсных уплотнений центробежных насосов. **Ключевые слова:** торцевое импульсное уплотнение, износостойкость, качество поверхности, шероховатость, микро-

твердость, кольцо, втулка.

В роботі, на підставі аналізу літературних і патентних джерел, присвячених підвищенню зносостійкості поверхонь пар тертя ковзання, визначені завдання для розробки методики спрямованого вибору технології підвищення якості робочих поверхонь елементів торцевих імпульсних ущільнень відцентрових насосів.

Ключові слова: торцеве імпульсне ущільнення, зносостійкість, якість поверхні, шорсткість, мікротвердість, кільце, втулка.

In this paper, based on the analysis of literature and patent sources devoted to improving the wear resistance of surfaces of sliding friction pairs, the tasks for the development of a technique for the directional choice of a technology for improving the quality of working surfaces of the elements of end pulse seals of centrifugal pumps are defined.

Keywords: end impulse seal, wear resistance, surface quality, roughness, microhardness, ring, sleeve.

Постановка проблемы в общем виде

Большинство ответственных деталей компрессоров, насосов, газоперекачивающих аппаратов и другого промышленного оборудования работает при высоких скоростях, давлениях, температурах, а также в условиях абразивного, коррозийного и другого видов влияния рабочих сред. Задача повышения надежности и долговечности этих деталей решается обычно путем применения дорогих и очень твердых материалов. Так в высокооборотных насосах и компрессорах большого давления широко используются торцевые уплотнения бесконтактного типа, которые получили название - торцевые импульсные уплотнения (ТИУ).

При нормальной работе уплотнения торцевые поверхности колец контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и останова машины. Наличие в торцевой паре гарантированного зазора величиной 0,003-0,004 мм приводит к тому, что уплотняющие поверхности колец почти не изнашиваются.

Несмотря на отсутствие контакта торцов во время работы уплотнительные кольца целиком изготовляются с износостойких материалов, таких как карбид вольфрама, карбид кремния, разных видов графитов. Стоимость колец из этих материалов достигает сотен и тысяч долларов США, что служит причиной высокой стоимости уплотнительных узлов в целом.

Расширение области применения импульсных уплотнений в сторону повышения режимных параметров сопровождается появлением новых, более дешевых, но не менее надежных композиционных материалов, типа «основа - покрытие», что соединят в себе защитные свойства покрытий с механической прочностью основы.

Таким образом, создание надежных уплотнительных узлов, таких как ТИУ, обеспечивающих герметичность в течение длительного времени в широком диапазоне изменения температур и давлений, является одной из основных проблем, возникающих при проектировании насосных и компрессорных машин и агрегатов. Решение этой проблемы является актуальной задачей, требующей своевременного решения. Учитывая то, что в настоящее время существует большое количество литературных и патентных источников, направленных на повышение качественных параметров контактирующих поверхностей скольжения, в том числе и рабочих поверхностей колец ТИУ возникает научная и практическая необходимость в их систематизации анализе.

Таким образом, **целью работы** является проведение литературных и патентных исследований и на основании их анализа сформулировать задачи для разработки методики направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей ТИУ.

Анализ основных достижений и публикаций Конструктивные особенности ТИУ

Торцевые уплотнения (ТУ) со специально создаваемыми искусственными устройствами снабжения смазкой поверхностей трущейся пары колец с помощью камер или канавок на уплотняющих поверхностях пары трения относят к типу *бесконтактных* ТУ, которые в свою очередь по характеру образования сил в торцовой щели делят на виды *гидростатические, гидродинамические* и гибридные [1]. Зазоры для обыкновенных ТУ составляют 0,5...2 мкм, для бесконтактных вида гидродинамических ТУ - более 2 мкм, а для вида гидростатических ТУ - более 5 мкм.

Профессором В.А. Марцинковским описано высокоэффективное ТУ с импульсным уравновешиванием. В обычных гидростатических уплотнениях для увеличения жёсткости выполняют капиллярные внутренние дроссели, геометрические параметры которых изменяются из-за эрозионного изнашивания или засорения, что может привести к потере уплотнением статической или динамической устойчивости. В малых зазорах вторичных уплотнений возможно залипание, затрудняющее осевые перемещения подвижного элемента. Кроме того, характеристики гидростатических ТУ не зависят от частоты вращения ротора, что ухудшает температурный режим на повышенных частотах и требует дополнительных стояночных уплотнений, чтобы исключить утечки во временно остановленных машинах [2].

Некоторые из перечисленных недостатков устранены в ТУ, использующих динамический эффект (например, уплотнения со спиральными канавками).

Такие уплотнения обладают большей жёсткостью, зависящей от частоты вращения ротора. Однако профилирование торцовых поверхностей таких уплотнений является сложной операцией, трудоёмкость которой возрастает от того, что уплотняющие пары нужно изготавливать из твёрдосплавных материалов, трудно поддающихся обработке [2].

Компромиссным вариантом, сочетающим преимущества обоих рассмотренных выше типов уплотнений, являются ТИУ, в которых увеличение жёсткости достигается за счёт дискретных импульсов давления, создаваемых в момент сообщения питающих камер со структурами обратного нагнетания. Саморегулирование торцового зазора обусловлено в данном случае зависимостью величины импульсов от величины зазора и частоты вращения ротора.

ТИУ по сравнению с бесконтактными щелевыми и гидродинамическими уплотнениями позволили повысить уровень надежности и герметичности современных роторных машин. Они нашли широкое применение в высокооборотных насосах и компрессорах большого давления. Рабочие торцевые поверхности ТИУ контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и останова машины [3].

Как правило, ТИУ содержат аксиально-подвижное металлическое кольцо, установленное в корпусе, которое снабжено вторичным уплотнением, герметизирующим полости с разными давлениями, опорное металлическое кольцо, закрепленное на валу. На рабочей торцовой поверхности аксиально-подвижного кольца расположены замкнутые камеры, а на торцовой поверхности опорного кольца – подводящие каналы, которые при вращении опорного кольца последовательно соединяют замкнутые камеры с уплотняемой полостью.

Форма подводящих каналов может быть различной, например в виде радиальных питателей [4, 5], тангенциальных питателей [6], комбинированных питателей – радиальные и осевые каналы [5].

Конструктивно различают ТИУ с резиновым вторичным уплотнением [4, 7] и вторичным уплотнением, изготовленным в виде металлической манжеты [8].

ТУ с импульсным уравновешиванием аксиально подвижного элемента имеет сравнительно недавнюю историю - 1974 г. [4]. Традиционная конструктивная схема ТИУ показана на рис. 1. На рабочей поверхности аксиально подвижного кольца 1 расположены замкнутые камеры 2, а на поверхности опорного диска 3



Рис. 1. Конструктивная схема ИТУ

предусмотрено несколько подводящих каналов 4, которые при вращении упорного кольца последовательно соединяют камеры 2 с уплотняемой полостью А.

Принцип действия импульсного уплотнения основан на том, что при вращении ротора подводящие каналы 4 периодически сообщают камеры с полостью высокого давления 5, вследствие чего в них происходят всплески давления (импульсы), вызывающие изменение баланса осевых сил.

Силы действуют на аксиально подвижное кольцо, вследствие чего уплотняющие поверхности торцовой пары разделяются тонким слоем рабочей среды, при этом его толщина зависит от размеров камер и питающих каналов.

ТИУ относятся к типу саморегулируемых, в них величина торцевого зазора выдерживается автоматически. Саморегулирование зазора основано на том, что осредненное за период между последовательными впрысками уплотняемой среды давление в каждой из камер 2 тем больше, чем меньше торцевой зазор и чем больше частота вращения ротора. Увеличение торцевого зазора приводит к уменьшению осредненного давления в этих камерах и к нарушению баланса сил, действующих на аксиально подвижный элемент. В результате этого кольцо перемещается в сторону опорного диска и торцовый зазор уменьшается до тех пор, пока давление не возрастет настолько, чтобы восстановить равновесие осевых сил. При отсутствии вращения ротора и наличии давления уплотняемой среды торцовый зазор закрывается и уплотнение работает как стояночное.

Характерной особенностью ТИУ является то, что микрозазоры в паре трения достигаются за счет макрогеометрии торцовых поясков, т.е. размеры (ширина, глубина и длина) камер и питающих каналов исчисляются в миллиметрах и во много раз превосходят размеры зазора. При этом изменение размеров камер и питающих каналов в результате эрозионного или абразивного износа не оказывает существенного влияния на величину зазора и, следовательно, утечки.

ТИУ на жидкостной смазке исследованы в широком диапазоне параметров режима: уплотняемый перепад давлений до 16,0 МПа, скорость скольжения до 100 м/с. Благодаря своим высоким эксплуатационным качествам, они успешно работают в высокооборотных питательных насосах атомных и тепловых электростанций. В среднем их наработка между плановыми ремонтами насосов составляет не менее 8000 ч, при этом степень износа при пути 10⁶ км остается в пределах 1 - 2 мкм, что для узлов трения характеризуется как нулевой износ. При типичных условиях работы (давление 2,0 -4,0 МПа, окружная скорость 40 - 60 м/с) уровень утечки составляет всего 1 - 2 л /ч [9].

В [10] проведен анализ работы затворного импульсного уплотнения. Отмечено, что применение таких уплотнений позволяет сэкономить энергию и ресурсы, а также повысить экологическую безопасность насосного и компрессорного оборудования.

В некоторых агрессивных средах, где применение в разъемных соединениях уплотнений из неметаллических материалов ограниченно или невозможно, применяют металлические уплотнения.

До последнего времени считалось, что ТИУ работоспособны только в жидких средах. Однако проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что эти уплотнения работоспособны и в жидкостях, и в газах. Были выполнены уникальные исследования импульсных уплотнений при сверхвысоких режимных параметрах pv > 400 МПа·м/с в криогенной жидкости (жидкий азот, t = -195 °C), которые показали, что такое уплотнение мало чувствительно к теплофизическим свойствам и температуре рабочей среды. Все

> Компрессорное и энергетическое машиностроение №3 (53) сентябрь 2018

это позволяет сделать вывод об универсальности ТИУ и большой практической ценности [11].

Учитывая то, что при использовании высоких и сверхвысоких давлений, экстремальных температур (от высоких до криогенных), агрессивных сред и т.п., где применение в разъемных соединениях уплотнений из неметаллических материалов ограниченно или невозможно, становится целесообразным применение металлических уплотнений, для которых практически нет ограничений, кроме прочности самого материала уплотнений и термостойкости материала покрытия [12].

Следует отметить, что уплотнения, имеющие резиновые уплотнители вторичного уплотнения, не работоспособны в криогенных средах.

Для роторных машин, перекачивающих криогенные среды, предложено ТИУ, способное надежно работать в криогенных средах высокого давления при больших скоростях вращения и на нестационарных режимах с малыми протечками от 0,1 до 0,7 л/с в зависимости от геометрических размеров торцовой пары [8].

Уплотнение (рис. 2) содержит аксиально подвижное кольцо 1, установленное в корпусе 2, которое поджато пружиной 3, и опорное металлическое кольцо 4, закрепленное на валу 5. На рабочей торцевой поверхности 6 кольца 1 выполнен ряд камер 7, прерывисто расположенных по окружности кольца. На кольце 4 выполнено несколько тангенциальных каналов 8, средние участки которых расположены от оси на том же расстоянии, что и камеры 7. Число каналов 8 меньше числа камер 7, так что они могут сообщать с полостью упрочняемой среды лишь часть камер. Вторичное уплотнение



Рис. 2. Конструкция ТИУ для криогенных ТНА ЖРД: 12, 13 – кольцевые проточки; 14 – тыльная коническая поверхность кольца 4.

9 аксиально подвижного кольца 1, выполненное в виде тонкостенной металлической оболочки, изготовлено за одно целое с кольцом 1. Эта оболочка представляет собой конический профилированный ус с утолщением в месте соединения с аксиально подвижным кольцом 1. Конический ус имеет торцовую уплотнительную поверхность 10 в месте контакта с уплотнительной поверхностью втулки 11. Торцовая поверхность уса может иметь покрытие из мягкого материала, например из серебра. При сборке уплотнительного узла торцовая поверхность уса с натягом (от 0,02 до 0, 07 мм) устанавливается на втулку 11. Кольца 1 и 4 уплотнения выполняются из никелевого сплава ЭК61 (ХН58МБЮД) или из бериллиевой бронзы БрБ2. Рабочие торцовые поверхности колец 1 и 4 имеют покрытие из высокотвердого материала типа TiN или твердого сплава ВК8.

Такие решения совместно с другими позволяют применить ТИУ в турбонасосных агрегатах (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Следует отметить, что наряду с проблемой повышения износостойкости рабочих торцовых поверхностей ТИУ существует задача обеспечения надежности и герметичности соединения торцовой уплотнительной поверхности 10 вторичного уплотнения 9 в месте контакта с уплотнительной поверхностью втулки 11. Учитывая то, что вторичное уплотнение 9 аксиально подвижного кольца 1, изготовлено за одно целое с кольцом 1, то в месте контакта поверхность 10 вторичного уплотнения и поверхность втулки 11, взаимно перемещаясь, подвергаются фреттинг коррозии.

В [13] в результате сравнительных исследований установлено, что пара трения, в которой канавки выполнены только на одном из колец, работает с меньшими величинами зазора, с повышенным тепловыделением и, как следствие, с повышенным уровнем деформаций. Такое уплотнение уже не может рассматриваться как бесконтактное и структуры (как подводящие, так и отводящие) осуществляют подвод смазки в зону трения, но не способны обеспечить создание гарантированного зазора для всех режимов работы. Хотя такое уплотнение более герметично даже в отсутствии вращения, тем не менее оно значительно уступает по ресурсу ТИУ у которого канавки выполнены на разных кольцах.

Таким образом, анализ литературных источников показал: 1) ТИУ относятся к бесконтактным гидростатическим и гидродинамическим ТУ с импульсным питанием смазкой и перепадом давлений от 5 до 50 МПа; 2) торцевые рабочие поверхности колец ТИУ контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и останова машины; 3) ТИУ работоспособны как в жидкостях, так и в газах, в обычных и агрессивных средах; 4) по виду вторичного уплотнения различают ТИУ с резиновым и металлическим вторичным уплотнением.

Применение, материал и виды разрушений ТУ

В [14] представлены рекомендации к выбору материалов пар трения по показателям применимости. Анализ работы ТУ в центробежных насосах показывает, что требования, предъявляемые к материалам пар трения, можно свести к следующим показателям применимости: износостойкость материала при стабильном режиме работы ТУ; коррозионная стойкость; наличие внутренних напряжений в материале; эффективность теплоотвода; работоспособность материала в режиме трения без смазочного материала.

В зависимости от условий работы выделяют четыре группы торцевых уплотнений:

1. Уплотнения для химически неагрессивных и слабоагрессивных сред (масел, нефтепродуктов, воды).

2. Уплотнения для химических и агрессивных сред (кислот, щелочей, растворов солей, паров, газов и различных технологических сред химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности).

3. Уплотнения для сред с большим содержанием твердых частиц и включений (сред, перекачиваемых грунтовыми, песковыми, химическими, фекальными насосами и насосами для бумажной массы на горнообогатительных комбинатах, в угольных шахтах, ГРЭС, в строительной, химической и бумажной промышленности).

4. Специальные уплотнения, которые в отличии от первых трех групп, выпускаются малыми партиями и

даже единично для специфических, часто особо трудных условий работы: высокие давления, высокие или очень низкие температуры, высокая частота вращения вала, большой диаметр вала.

При выборе оптимальных пар скольжения необходимо учитывать коррозионную стойкость и износостойкость материалов, возможность теплоотвода из зоны трения, а также совместимость материалов, т. е. возможность работы без схватывания и заеданий [15].

В [14] для характеристики напряженности условий работы ТУ принят параметр, представляющий собой произведения давления **р** рабочей среды на среднюю окружную скорость скольжения **v** в паре трения. В зависимости от значений параметров **рv** ТУ подразделяют на четыре категории (табл. 1).

Таблица 1. Классификация уплотнений по параметру ру

Категория уплотнения	Р, МПа	^ν , м/сек	рѵ, МПа∙м/с	Определение параметра
I	≤ 0,1	≤ 10	≤ 1	Низкий
II	≤ 1,0	≤ 10	≤ 5	Средний
III	≤ 5,0	≤ 20	≤ 50	Высокий
IV	> 5,0	> 20	> 50	Наивысший

В [16] представлены, которые предъявляются к материалам пар трения, предназначенным для работы в ТУ, контактирующих с агрессивными средами: стойкость к воздействию агрессивной среды; непроницаемость для сред, контактирующих с уплотнительными кольцами; стойкость к воздействию температурного градиента; отсутствие схватывания и заедания; достаточная фрикционная теплостойкость; максимально возможный ресурс работы; стабильность по времени коэффициента трения и минимальная его величина.

Согласно [17] уплотнения роторов должны удовлетворять двум главным условиям: обладать требуемой герметичностью и повышенной надежностью при заданных перепадах давления, частотах вращения, температурах и физических свойствах уплотняемой среды. Как правило, ТУ работают в режиме граничной или полужидкостной смазки и на расчетных режимах обеспечивают минимальную, капельную утечку. Вследствие этого зазор между кольцами должен быть очень маленьким, смазывающая пленка очень тонкой, а материалы поверхности уплотнения должны выдерживать трение друг об друга, причем зачастую при высоких скоростях и нагрузках. Поэтому материалы для поверхностей ТУ должны обладать низким коэффициентом трения, достаточной твердостью, хорошей устойчивостью к коррозии и высокой теплопроводностью. Допустимая неплоскостность контактных поверхностей не более 0,6 MKM

На работоспособность ТУ влияют конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы. Важнейшими из них являются свойства рабочей и окружающей сред, режимы работы, свойства материалов герметизируемого соединения и уплотнителя, допустимые пределы утечки, ресурс, общий срок эксплуатации, токсичность и химическая агрессивность сред.

Износ уплотнительных колец в подвижных соединениях, согласно [14], подразделяют на пять групп:1) адгезионный в результате воздействия сил, притягивающих трущиеся поверхности; 2) абразивный, возникающий в результате зацепления неровностей двух грубо обработанных поверхностей или при попадании в зазор инородных тел; абразивный износ в несколько десятков раз выше, чем адгезионный; 3) коррозионный, которому способствуют химические воздействия, в частности высокие температуры в уплотняемом зазоре; 4) поверхностный, вызываемый образованием в контактирующих поверхностях трещин, возникающих под действием термических напряжений и усталости; 5) струйный, который может возникать в результате эрозионного воздействия жидкостей и газов при высоких скоростях потока.

При этом в условиях эксплуатации может встречаться как один вид износа, так и их комбинации.

Согласно [14, 18, 19], ТУ могут работать в гидродинамическом, смешанном, граничном или полусухом режиме трения.

В [20] на основании многолетнего опыта для уплотнений рекомендуется изготавливать полированные поверхности с Ra = 0,015 – 0,5 мкм и неплоскостностью в 2 – 3 световых полосы. Средняя арифметическая высота шероховатости Ra (в мкм), полученная алмазным шлифованием или специальной полировкой, для каждого материала различна (табл. 2).

Таблица 2. Шероховатость поверхностей трения ко-

Материал	Ra, мкм	
Карбид вольфрама	0,015 – 0,03	
Металлические материалы	0,2 - 0,3	
Твердый уголь	0,3 - 0,4	
Керамика	0,35 – 0,5	

В качестве материалов ТУ в зависимости от условий эксплуатации предлагаются: пластмассы, антифрикционные материалы на основе углерода, металлы (чугуны, стали, сплавы цветных металлов), твердые сплавы и др.

Нанесение приработочных покрытий повышает надежность пар в наиболее опасный период работы – во время приработки. Применение этих пар ограничивается скоростями скольжения. Высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкции, тщательная приработка, улучшение условий смазывания значительно расширяют область применения пар трения из твердых материалов.

В качестве материалов покрытий используют высокопрочные нержавеющие стали и сплавы, жаропрочные никелевые сплавы и др. В связи с этим возникает необходимость в проведении исследований, направленных на повышение износостойкости рабочих торцовых поверхностей ТИУ, изготавливаемых не только из материалов, которые широко используются в химическом и нефтяном машиностроении, например нержавеющие стали высоко легированные хромом и никелем (07Х16Н6, 12Х18Н9Т и др.), а и выше отмеченных материалов, например никелевого сплава ЭK61 (ХН58МБЮД) или из бериллиевой бронзы БрБ2.

Таким образом, анализ литературных источников показал: 1) выбор конструкции ТУ и материала колец центробежных насосов определяются физико-химическими свойствами среды, давлением, температурой, вязкостью, содержанием взвешенных твердых частиц и солей, химической агрессивностью, воспламеняемостью (при нагреве в контакте с атмосферой), степенью опасности воздействия на людей и окружающую среду; 2) учитывая то, что при нормальной работе ТИУ торцевые поверхности колец контактируют очень непродолжительное время, только в момент пуска и останова машины, нет необходимости изготавливать кольца полностью из дефицитных, дорогостоящих и труднообрабатываемых материалов, достаточно только обеспечить износостойкость их рабочих поверхностей путем нанесения износостойких покрытий; 3) надежность и долговечность ТИУ можно повысить за счет повышения износостойкости уплотнительных поверхностей вторичного металлического уплотнения, путем введения

> Компрессорное и энергетическое машиностроение №3 (53) сентябрь 2018

Повышение качества рабочих поверхностей ИТУ технологическими методами

Несмотря на существенное многообразие условий работы деталей в узле трения, наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Вследствие этого реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя (микро и макрогеометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями).

В [21] определено влияние текстурирования на увеличение выносливости образцов, изготовленных из инструментальной стали, при фреттинг-коррозии.

Если поверхности уплотнения изготавливаются из материала с закрытыми порами, поверхности уплотнения обладают достаточной текстурой (являются текстурированными). Преимущество пористых колец уплотнения состоит в том, что поверхность остается текстурированной, даже когда кольца изнашиваются.

Учитывая то, что при ЭЭЛ в структуре поверхностных слоев, как правило, присутствуют микропоры [22], этот метод, кроме известных его достоинств, может представлять особый интерес при формировании упрочняющих покрытий колец ТУ.

В [23] предложен способ создания на металлических поверхностях трения специального рельефа поверхности методом ЭЭЛ.

В [24, 25] описаны комбинированные методы текстурирования поверхностей колец ТУ методом ЭЭЛ и лазерной обработкой.

Перспективным путем повышения износостойкости колец ТИУ может быть формирование на рабочих торцовых поверхностях квазимногослойных покрытий, соединяющих в себе смазывающие и антиизносные свойства. Такими покрытиями могут быть комбинированные электроэрозионные покрытия (КЭП), сочетающие в себе твердые износостойкие и мягкие антифрикционные материалы [26, 27].

Наиболее предпочтительным является КЭП, где первый и последний слои из твердого сплава ВК8 наносятся при Wu = 0,2 Дж, а медь – 0,08 Дж. В этом случае толщина упрочненного слоя увеличивается до 30-40 мкм, микротвердость находится на уровне 8740 МПа, а сплошность составляет 100% [28].

В последние годы все большее применение находит способ цементации методом ЭЭЛ (ЦЭЭЛ) [29, 30].

В [31] исследовано влияние времени легирования на качественные параметры поверхностного слоя при ЦЭЭЛ на примере различных материалов: армко-железа, стали 12Х18Н10Т, сталей 30Х13 и 40Х. Использование метода ЦЭЭЛ, когда при ЭЭЛ в качестве электрода используют графит (углерод) обеспечивает: достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя; повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов; легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали; отсутствие объемного нагрева детали, а следовательно поводок и короблений.

Следует отметить, что ЦЭЭЛ, проведенная перед нанесением КЭП может служить резервом для увеличения глубины упрочненного слоя.

Среди методов нанесения износостойких покрытий широкое применение нашли технологии конденсированной ионной бомбардировки (КИБ). Технология КИБ основана на взаимодействии ионов и других энергетических частиц, полученных в низкотемпературной плазме, с поверхностью твердого тела [32].

Резервом повышения качества ТУ может быть применение композиционных материалов в плакированных стальных деталях. Использование плакирования деталей материалом с особыми свойствами, позволяет создавать конструкции необходимой прочности, надежности и долговечности [33].

Повысить износостойкость поверхностных рабочих слоев колец можно не только за счет нанесения специальных покрытий, а и путем применения упрочняющих технологий таких как: закалка токами высокой частоты (ТВЧ), азотирование, лазерная обработка, поверхностное пластическое деформирование (ППД) и др. [34].

Для повышения качества триботехнических соединений может быть использован комплексный метод, который бы включал в себя известные способы обработки, сочетая их достоинства, а во многих случаях превосходил бы их [35-37].

Согласно [38] ионно-плазменное азотирование в сравнении с газовым обеспечивает сокращение времени обработки в 5-10 раз, снижение хрупкости стали, сокращение использования рабочих газов в 20-100 раз; сокращение электроэнергии в 1,5-3 раза, исключение операции дипассивации; снижение деформации; улучшение санитарно-гигиенических условий производства.

На основании имеющихся в литературе аналитических зависимостей, которые описывают закономерности процесса азотирования и кинетики формирования отдельных фаз, разработанна методика азотирования в газовой атмосфере на примере легированных сталей 20ХЗМВФА, 20ХГНМ и титановых сплавов [39].

Согласно [40], применение карбонитрации для обработки деталей повышает усталостную прочность на 50-80%, резко увеличивает износостойкость по сравнению с цементацией, нитроцементацией, газовым азотированием, обеспечивает минимальные величины деформаций и минимальную точность деталей. Технология применима для любых марок сталей и чугуна.

Учитывая то, что вторичное уплотнение 9 (рис. 2) аксиально подвижного кольца 1, изготовлено за одно целое с кольцом 1, то в месте контакта поверхность 10 вторичного уплотнения и поверхность втулки 11, взаимно перемещаясь, подвергаются фреттинг коррозии.

Профессор Гаркунов Н.Д. утверждает, что если исходить из того, что взаимное перемещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует: а) уменьшить микроперемещения; б) снизить силы трения; в) сосредоточить скольжение в промежуточной среде. В нашем случае микроперемещения при нормальной работе уплотнения стабильны и достигают 0,004 мм.

Согласно [41], если при увеличении контактного давления амплитуда смещения остается постоянной, то повреждения усиливаются.

При сборке контактирующие поверхности деталей подвергаются упругому и пластическому деформированию. В [42] установлено, что чем меньше исходная твердость поверхностного слоя, тем больше интенсивность деформации и резервы к ее повышению. Следовательно, можно снизить контактное давление и повысить герметичность соединения, путем увеличения площади контакта, за счет снижения твердости и увеличения пластичности по крайней мере одной из контактирующих поверхностей.

Поверхностную твердость металла можно понизить, нанося на нее более мягкие материалы. В [43] предлагается способ увеличения герметичности и прочности контактирующих поверхностей неразъемных соединений термообработанных деталей, заключающийся в ЭЭЛ их поверхностей графитовым электродом. При ЭЭЛ термообработанных деталей под слоем повышенной твердости может появится зона отпуска. Слой повышенной твердости можно удалить, например, шлифованием. При ЭЭЛ графитовым электродом некоторых цветных сплавов, например, бериллиевой бронзы, зона отпуска начинается с поверхности.

Качество сопрягаемых деталей прессовых соединений можно повысить за счет изменения материала одной из контактирующих деталей на более мягкий или путем нанесения специальных покрытий [44 - 47].

С помощью покрытий можно обеспечить: прирабатываемость трущихся поверхностей; предотвращение задиров; смазывание в начальный момент до поступления масла к трущимся поверхностям; минимальный износ трущихся поверхностей; наиболее низкий коэффициент трения и минимальное изменение его в процессе работы; повышение контактной выносливости материалов узлов трения и др [48].

В настоящее время в промышленности остро стоит проблема создания многофункциональных износостойких покрытий для тяжелонагруженных пар трения, работающих в условиях высоких линейных скоростей и приложенных давлений, при недостаточном количестве смазки или при полном ее отсутствии [49].

В последние годы проводятся работы по созданию изделий, которые можно было бы использовать без внешней смазки. К этим изделиям применяют термин «самосмазывающиеся», поскольку при их эксплуатации не используется внешняя смазка, а применяются в основном композиционные материалы с дисульфидом молибдена (MoS₂). Формирование и исследование покрытий на основе дисульфида молибдена является одним из наиболее перспективных направлений в области создания твердосмазочных покрытий [50].

Способность проявлять эффект «самосмазывания», т.е. обеспечивать работоспособность узла трения скольжения без введения внешней смазки, является основной особенностью большинства используемых в узлах трения полимеров. Природа эффекта «самосмазывания» полимеров заключается в особенностях формирующегося на полимерных и металлических поверхностях так называемого «третьего тела», строение и состав которого и является своеобразным «смазывающим» слоем, обеспечивающим возможность передеформирования без абразивного изнашивания и заедания [51].

Известен способ сульфидирования, препятствующий схватыванию, который сводится к созданию на поверхности детали пленки сульфидов [52]. Последние повышают поверхностную активность металлов и сплавов, а также смачивание поверхностно активными веществами и сопротивление схватыванию. Пленка сульфида железа (FeS) повышает износостойкость трущихся поверхностей и улучшает их прирабатываемость. Ферросульфидное покрытие обладает довольно высокой пористостью и впитывает большое количество смазки, сообщая материалу свойство самосмазывания.

Традиционно сульфидирование – заключается в насыщении поверхностного слоя металла (стали, чугуна, сплавов титана и др.) серой в соответствующих соляных ваннах. Глубина сульфидированного слоя достигает 50 мкм. К недостаткам традиционного сульфидирования, кроме увеличения шероховатости поверхности и размеров детали, следует отнести: нагревание всей детали, а соответственно и структурные изменения металла; поводки и коробления; большая длительность процесса; большой расход электроэнергии; отрицательное воздействие на экологию и др. [53].

Известен способ, когда серу вводят в поверхность изделия способом электроискрового легирования (ЭИЛ), тоже, что и ЭЭЛ. Для внедрения серы ее наносят на поверхность в виде порошкообразного слоя – «напудривают», и через этот слой проводят легирование материалами детали или покрытия. В процессе обработки нанесение порошкообразной серы повторяют 2-3 раза [54].

Известен способ ЭИЛ сернистым железом сталей

45, X12Ф, серого и перлитного ковкого чугуна, который позволил сформировать на обрабатываемой поверхности слой, обогащенный серой толщиной 40-50 мкм [55].

Таким образом, в результате проведенных литературных и патентных исследований можно сделать следующие **выводы:**

1. Резервом снижения себестоимости ТИУ могут служить технологические методы, позволяющие создавать на подложках из сталей и сплавов композиционные материалы, типа «основа-покрытие», сочетающие в себе защитные свойства покрытий с механической прочностью основы.

2. Для повышения надежности и долговечности ТИУ необходимо на торцевых поверхностях колец сформировать специальные твердые износостойкие покрытия, а поверхности вторичных уплотнений защитить от фреттинг коррозии.

3. В зависимости от условий работы и перекачиваемой среды для повышения качества рабочих торцовых поверхностей ТИУ могут применяться следующие методы нанесения покрытий: ЭЭЛ, КИБ, гальваника и др., а также упрочнение поверхностных слоев, например, ИА, ЦЭЭЛ, ППД и т.п.

4. Толщину слоя повышенной твердости при формировании КЭП можно увеличить за счет предварительной обработки поверхностного слоя методом ЦЭЭЛ.

5. Для повышения герметичности и стойкости вторичных уплотнений от фреттинг-коррозии между контактирующими поверхностями вводят твердые или мягкие прослойки.

6. С целью предотвращения схватывания контактирующих поверхностей колец ТИУ при трении необходимо обрабатывать их методом сульфидирования.

7. Для достижения поставленной **цели** в работе необходимо решить следующие **задачи:**

- провести анализ технологии изготовления и особенностей эксплуатации ИТУ;
- разработать методику направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей колец ТИУ в зависимости от условий работы уплотнения и свойств окружающей среды;
- совершенствовать метод ЭЭЛ для осуществления процессов сульфидирования и сульфоцементирования энергоэффективными и экологически чистыми методами, альтернативными химико-термической обработке.
- разработать новый метод увеличения толщины слоя повышенной твердости путем формирования, на предварительно упрочненных методом ЦЭЭЛ торцевых поверхностях колец ТИУ, комбинированных электроэрозионных покрытий;
- разработать новый метод снижения фреттинг процесса для контактирующих поверхностей вторичного уплотнения ТИУ и защитной втулки»
- разработать технологическую оснастку для проведения исследований износостойкости рабочих торцевых поверхностей колец и вторичного уплотнения;
- установить корреляционные зависимости между режимами оборудования и качественными параметрами формируемых покрытий;
- внедрить результаты исследований в практику изготовления ИТУ центробежных насосов.

Литература:

1. Голубев А.И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.

2. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. М.: Машиностроение, 1980. 200с.

3. Zahorulko, A. Theoretical and experimental investigations of face buffer impulse seals with discrete supplying (2015) Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 4 (7), pp. 45-52. DOI: 10.15587/1729-

4061.2015.48298

4. Торцовое уплотнение с регулируемой утечкой: A.c. 446635 F 16 J 15/34 СССР, / К.В. Лисицын, В. А. Марцинковский, Н.В. Перидерий. Опубл. 22.06.74, Бюл. № 7.-2 с.

5. Торцовое уплотнение с регулируемой утечкой: A.c. 723277 F 16 J 15/34 СССР/ Н.В. Перидерий. Опубл. 25.03.80, Бюл. № 11.- 2 с.

6. Торцовое импульсное уплотнение А.с. 1645689F 16 Ј 15/34 СССР/ С.Т. Лапоног, А.Е. Чернов. Опубл. 30.04.91. Бюл. № 16.-2 с.

7. Торцовое уплотнение с регулируемой утечкой: A.c. 1016603 F 16 J 15/34 СССР/ В.В. Москаленко,. К.В. Лисицин, И.И. Скирдаченко, Б.Н. Перминов. Опубл. 07.05.83, Бюл. № 17.-2 с.

8. Патент Российской Федерации на изобретение № 2187727 С2. 7 F 16 J 15/34. Торцевое импульсное уплотнение. /Громыко Б.М.,Каторгин Б.И., Кириллов В.В., Колпаков А.В., Марцинковский В.А., Матвеев Е.М, Постников И.Д., Чернов А.Е., Степанова М.А./ Опубл. 20.08. 2002, Бюл. № 23.- с.

9. Москаленко В. В., Лисицын К. В., Марцинковский В. А. Характеристики и опыт эксплуатации импульсных торцовых уплотнений // Труды 6-й техн. конфер. «Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин».- Сумы.- 1991.- С. 41.

10. <u>Martsynkovskyy V.</u>, <u>Zahorulko A.</u>, <u>Gudkov S.</u>, <u>Mischenko S.</u> Analysis of buffer impulse seal // <u>Procedia</u> <u>Engineering</u>, Volume 39, 2012, pp. 43-50.DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.006.

11. Громыко Б. М., Колпаков А. В., Чернов А. Е. Опыт разработки импульсных торцовых уплотнений для быстроходных турбонасосов // Труды 9-й Междунар. конф. «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования».- Т.1.- Сумы.-1999.- С. 151-159.

12. Громыко Б.М., Матвеев Е.М., Постников И.Д., Митюков Ю.В., Михалев И.А., Сорокин В.А., Петренко Р.И. Опыт разработки и эксплуатации металлических уплотняющих элементов для работы в широком диапазоне температур и давлений / Там же С. 38-51.

13. А.С. Виноградов, Р.Р. Бадыков, Д.В. Анохин. Исследование работоспособности торцевых импульсных уплотнений со структурами обратного нагнетания // Вестник Самарского государственного университета. – Том 14, № 3. Ч, 2.- 2015.- С.365-374.

14. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б Овандер и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. - М: Машиностроение, 1986.- 464 с.

15. Захаров Б.С., Захаров И.Б. Уплотнения нефтяных центробежных и поршневых насосов. - М: ОАО «ВНИЙОЭНГ», 2011.- 204 с.

16. Г.А. Голубев, Г.М. Кукин, Г.Е. Лазарев, А.В. Чичинадзе. Контактные уплотнения вращающихся валов..- М: Машиностроение, 1976. – 264с.

17. Марцинковский В.А. Динамика роторов центробежных машин: монография / В.А. Марцинковский.-Сумы: Сумский государственный университет, 2012.-563 с.

18. Нау Б.С. Экспериментальные наблюдения и анализ характеристик пленки механического уплотнения // Проблемы трения и смазки. - 1980.- Т. 102, № 2.-С. 16-22.

19. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. - М.: Машиностроение, 1982.-217 с.

20. Майер Э. Торцевые уплотнения: Пер. с нем.- М: Машиностроение, 1978.- 288 с.

21. Manabu Wakuda, Yukihiko Yamauchi, Shuzo Kanazaki, Yoshirteru Yasuda, 2003 Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact - Wear 254 (2003) 356-363.

22. Тарельник В.Б. Формирование поверхностей скольжения торцевых уплотнений различными методами / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Антошевский Б.//Сборник трудов в 3-х томах. Том 1. Материалы круглых столов форума.- Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012.- С. 217-225.

23. Патент України на винахід № 77906, В23Н1/00, 3/00, 5/00. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання /Марцинковский В.С./ Опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

24. Bogdan Antoszewski, Viacheslav Tarelnik, Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals// Applied Mechanics and Materials Vol. 630 (2014). – Trans Tech Publications, Switzerland. – P. 301-307.

25. Тарельник В.Б. Сучасні методи формоутворення поверхонь тертя деталей машин: Монографія /Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Антошевський Б.// Суми: Видавництво «МакДен»: рос. мов., 2012.-280 с.

26. А. с. 1734968 СССР, В 23 Н 9/00. Способ электроэрозионного легирования / В.Б. Тарельник, Е.А. Коломыцев, Л.А. Иванов, А.Г. Марченко, В.И. Тарадонов, В.Ф. Руденко, Ю.А. Серобабин, Г.Н. Анисимов.- опубл. 23.05.92, Бюл. № 19.

27. Способ электроэрозионного легирования поверхностей стальных деталей: Пат. 2524471. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; Опубл. 27.07.14, Бюл. № 21.-10 с.

28. Тарельник В. Б. Разработка технологии повышения качества поверхностных слоев импульсных торцовых уплотнений, работающих в различных средах, методом электроэрозионного легирования // Электронная обработка материалов.- 2000.- № 4.- С. 7-11.

29. Патент України на винахід № 82948, 23с 8/00. спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.

30. Патент України на винахід № 101715, 23н 9/00. спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братущак / опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.

31. В.Б. Тарельник, А.В. Білоус. Дослідження залежностей якісних параметрів поверхневих шарів від часу легування при електроерозійній цементації сталей. // Вісник Сумського національного аграрного університету.- Суми: СНАУ, 2008.- №2.- С. 119-124.

32. Дуб С. Н., Ковальчук А. Н., Глушкова Д.Б., Тарабанова В.П., Рыжков Ю. Н. Повышение износостойкости трущихся поверхностей пар трения // Вестник ХНАДУ. 2009. №46.

33. Аминов Дж Б. Получение и исследование композиционных материалов на основе алюминия методом порошковой металлургии / Дж Б Аминов, М.Б. Акрамов, Б. Аминов, Х. Маджидов // Доклады академии наук Республики Таджикистан, 2013. - т. 56.-№2.

34. Лещенко А.Н. Проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки плоских поверхностей деталей шарико-стержневым упрочнением / А.Н. Лещенко, С.А. Раздорский // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, № 2(53).- С. 200-203.

35. Колмыков Д.В. Комбинированные методы упрочнения / Д.В. Колмыков, А.Н.Гончаров // Вісник Сумського національного аграрного університету. 2012.-Випуск 6 (24).- С. 46-50.

36. Пономаренко И.В. О возможности применения дискретного упрочнения предварительно восстановленных гальваническими методами деталей для повышения их эксплуатационных свойств / И.В. Пономаренко // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. 2014.- Випуск 146.- С. 202-208. 37. Тарельник В.Б. Комбинированные технологии электроэрозионного легирования: монография / В.Б. Тарельник // К.: Техника, 1997.- 127 с.

38. Герасимов С.А. Газобарическое азотирование сталей [Текст] / С. А. Герасимов, В. А. Голиков, М. А. Пресс [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 6. – С. 7–9.

39. Михальский Й. Формирование однофазного слоя ү' - нитрида при контролируемом азотировании в газовой среде [Teкст] / Й. Михальский, Й. Тасиковский, П. Вах [та ін.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 11 (605). – С. 35–38.

40. С.Г. Цих, В.И. Гришин, В.Н. Лисицкий. Опыт применения карбонитрации стальных деталей и инструмента в машиностроении // Вестник МГТУ им. Носова. - 2008, №4.- С. 32-38.

41. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). – М.: «Издательство МСХА», 2001. – 616с.

42. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев комбинированным электроэрозионным легированием. - Сумы.- МакДен, 2002.- 324 с.

43. Спосіб обробки сполучених поверхонь деталей (варіанти): Пат. 66105. Україна. МПК В23Н 1/00 / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; Опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.-3 с.

44. Балацкий Л.Т. Прочность прессовых соединений. - К.: Техника, 1982.-152 с.

45. Способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных и/или чугунных деталей: Пат. 2410212. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Коноплянченко Е.В., Олейник И.А.; Опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.-7 с.

46. Способ изготовления неподвижного соединения типа вал-ступица стальных деталей (варианты): Пат. 2501986. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Братущак М.П., Опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.-14 с.

47. В. Т. Лебедь. Оптимизация технологии нанесе-

NICMAS

ния покрытий в соединениях крупногабаритных составных валков для повышения несущей способности / Лебедь В.Т., Кулаченко А. А. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ – Київ, 2008. – Вип. № 23. – С. 240–247.

48. Гинберг А.М., Иванов А.Ф. Износостойкие и антифрикционные покрытия. – М.: Машиностроение, 1982.-43 с.

49. P.H. Shipway, D.G. McCartney, T. Sudaprasert Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings // Wear. — Выпуск 259. — 2005. — c. 820-827.

50. М.А. Андреев, Л.В. Маркова, А.Н. Мойсейчик, В.В. Коледа. Ионно-лучевые покрытия на основе хрома с добавкой MoS₂ / Международная научно-техническая конференция полимерные композиты и трибология.-Гомель, Беларусь, 2011.-С. 32, 33.

51. А.П. Краснов, В.Н. Адериха, О.В. Афоничева, Н.Н. Тихонов, А.Е. Сорокин. Самосмазываемость «пленки переноса» и формирование третьего тела полимерами/ Международная научно-техническая конференция полимерные композиты и трибология.- Гомель, Беларусь, 2011.-С.11, 12.

52. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун.- Киев: Наук. думка, 1990.-264 с.

53. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/ Под общей редакцией Н.Е. Денисовой.- Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006.- 246 с.

54. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М. Машиностроение, 1976.- 46 с.

55. А.Г. Щербинский. Способ насыщения поверхностей металла серой. АС № 139336.- Опубл. в бюллетене изобретений № 13 за 1961г. С.2, 3.

Компримирование воздуха, технических и технологических газов



УКРАИНА, 400	20, г. Сумы, пр. Курский, 6
тел.:	+ 38 /0542/ 674-114
факс:	+38 /0542/ 674-179
e-mail:	info@nicmas.com
http:	www.nicmas.com

возьми

на вооружение



современное машиностроение, инжиниринг

- новые разработки
- высокая эффективность
- большой ресурс