

В. Б. Тарельник, д.т.н., проф.; Е. В. Коноплянченко, к.т.н., доц.; Т. П. Волошко, ст. преподаватель;
А. А. Бакулин, студент, И. А. Мельник, студент (СНАУ, г. Сумы, Украина)

Конструктивные и технологические способы повышения качества торцевых импульсных уплотнений

В статье представлен ряд технических решений (способов), направленных на повышение качества торцевых импульсных уплотнений (ТИУ), которые осуществляются на этапе конструкторской и технологической подготовки производства, путем наиболее рационального выбора и сочетания материалов колец в паре трения, а также формирования на их контактирующих поверхностях специальных износостойких покрытий.

Ключевые слова: способ, торцевое импульсное уплотнение, повышение качества, металлическое кольцо, вторичное уплотнение, покрытие, электроэрозионное легирование.

У статті представлений ряд технічних рішень (способів), спрямованих на підвищення якості торцевих імпульсних ущільнень (ТИУ), які здійснюються на етапі конструкторської й технологічної підготовки виробництва, шляхом найбільш раціонального вибору й сполучення матеріалів кілець у парі тертя, а також формування на їхніх контактуючих поверхнях спеціальних зносостійких покриттів.

Ключові слова: спосіб, торцеве імпульсне ущільнення, підвищення якості, металеве кільце, вторинне ущільнення, покриття, електроерозійне легування.

The article presents several technical solutions (methods), aimed at improving the quality of face impulse seals (FIS), which are carried out at the stage of design and technological preparation of production, by the most rational choice and combination of the rings materials in the friction pair, as well as the formation on their contact surfaces special wear-resistant coatings.

Key words: method, face impulse seal, quality improvement, metal ring, secondary seal, coating, electrospark alloying.

Постановка проблемы в общем виде

Создание надежных уплотнительных узлов, обеспечивающих герметичность в течение длительного времени в широком диапазоне температур и давлений, является одной из основных проблем, возникающих при проектировании машин и агрегатов.

Опыт эксплуатации динамического оборудования показывает, что две трети всех отказов роторных машин (центробежных насосов, компрессоров, турбодетандеров и др.) случается вследствие нарушения работоспособности уплотнений, которое происходит под действием давления, температуры, а так же химически активных компонентов уплотняемой рабочей среды, поэтому одним из наиболее ответственных узлов, обеспечивающих герметичность, например, компрессорного агрегата, а, следовательно, и его надежную, безопасную и безотказную работу, является узел уплотнения.

В зависимости от требований, предъявляемых к роторной машине, уплотнительные устройства должны обеспечивать полную герметизацию рабочей среды или существенно уменьшить ее утечку. При этом к уплотнениям предъявляются все более жесткие требования в отношении герметичности, долговечности, способности работать при высоких значениях технологических параметров (скорости, давления, температуре и др.).

Торцевые импульсные уплотнения (ТИУ) 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.

Кольца ТИУ представляют собой пару трения, выполняющую роль основного уплотнительного элемента, поэтому они изготавливаются из специальных материалов, выбираемых в зависимости от условий эксплуатации. Правильно выбранный материал колец обеспечивает надежную, безопасную и безотказную работу узла уплотнения, а, следовательно, и всего агрегата.

Непрерывное развитие и совершенствование техники сопровождается не только повышением режимных параметров машин и механизмов, но и появлением новых, более дешевых, однако не менее надежных композиционных материалов, сочетающих в себе защитные свойства покрытий с механической прочностью основы.

Исследования, направленные на поиск менее дефицитных, более дешевых и надежных материалов, используемых при изготовлении ТИУ, является актуальными и своевременными.

Анализ основных достижений и публикаций

Повышение качества ТИУ, их работоспособности в значительной степени зависит от анализа конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Важнейшими из них являются свойства рабочей и окружающей сред, режимы работы, свойства материалов герметизируемого соединения и уплотнителя, допустимые пределы утечки, ресурс, срок эксплуатации, токсичность и химическая агрессивность сред [1].

Торцевые уплотнения с импульсным уравниванием аксиально подвижного элемента имеет сравнительно недавнюю историю (1974 г.) [2]. Традиционная конструктивная схема ТИУ показана на рис. 2.

На рабочей поверхности аксиально подвижного



Рис. 1. Кольца торцевого импульсного уплотнения.

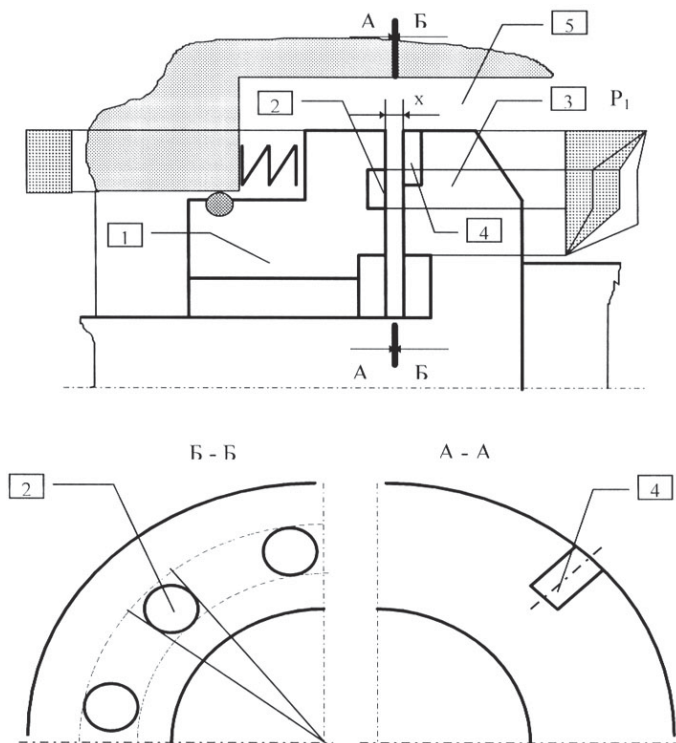


Рис. 2. Конструктивная схема торцевого импульсного уплотнения.

кольца (ползуна) 1 расположены замкнутые камеры 2, а на поверхности опорного диска 3 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 торцевой пары разделяются тонким слоем рабочей среды, толщина которого зависит от размеров камер и питающих каналов.

ТИУ на жидкостной смазке исследованы в широком диапазоне параметров (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 10^6 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 [3].

В [4] 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.

До последнего времени считалось, что ТИУ работают только в жидких средах. Однако проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что эти уплотнения работоспособны как в жидкостях, так и в газах. Были выполнены уникальные исследования импульсных уплотнений при сверхвысоких режимных параметрах $p_v > 400$ МПа·м/с в криогенной жидкости (жидкий азот, $t = -195$ °С), которые показали,

что такое уплотнение мало чувствительно к теплофизическим свойствам и температуре рабочей среды. Все это позволяет сделать вывод об универсальности ТИУ и большой практической ценности [5].

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 ограничено или невозможно, становится целесообразным применение металлических уплотнений, для которых практически нет ограничений, кроме прочности самого материала уплотнений и термостойкости материала покрытия [6].

В [7] предложена системы направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества поверхностного слоя колец ТУ на различных этапах их жизненного цикла. Предложена физически обоснованная математическая модель процесса износа поверхностей ТУ при трении, позволяющая по работе трения определять линейный и весовой износ поверхности, а также критерии выбора наиболее рационального метода упрочнения.

Согласно [8] выбор конструкции ТУ, в значительной степени определяется физико-химическими свойствами среды, ее агрегатным состоянием (газ, жидкость), 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.

Следует отметить, что при выборе конструкции ТУ существенную роль играет правильный выбор материала колец уплотнения и его механических и физических характеристик. При этом определяющую роль имеет выбор не самих материалов пар трения, а их сочетание.

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 [9].

Для каждого конкретного случая выбор наиболее подходящих материалов колец можно произвести только на основании тщательного сравнения условий их работы, исходных свойств материалов, а также изменений, какие у них происходят на поверхностях трения и т.п.

В [10] предложены некоторые правила сочетания материалов. Например, рекомендуется сочетать твердый материал с твердым (сочетание из азотированной, хромированной и закаленной сталей). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей. 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.

По нашему мнению, учитывая непродолжительность контакта торцов колец ТИУ, нет необходимости изготавливать их полностью из дефицитных дорогостоящих материалов, достаточно только обеспечить износостойкость рабочих поверхностей, нанеся на них износостойкое покрытие. Причем, изменяя химический состав покрытия, можно обеспечить работоспособность уплотнения с высокой коррозионной и химической активностью.

Система обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей колец ТИУ охватывает весь их жизненный цикл, включающий в себя подготовку производ-

ства, производство, эксплуатацию, ремонт и др.

Следовательно, качество ТИУ, в зависимости от требований эксплуатации, можно повысить на этапе конструкторской и технологической подготовки производства.

Таким образом, **целью работы** является повышение качества ТИУ на этапе конструкторской подготовки производства, путем наиболее рационального выбора и сочетания материалов колец в паре трения и технологической подготовки, за счет формирования рабочих поверхностей колец, нанесением на них износостойких покрытий.

Методика исследований

Для повышения качества ТИУ необходимо обеспечить требуемые свойства поверхностей в парах трения «кольцо подвижное – кольцо неподвижное»

ЭЭЛ производилось на установках «ЭИЛ-8А» (рис. 3). Режимы работы установки приведены в табл. 1.

Для проведения металлографических и дюрOMETрических исследований изготавливали шлифы. После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н, согласно ГОСТ 9450-76. Шероховатость поверхности измеряли на приборе профилографе – профилометре мод. 201 завода «Калибр».

Для исследования износостойкости колец ТИУ изготавливали прямоугольные образцы размером 15×15×8 мм из сплава ХН58МБЮД с комбинированным электроэрозионным покрытием



Рис. 3. Установка «ЭИЛВ - 8А».

(КЭП), сформированным в последовательности ВК8→ВК8→Cu и ВК8→ВК8→Ni и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с покрытием ВК8→Cu→ВК8.

Перед нанесением КЭП образцы подвергались цементации методом электроэрозионного легирования (ЦЭЭЛ), что позволяет увеличить их зону повышенной твердости.

Для экспресс-оценки величины линейного износа образцов с покрытием была изготовлена установка на базе сверлильного станка мод. 2М-112 (рис. 4). Образцы закрепляли в приспособлении, расположенном на столе станка, которое обеспечивало его самоустановку. Контрольным служил полый цилиндр (материал 4К-20 и углеродистый, $D_{нар.}=12$ мм; $d_{вн.}=4$ мм; $l=60$ мм), который закреплялся в шпинделе станка.

Линейный износ определялся методом искусственных баз по разности глубин отпечатков, нанесенных на приборе Виккерса и измеренных до и после проведения испытаний.

Время испытания образцов на один километр пути при 2500 об/мин шпинделя, устанавливаемое при помощи реле времени, составляло 16 мин. Испытания проводили в течение 320 мин при скорости скольжения 1 м/с и удельном давлении 4,0 МПа. Величина износа фиксировалась через каждые 64 мин.

Изложение основного материала исследований
В [11, 12] предложен новый узел ТИУ, работающий

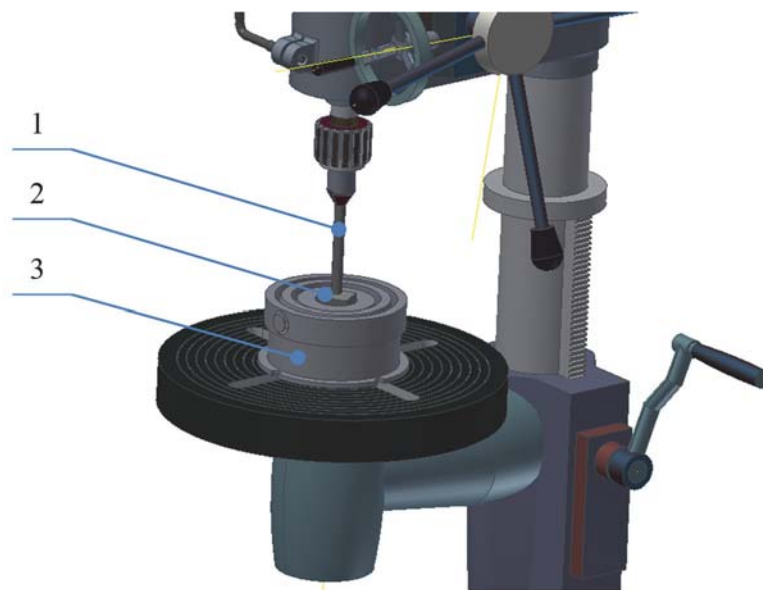


Рис. 4. Установка для определения линейного износа образцов при торцевом трении:

1 – полый цилиндр, 2 – прямоугольный образец, 3 – приспособление для самоустановки образца.

Таблица 1 – Режимы работы установки модели «ЭИЛВ - 8А»

Номер режима	Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$, В	Рабочий ток I_p , А		Энергия разряда W_p , Дж	
		$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ	$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ
1	16	0,2-0,4	1,0-1,4	0,01	0,02
2	23	0,3-0,5	1,4-1,6	0,02	0,05
3	30	0,5-0,6	1,6-2,0	0,04	0,08
4	37	0,6-0,7	1,8-2,0	0,06	0,12
5	47	0,7-0,8	2,0-2,2	0,10	0,20
6	57	0,8-0,9	2,2-2,4	0,15	0,30
7	67	0,9-1,0	2,4-2,7	0,20	0,40
8	77	1,0-1,2	2,6-2,8	0,27	0,55
9	87	1,1-1,3	2,6-3,5	0,34	0,68

в криогенных средах. Изобретение относится к области машиностроения, в частности к уплотнительной технике, а именно, к узлам ТИУ, и может быть использовано для уплотнения вращающихся валов насосов, турбин и компрессоров, работающих в криогенных средах.

Как правило, узлы ТИУ содержат установленное в корпусе аксиально-подвижное металлическое кольцо, которое снабжено вторичным уплотнением, герметизирующим полости с различными значениями давления.

В качестве вторичных уплотнений в этих конструкциях применяются, например, резиновые кольца или металлические сальфоны. Сальфонные уплотнители [см. например, патент Великобритании 1232082 НКИ F 2 В] обладают рядом недостатков, которые делают невозможным использование их в уплотнениях, разделяющих полости с большим перепадом давления. Резиновые уплотнители не могут быть применены в криогенных средах [см. например, авт. свид. СССР 101660, F 16 J 15/34, 1983 г.].

В [13] описан узел ТИУ для роторных машин, перекачивающих криогенные среды, способный 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 торцевой пары.

Известный узел ТИУ включает установленное в корпусе аксиально-подвижное подпружиненное металлическое кольцо, снабженное вторичным уплотнением. При этом вторичное уплотнение выполнено за одно целое с аксиально-подвижным кольцом, расположено с его тыльной стороны и представляет собой профилированный конический ус с торцевой контактной поверхностью, имеющей покрытие из мягкого материала. Упругий профилированный конический ус выполнен в виде тонкостенной оболочки с утолщением в месте соединения с аксиально-подвижным металлическим кольцом. При сборке уплотнительного узла торцовая поверхность уса с натягом (от 0,02 до 0,07 мм) устанавливается на втулку. Учитывая то, что вторичное уплотнение аксиально подвижного кольца, изготовлено за одно целое с кольцом, то в месте контакта поверхность вторичного уплотнения и поверхность уплотнительной втулки, взаимно перемещаясь, подвергаются фреттинг коррозии.

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 скопление в промежуточной среде. В нашем случае микроперемещения при нормальной работе уплотнения стабильны и достигают 0,004 мм. Однако если при увеличении контактного давления амплитуда смещения остается постоянной, то повреждения усиливаются [10].

Следовательно, существует задача обеспечения надежности и герметичности соединения торцевой уплотнительной поверхности вторичного уплотнения в месте контакта с уплотнительной поверхностью втулки.

Поставленная техническая задача решается созданием узла ТИУ, в котором, в соответствии с предлагаемым техническим решением, поверхность вторичного уплотнения (уса) контактирует с поверхностью втулки из фторопласта Ф-4 (ГОСТ 10007-80), неподвижно установленной на уплотнительную втулку. Выбор материала установленной втулки обусловлен рядом требований к уплотнительному узлу: большой химической стойкостью к агрессивным средам (чистыми концентрированными кислотами, щелочами, сильными окислителями, восстановителями и растворителями), высокой термостойкостью, биологической инертностью и низкими адгезионными свойствами. Материал Ф-4 не взрывоопасен и не горюч, работоспособен в широком интервале температур (от -269 до +260 °С), обладает высокими гидрофоб-

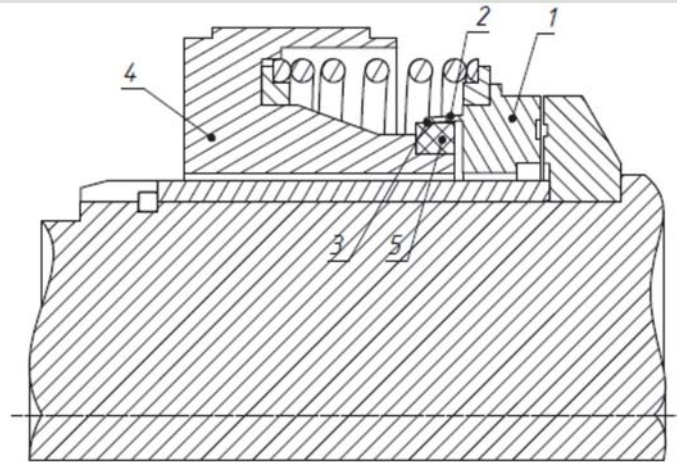


Рис. 5. Новая конструкция торцевого импульсного уплотнения.

ными и диэлектрическими свойствами.

При этом вторичное уплотнение изготовлено из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, а его поверхность, контактирующая с кольцом из фторопласта Ф-4, имеет покрытие из меди или никеля для сплава ХН58МБЮД и меди, обработанной графитовым электродом, для бериллиевой бронзы. При этом значительно улучшаются трибологические свойства пары трения, что гарантирует надежность и герметичность соединения торцевой уплотнительной поверхности вторичного уплотнения в месте контакта с уплотнительной поверхностью втулки, а значит, и надежность всего уплотнительного узла.

На рис. 5 представлена схема новой конструкции ТИУ. Аксиально-подвижное подпружиненное металлическое кольцо 1, снабженное вторичным уплотнением 2, расположено с его тыльной стороны и представляет собой профилированный конический ус с торцевой контактной поверхностью, причем, упругий профилированный конический ус вторичного уплотнения 2 выполнен в виде тонкостенной оболочки из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, а контактная поверхность 3 уса имеет покрытие из мягкого материала, например, из меди или никеля для сплава ХН58МБЮД и меди или обработанной графитом для бериллиевой бронзы, при этом на уплотнительной втулке 4 неподвижно закреплена втулка 5 из фторопласта марки Ф-4.

В процессе работы уплотнительная контактная поверхность 3 вторичного уплотнения 2, изготовленного из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, контактирует с уплотнительной поверхностью втулки 5 из фторопласта Ф-4, что значительно улучшит трибологические свойства пары трения.

Несмотря на то, что фторопласт Ф-4 обладает рядом положительных свойств, отмеченных выше, он имеет и ряд недостатков: низкая радиационная стойкость; недостаточные твердость и стойкость к истиранию; токсичность при нагреве до высоких температур; хладотекучесть – пластическая (необратимая) деформация материала даже при комнатной температуре под действием собственного веса и небольших напряжений. С повышением температуры деформация увеличивается; сложность изготовления высокоточных деталей [14]. Следовательно, существует задача обеспечения надежности и герметичности соединения торцевой уплотнительной поверхности вторичного уплотнения в месте контакта с уплотнительной поверхностью кольца из фторопласта Ф-4.

Поставленная техническая задача решается созданием узла импульсного торцевого уплотнения для роторных машин, перекачивающих криогенные среды, в котором между вторичным уплотнением и уплотнительной

втулкой расположена втулка из бериллиевой бронзы БрБ2 или никелевого сплава ХН58МБЮД, если вторичное уплотнение изготовлено, соответственно, из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2. При этом втулка из бериллиевой бронзы БрБ2 или сплава ХН58МБЮД, представляет собой кольцо, неподвижно закрепленное на уплотнительной втулке.

Следует отметить, что коэффициент трения бронзы по стали без смазки составляет 0,1. В процессе работы уплотнительная контактная поверхность вторичного уплотнения, изготовленного из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, контактирует с уплотнительной поверхностью втулки из, соответственно, бериллиевой бронзы БрБ2 или сплава ХН58МБЮД, что значительно улучшит механические и трибологические свойства пары трения, а следовательно, повысит надежность и долговечность уплотнительного узла в целом.

Поставленную выше техническую задачу можно решить и другим способом - созданием узла ТИУ для машин, перекачивающих криогенные среды, но в котором, в соответствии с заявляемым техническим решением, аксиально-подвижному кольцу с вторичным уплотнением из бериллиевой бронзы БрБ2 соответствует опорное металлическое кольцо и уплотнительная втулка из сплава ХН58МБЮД или аксиально-подвижному кольцу с вторичным уплотнением из никелевого сплава ХН58МБЮД соответствует опорное металлическое кольцо и уплотнительная втулка из бериллиевой бронзы БрБ2, а мягким антифрикционным покрытием на контактирующих уплотняющих поверхностях аксиально-подвижного кольца, вторичного уплотнения, опорного кольца и уплотняющей втулки из никелевого сплава ХН58МБЮД является покрытие из индия. То есть, узел содержит аксиально-подвижное кольцо и вторичное уплотнение, выполненные из одного и того же материала. При этом данный узел содержит опорное кольцо и уплотнительную втулку, которые, в свою очередь, также выполнены из одного и того же материала. В данном случае, как и в предыдущем, коэффициент трения бронзы по стали без смазки составляет 0,1.

В [15] показано положительное влияние покрытий из антифрикционного металла - индия на снижение фреттинг-износа контактирующих поверхностей деталей. Индий - мягкий, гибкий и пластичный металл, сохраняющий свои свойства при криогенных температурах и, таким образом, является наиболее перспективным материалом покрытия для снижения фреттинг-износа и улучшения герметичности соединения в ТИУ.

На рис. 6 схематически представлена конструкция заявляемого узла импульсного торцевого уплотнения для турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей.

Узел включает в себя аксиально-подвижное упругое

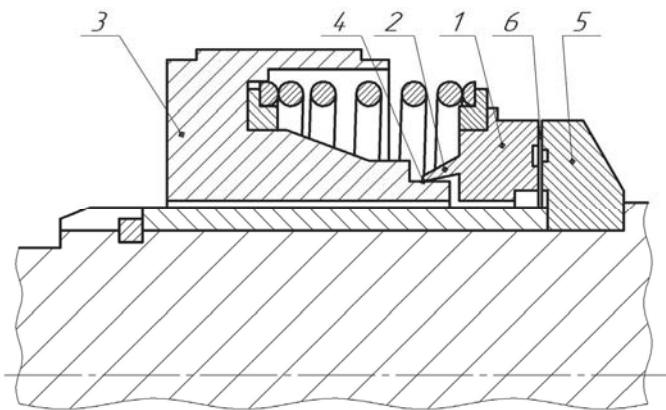


Рис. 6. Конструкция узла импульсного торцевого уплотнения для турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей.

кольцо 1 с вторичным уплотнением 2 и уплотнительную втулку 3. Вторичное уплотнение 2 расположено с тыльной стороны аксиально-подвижного кольца 1 и является профилированным коническим усом с торцевой контактирующей уплотняющей поверхностью 4. Кроме того, узел включает опорное кольцо 5, жестко закрепленное на валу. Причем, если аксиально-подвижное кольцо и упругий профилированный конический ус вторичного уплотнения 2 выполнены в виде тонкостенной оболочки из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, то уплотнительная втулка 3 и опорное кольцо 5, соответственно, выполнены из бериллиевой бронзы БрБ2 или сплава ХН58МБЮД. Контактующие уплотняющие поверхности указанных элементов узла из сплава ХН58МБЮД покрыты индием. При этом покрытие из индия предварительно нанесено на контактирующие уплотняющие поверхности аксиально-подвижного кольца 1 и вторичного уплотнения 2 путем погружения в расплав индия, а на соответствующие поверхности уплотнительной втулки 3 и опорного кольца 5 - методом ЭАЛ при энергии разряда $W_p = 0,01-0,02$ Дж.

В процессе работы уплотняющая поверхность 4 вторичного уплотнения 2, изготовленного из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2, контактирует с уплотняющей поверхностью втулки 3, изготовленной, соответственно, из бериллиевой бронзы БрБ2 или сплава ХН58МБЮД, а торцевая уплотняющая поверхность опорного кольца 5, изготовленного из бериллиевой бронзы БрБ2 или сплава ХН58МБЮД, контактирует с примыкающей к ней уплотняющей поверхностью аксиально-подвижного кольца 1, соответственно, изготовленного из сплава ХН58МБЮД или из бериллиевой бронзы БрБ2, то есть в обоих случаях контактируют разноименные материалы, что значительно улучшает механические и трибологические свойства пары трения, и таким образом повышает надежность и долговечность узла уплотнения в целом. На контактирующие уплотняющие поверхности аксиально-подвижного кольца 1 и вторичного уплотнения 2, изготовленных из сплава ХН58МБЮД, индий предварительно наносит погружением в его расплав, а на контактирующие уплотняющие поверхности втулки 3, и опорного кольца 5, изготовленных из сплава ХН58МБЮД, индий наносит методом электроэрозионного легирования при энергии разряда $W_p=0,01-0,02$ Дж.

Перспективным путем повышения износостойкости колец ТИУ является формирование на рабочих торцевых поверхностях методом ЭАЛ квазимногослойных комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), совмещающих в себе смазывающие и антиизносные свойства. Такими покрытиями являются КЭП, включающие в себя твердые износостойкие и мягкие антифрикционные материалы.

Наиболее предпочтительным является КЭП, где первый и последний слой из твердого сплава ВК8 наносятся при $W_u=0,2$ Дж, а медь - 0,08 Дж, когда микротвердость находится на уровне 8740 МПа, а сплошность составляет 100%. Однако толщина формируемого при этом покрытия (30-40 мкм) недостаточна для большинства колец торцевых уплотнений.

С целью повышения износостойкости надежности и долговечности стальных колец ТИУ, предложен новый способ, включающий, как и прототип, нанесение на них квазимногослойных КЭП состава, формируемого в последовательности ВК8+Cu+ВК8, а перед нанесением КЭП рабочие поверхности колец подвергают ЦЭАЛ при энергии разряда в диапазоне 0,05...4,6 Дж. В результате толщина слоя повышенной твердости увеличивается на глубину цементированного слоя.

Применение нового способа позволяет, изменяя величину энергии разряда при осуществлении операции ЦЭАЛ в диапазоне 0,05...6,8 Дж, формировать слои ра-

бочих поверхностей стальных колец импульсных торцовых уплотнений повышенной твердости толщиной от 4-5 до 320-350 мкм [16, 17].

Следует отметить, что КЭП на образцах из никелевого сплава ХН58МБЮД, сформированные в последовательности ВК8 → Cu → ВК8, не обеспечивают желаемой микротвердости в поверхностном слое.

С целью обеспечения в поверхностных слоях колец ТИУ из никелевого сплава ХН58МБЮД требуемых триботехнических и механических свойств предложен новый способ, который включает предварительную обработку поверхности ЦЭАЛ, а затем нанесение КЭП формируемого в последовательности ВК8→ВК8→Cu или ВК8→ВК8→Ni [18, 19].

Таким образом, металлографические исследования КЭП показали, что для колец ТИУ, изготовленных из стали 12Х18Н10Т наиболее предпочтительным является покрытие состава ВК8+Cu+ВК8, сформированное на предварительно ЦЭАЛ подложках, когда микротвердость поверхностного слоя находится на достаточно высоком уровне, соответственно 9600, 8950 и 9700 МПа, шероховатость низкая ($Ra=0,5$ мкм), микротвердость от максимальной на поверхности плавно снижается по мере углубления до твердости основного металла. При

упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД к практическому применению рекомендуются КЭП, состава ВК8+ВК8+Cu и ВК8+ВК8+Ni, сформированные на предварительно легированных углеродом поверхности и имеющих низкую шероховатость ($Ra=0,8-1,0$ мм), высокую микротвердость (9270 и 9850 МПа соответственно) и 100% -ю сплошность.

На рис. 7, а показаны результаты исследований износостойкости прямоугольных образцов размером 15×15×8 мм из сплава ХН58МБЮД с КЭП, состава ЦЭАЛ→ВК8+ВК8+Cu и ЦЭАЛ→ВК8+ВК8+Ni и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с покрытием ЦЭАЛ→ВК8+Cu+ВК8 (рис. 7, б) в условиях сухого трения в паре с инденторами из фторопласта 4К-20 и углеграфита.

Для никелевого сплава ХН58МБЮД КЭП состава ВК8+ВК8+Cu обладают лучшей износостойкостью по сравнению с покрытиями состава ВК8+ВК8+Ni. Как с индентором из фторопласта 4К-20, так и для углеграфита износ после 320 мин испытаний составляет, соответственно 1,5 и 3,1 мкм, а для КЭП состава ВК8+ВК8+Ni, соответственно 2,7 и 3,7 мкм. При этом износ образцов без покрытия составляет, соответственно 4,8 и 5,9 мкм. Следует отметить, что наиболее интенсивное изнашивание происходит в начале процесса, затем износ значительно замедляется и после ~2 часов испытаний становится сравнительно незначительным и относительно стабильным по величине.

Износ образцов из стали 12Х18Н10Т с КЭП состава ЦЭАЛ→ВК8+Cu+ВК8 в паре с инденторами из фторопласта 4К-20 и углеграфита после 320 мин испытаний составил, соответственно, 1,2 и 2,1 мкм, а для образцов без покрытия, соответственно, 3,7 и 4,6 мкм. Характер процесса изнашивания образцов аналогичен износу образцов из никелевого сплава. Вначале процесса происходит наиболее интенсивное изнашивание, которое постепенно замедляется и после 2 часов испытаний становится относительно стабильным. При этом, как для никелевого сплава, так и для стали 12Х18Н10Т характер износа образцов в первом приближении напоминает экспоненциально возрастающую зависимость.

Выводы:

1. В результате проведенных исследований получен ряд технических решений (способов), направленных на повышение качества торцевых импульсных уплотнений (ТИУ), которые осуществляются на этапе конструкторской и технологической подготовки производства, путем наиболее рационального выбора и сочетания материалов колец в паре трения, а также формирования на их контактирующих поверхностях специальных износостойких покрытий.

2. С целью снижения фреттинг-коррозии, в процессе работы ТИУ, уплотнительная контактная поверхность вторичного уплотне-

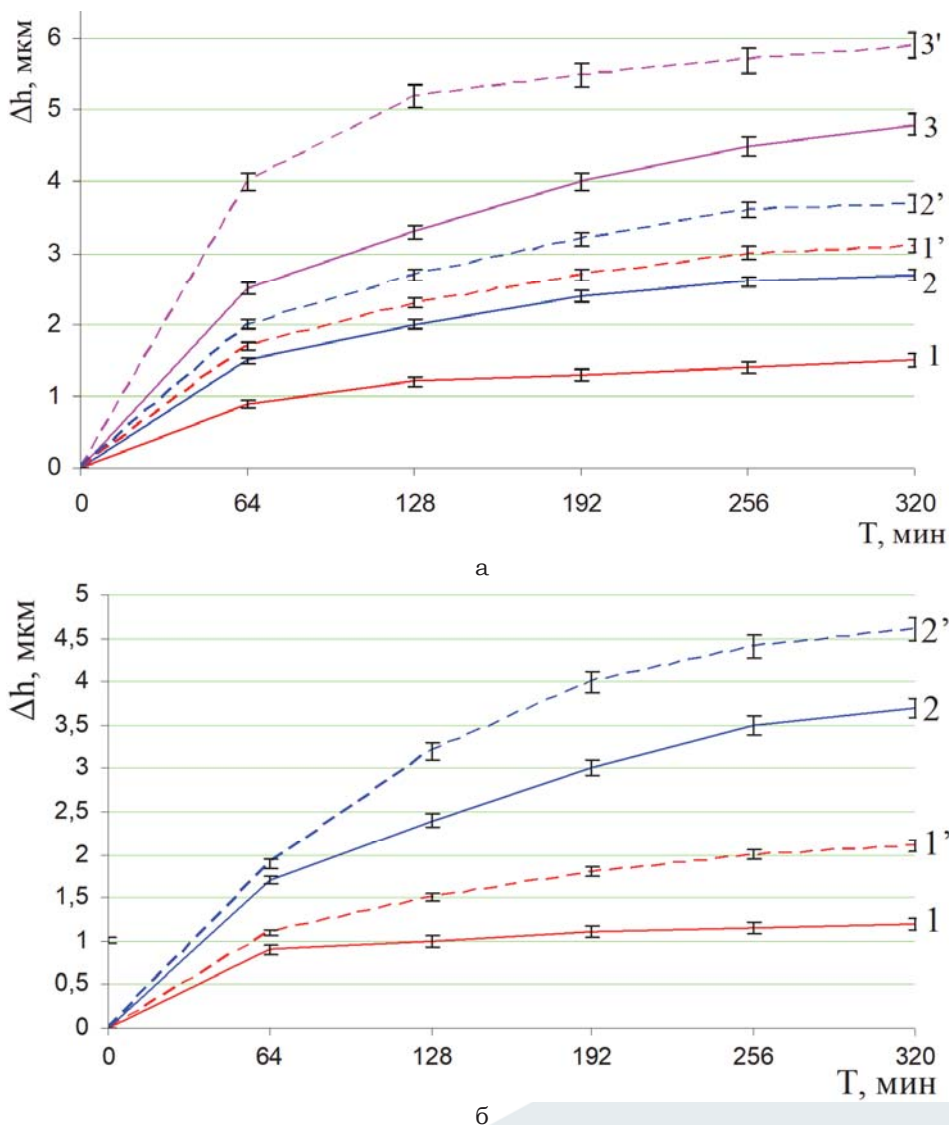


Рис. 7. Линейный износ образцов:
 а - из сплава ХН58МБЮД с КЭП: ЦЭАЛ→ВК8+ВК8+Cu (1 и 1'), ЦЭАЛ→ВК8+ВК8+Ni (2 и 2') и без покрытия (3 и 3') в паре с индентором из фторопласта 4К-20 (1, 2 и 3) и углеграфита (1', 2' и 3');
 б - из стали 12Х18Н10Т с КЭП: ЦЭАЛ→ВК8 + Cu + ВК8 (1 и 1') и без покрытия (2 и 2'), соответственно с инденторами из фторопласта 4К-20 и углеграфита.

ния, имеющая покрытие из меди или никеля для сплава ХН58МБЮД и меди, обработанной графитовым электродом, для бериллиевой бронзы БрБ2, контактирует с уплотнительной поверхностью втулки из фторопласта Ф-4, неподвижно установленной на уплотнительную втулку. При этом значительно улучшаются трибологические свойства пары трения, что гарантирует надежность и герметичность соединения, а значит, и надежность работы всего уплотнительного узла.

3. С целью обеспечения надежности и герметичности соединения:

- между вторичным уплотнением и уплотнительной втулкой вместо втулки из фторопласта Ф-4 устанавливается втулка из бериллиевой бронзы БрБ2 или никелевого сплава ХН58МБЮД, если вторичное уплотнение изготовлено, соответственно, из сплава ХН58МБЮД или бериллиевой бронзы БрБ2;
- при контакте поверхности вторичного уплотнения и втулки, а также торцевых поверхностей опорного кольца и аксиально-подвижного кольца используются равноименные материалы, из сплавов ХН58МБЮД и БрБ2,
- на контактирующие уплотняющие поверхности аксиально-подвижного кольца и вторичного уплотнения, изготовленных из сплава ХН58МБЮД, индий предварительно наносят погружением в его расплав, а на контактирующие уплотняющие поверхности втулки, и опорного кольца, изготовленных из сплава ХН58МБЮД, индий наносят методом электроэрозионного легирования при энергии разряда $W_p=0,01-0,02$ Дж.

4. С целью повышения износостойкости надежности и долговечности стальных колец ТИУ, предложен новый способ, включающий нанесение на них квазимногослойных КЭП состава, формируемого в последовательности $VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8$, при этом, перед нанесением КЭП рабочие поверхности колец подвергаются ЦЭАЛ.

5. С целью обеспечения в поверхностных слоях колец ТИУ из никелевого сплава ХН58МБЮД требуемых триботехнических и механических свойств предложен новый способ, который включает предварительную обработку поверхности ЦЭАЛ, а затем нанесение КЭП формируемого в последовательности $VK8 \rightarrow VK8 \rightarrow Cu$ или $VK8 \rightarrow VK8 \rightarrow Ni$.

Литература:

1. Марцинковский В.А. Динамика роторов центробежных машин: монография / В.А. Марцинковский. – Сумы: Сумский государственный университет, 2012.- 563 с.
2. Торцовое уплотнение с регулируемой утечкой: А.с. 446635 F 16 J 15/34 СССР, /К.В. Лисицын, В. А. Марцинковский, Н.В. Перидерий. Оpubл. 22.06.74, Бюл. № 7.- 2 с.
3. 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.
4. Martsynkovskyy V., Zahorulko A., Gudkov S., Mischenko S. Analysis of buffer impulse seal // Procedia Engineering, Volume 39, 2012, pp. 43-50. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.006.
5. Громыко Б. М., Колпаков А. В., Чернов А. Е. Опыт разработки импульсных торцовых уплотнений для быстроходных турбонасосов // Труды 9-й Международ. конф. «Герметичность, виброндежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования».- Т.1.- Сумы.-1999.- С. 151-159.
6. 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 // Труды 9-й Международ. конф. «Герметичность, виброндежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования».- Т.1.- Сумы.-1999.- С. 38-51.

7. Жуков А.Н. Направленный выбор технологии и установление критериев оценки наиболее рационального метода упрочнения колец торцевых уплотнений / А.Н. Жуков // Компрессорное и энергетическое машиностроение.- №1(47).- 2017.- С. 15-20.

8. 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.

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

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

11. Тарельник В.Б. Узел торцового импульсного уплотнения / Пат. 170279. Российская Федерация. МПК F16J 15/34 // В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, А.В. Белоус, А.Н. Жуков, Чеслав Кундера.- Оpubл. 19.04.2017.- Бюл. № 11.-Зс.

12. Тарельник В.Б. Узел торцового импульсного уплотнения / Патент на корисну модель № 114075. Україна.- МПК F16J 15/34 // В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, А.В. Белоус, О.М. Жуков, Чеслав Кундера.- Оpubл. 27.02.2017.- Бюл. № 4.- Зс.

13. Патент Российской Федерации на изобретение № 2187727 С2. 7 F 16 J 15/34. Торцовое 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./ Оpubл. 20.08. 2002, Бюл. № 23.- с.

14. К. Джурицкий. Отечественные КМПП с предельной частотой 18 ГГц. Материалы, Конструкции, Технологии Электроника №2.- 2014.- С.162-170.

15. Тарельник В.Б. Повышение надежности и долговечности металлических импульсных торцовых уплотнений. Часть 3 / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, А.Н. Жуков // Химическое и нефтегазовое машиностроение.-№6/2017.- С. 23-26.

16. Пат. 114671 Україна, МПК F16J 15/16. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, А. Н. Жуков. – Оpubл. 10.07.2017, Бюл. № 13. – 11 с.

17. Пат. 2631439 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец импульсных торцевых уплотнений / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков. – Оpubл. 22.09.2017, Бюл. № 27. – 3 с.

18. Пат. 121847 Україна, МПК (2017.01) F16J 15/16 (2006.01) F16J 15/34 (2006.01) В23Н 9/00 С23С 8/00 С23С 28/00. Спосіб обробки торцевої поверхні кілець з жароміцного сплаву імпульсного торцевого ущільнення, що працює в криогенних середовищах / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков. – Оpubл. 26.12.2017, Бюл. № 24. – 5 с.

19. Пат. 2648425 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ повышения износостойкости торцовых поверхностей колец из жаропрочных сплавов импульсного торцового уплотнения (ИТУ), работающего в криогенных средах (варианты) / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков. – Оpubл. 26.03.2018, Бюл. № 9. – 6 с.