

В.Б. Тарельник

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ, МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Дочернее научно-производственное предприятие «Никмас-Ротор»,
пр. Курский, 6, г. Сумы, 244609, Украина*

Введение

В высокооборотных насосах и компрессорах большого давления широкое применение нашли торцевые уплотнения бесконтактного типа [1]. Наличие в торцовой паре гарантированного зазора величиной 0,003–0,004 мм приводит к тому, что уплотняющие поверхности колец почти не изнашиваются и уплотнения могут работать практически неограниченно долго.

Несмотря на отсутствие контакта торцов во время работы, уплотнительные кольца целиком изготавливаются из износостойких материалов, таких как карбид вольфрама (WC), карбид кремния (SiC), различные виды графитов. Стоимость колец из этих материалов достигает сотен и тысяч долларов США, что обуславливает высокую стоимость уплотнительных узлов в целом.

При нормальной работе уплотнения торцевые поверхности колец контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и остановки машины. Поэтому, по нашему мнению, нет необходимости изготавливать кольца полностью из дефицитных дорогостоящих материалов, достаточно только обеспечить износостойкость рабочих поверхностей путем нанесения на них износостойких покрытий.

Особенности работы импульсных торцевых уплотнений

Характерной особенностью импульсного уплотнения является то, что микрозазоры в паре трения достигаются за счет микрогеометрии торцовых поясков, то есть размеры 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. В связи с этим уплотнения импульсного типа имеют следующие достоинства: простоту в изготовлении, монтаже и эксплуатации; низкую чувствительность к погрешностям изготовления колец торцовой пары; широкий диапазон уплотняемых давлений и скоростей вращения ротора; работоспособность даже при наличии некоторого износа торцовой пары и др.

Импульсные уплотнения 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 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 [2].

До последнего времени считалось, что импульсные уплотнения 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 $p \nu > 400$ 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 [3]. Все это позволяет сделать вывод об универсальности импульсных уплотнений и большой практической ценности.

Традиционно кольца импульсных торцевых уплотнений изготавливались из силицированных графитов, что накладывало определенные ограничения на область применения уплотнения, скорость скольжения и величину уплотняемого давления. Эти материалы довольно дороги и имеют низкую ударную прочность, подвержены растрескиванию под действием силовых и тепловых нагрузок.

Расширение области применения импульсных уплотнений в сторону повышения режимных параметров потребовало использования новых материалов в паре трения. Применение композиционных материалов типа «основа – покрытие», сочетающих защитные свойства покрытий с механической прочностью основы, является перспективным путем повышения износостойкости колец импульсных торцевых уплотнений.

Электроэрозионное легирование (ЭЭЛ) колец импульсных торцевых уплотнений

С целью отработки технологии нанесения и химического состава покрытий уплотнительных колец были выполнены обширные экспериментальные исследования по послойному легированию сталей и сплавов различного состава электродами из тугоплавких металлов и их карбидов, а также электродами из легкоплавких металлов [4].

Было установлено, что при нанесении первоначально в качестве технологического покрытия одного из легкоплавких металлов (In, Sn, Cd, Pb) с последующим нанесением основного покрытия из износостойкого тугоплавкого металла наблюдается резкое снижение шероховатости поверхности до $Ra = 0,54-0,91$ мкм. Одновременно повышается износостойкость. Однако опыт показал, что несмотря на повышение износостойкости микротвердость таких покрытий недостаточно высока, поэтому был предложен новый способ ЭЭЛ, целью которого являлось повышение микротвердости, износостойкости и шероховатости поверхности упрочняемых деталей. Поставленная цель достигается тем, что сначала наносят слой покрытия антифрикционным металлом медью, а затем слой из износостойкого высокотвердого металла или его карбида, выбираемого из группы Ti, V, W.

Металлографические исследования ЭЭЛ слоев покрытий по предлагаемому способу показывают, что их микротвердость находится на сравнительно высоком уровне (8400–12300) МПа. Причем сверху покрытия находится пленка толщиной 1–3 мкм. Все покрытия, сформированные предлагаемым способом, имеют характерный желтый цвет. Наличие меди как на поверхности, так и по всей толщине покрытия подтверждается рентгеноструктурным анализом [5].

Недостатком таких покрытий является малая толщина (15–25 мкм) и отсутствие 100% сплошности.

С целью расширения области применения, а также улучшения качественных характеристик формируемых поверхностных слоев нами были предложены квазимногослойные комбинированные покрытия (КЭП), формируемые в последовательности ВК8 → C_u → ВК8.

Наиболее предпочтительным является КЭП, у которого первый и последний слои из твердого сплава ВК8 наносились при токе короткого замыкания $J_{кз} = 2,0-2,2$ А; напряжении холостого хода $U_{xx} = 68,7$ В; емкости накопительного конденсатора $C = 300$ мкФ, а промежуточный – из меди при ($J_{кз} = 1,6-2,0$ А; $U_{xx} = 56,1$ В; $C = 300$ мкФ). В этом случае толщина упрочненного слоя увеличивается до 30–40 мкм, микротвердость находится на уровне 8740 МПа, а сплошность составляет 100%.

Результаты исследования износостойкости покрытий, состоящих из твердого сплава ВК8 и меди, свидетельствуют о том, что в паре трения может образовываться сервовитная пленка (СП), снижающая коэффициент трения в несколько раз. В данном случае, когда сформированный на основе ЭЭЛ поверхностный слой представляет собой пористый материал, пропитанный медью, при определенных условиях может устанавливаться режим избирательного переноса [6].

КЭП на образцах из никелевого сплава ХН58МБЮД, применяемого для работы в криогенных средах, сформированные в последовательности C_u → ВК8 и ВК8 → C_u → ВК8, не обеспечивают желаемой микротвердости в поверхностном слое.

В данном случае положительные результаты, при упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД, обеспечивают КЭП, созданные по схеме ВК8 → ВК8 → Cu и ВК8 → ВК8 → Ni.

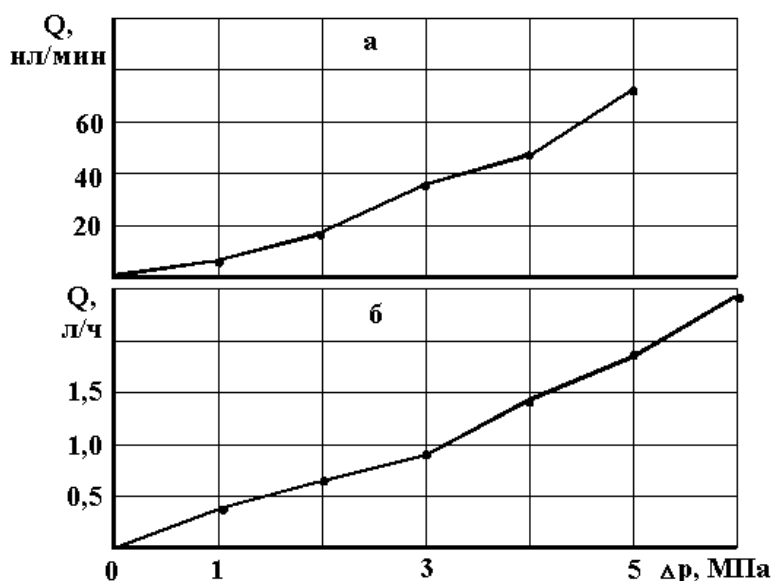
С целью получения более плотных и менее шероховатых покрытий процесс поверхностного легирования твердым сплавом ВК8 проводили в два этапа [7]. Сначала осуществляли более жесткий режим ($J_{кз} = 2,0-2,2$ А; $U_{xx} = 68,7$ В; $C = 300$ мкФ), что позволило внедрить в обрабатываемую поверхность большое количество упрочняющего материала. Однако шероховатость упрочняемой поверхности в этом случае была неприемлемо высокой: $Ra = 4,8$ мкм. На втором этапе применяли мягкий режим ($J_{кз} = 0,5-0,6$ А; $U_{xx} = 56,1$ В; $C = 20$ мкФ), при котором сглаживались наиболее выступающие вершины нанесенного на первом этапе покрытия и увеличилась его сплошность. Шероховатость «выглаженной» поверхности $Ra = 1,6$ мкм. Третий слой – из меди или никеля наносился на том же режиме, что и предыдущий ($J_{кз} = 0,5-0,6$ А; $U_{xx} = 56,1$ В; $C = 20$ мкФ). Шероховатость в этом случае еще более снижалась ($Ra = 0,8-1,0$ мкм), а микротвердость находилась на достаточно высоком уровне ($H_{\mu} = 9270$ и 9850 МПа соответственно).

В результате проведенных исследовательских работ, направленных на изучение влияния ионного азотирования (ИА) на ЭЭЛ поверхностные слои, состоящие как из однослойных, так и КЭП, было установлено, что толщину активных ЭЭЛ слоев можно увеличить последующим или предыдущим ИА. Например, предыдущее или последующее ИА КЭП, сформированных на подложках из стали 40Х состава ВК8 → Cu → ВК8, позволяет формировать покрытия, имеющие низкую шероховатость ($Ra = 0,6$ мм), 100% сплошность, значительную глубину сформированного слоя (до 130 мкм) и микротвердость, плавно снижающуюся по мере углубления и достигающую на поверхности 9500 МПа [8].

Исследование эксплуатационных характеристик импульсных торцевых уплотнений с КЭП

Экспериментальные исследования импульсных торцевых уплотнений с кольцами, упрочненными методами ЭЭЛ, выполнялись на экспериментальном стенде, созданном в лаборатории герметичности и виброненадежности центробежных машин Сумского государственного университета (СумГУ). В ходе экспериментальных исследований производились измерения статических и расходных характеристик импульсных торцевых уплотнений при работе на воде и воздухе. После завершения эксперимента визуально оценивалось состояние трущихся поверхностей колец. При отсутствии видимых следов износа трущихся поясков состояние пары трения оценивалось как удовлетворительное.

Расходные характеристики импульсного уплотнения показаны на рисунке. Стабильность характеристик свидетельствует о надежном бесконтактном режиме работы пары при вращении ротора.



Расходные характеристики импульсного торцевого уплотнения при $n = 5000$ об/мин: а – на воздухе; б – в воде.

Так как наибольший износ колец импульсного уплотнения происходит при пуске и остановке машины, особое внимание уделялось испытанию на пусковых режимах. При пусковом перепаде давления 0,5 МПа 20 пусковых циклов и остановок уплотнения на воздухе показали, что следов разрушения покрытия не наблюдается. Принимая во внимание то обстоятельство, что в моменты пуска, до образования газовой пленки, торцовая пара работает в режиме сухого трения, можно заключить, что комбинированное покрытие обеспечивает требуемую износостойкость уплотняющих поверхностей колец импульсного уплотнения.

Проведенный отделом автоматики и уплотнений анализ научно-технической литературы и патентов показал, что НПО «Энергомаш» является инициатором разработки торцевого уплотнения импульсного типа для герметизации насосов, работающих на криогенных продуктах [3]. В 1988 г. НПО «Энергомаш» и СумГУ развернули совместные работы по созданию и экспериментальной отработке импульсного уплотнения для турбонасосных агрегатов (ТНА) криогенных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [9–11].

На заключительном этапе работ (1996–1999 гг.) при проектировании и отработке в НПО «Энергомаш» импульсного уплотнения (\varnothing 135 мм) для турбонасоса двигателя во главу угла ставилась необходимость обеспечения гарантированной работоспособности уплотнения на основном режиме работы двигателя, на режиме дросселирования и обеспечение требуемого уровня герметичности на стоянке, то есть в широком диапазоне изменения перепада давления на импульсном уплотнении и частоты вращения ротора.

Уплотнение работало в условиях, когда уплотняемой средой являлся жидкий кислород, на основном режиме и режиме конечной ступени частота вращения ротора составляла соответственно 18400 и 9000 об/мин, а перепад давления на уплотнении соответственно 15,0 и 0,5 МПа. Кольца уплотнений изготавливались из никелевого сплава ЭК-61 (ХН58МБЮД).

На сборках импульсных уплотнений использовались опорные кольца и ползуны с покрытием торцов твердым сплавом ВК8 и ВК8 + Ni, выполненным методом ЭЭЛ в СумГУ. На электроэрозионное покрытие дополнительно наносилось покрытие из дисульфида молибдена.

Во время испытаний сохранялся необходимый зазор между рабочими торцами уплотнения, а следовательно, и небольшая утечка (не более 800 г/с на основном режиме).

Весь объем экспериментальных исследований был выполнен на стендах НПО «Энергомаш» при тесном сотрудничестве с представителями СумГУ. Для экспериментального подтверждения работоспособности импульсного уплотнения в указанном широком диапазоне перепадов давления было принято решение провести испытания на воде, так как стенд, предназначенный для испытаний в криогенных средах, не позволяет поднимать давление перед импульсным уплотнением более 4,0 МПа. До испытания на воде импульсное уплотнение прошло контрольное испытание на жидком азоте.

Испытания импульсных уплотнений на жидком азоте и жидком кислороде подтвердили их высокую работоспособность в различных средах и широком диапазоне режимных параметров. Основные результаты экспериментальных исследований импульсных уплотнений с КЭП показаны в таблице [3].

Результаты испытаний импульсных торцевых уплотнений для ТНА ЖРД

Уплотняемая среда	Средний диаметр уплотнения, мм	Перепад давления, МПа	Частота вращения, об/мин	Утечка на рабочем режиме, г/с	Время испытаний, количество испытаний
Вода	135	12,2 0,8	18400 8400	≤ 400 ≤ 50	211 с, 3 испытания
Жидкий кислород	135	4,0	18400	< 820	209,1 с, 12 испытаний
Жидкий Азот	135	4,0	18400	650	30 с, 1 испытание

Выводы

В результате большого объема работ, направленных на создание нового класса экономичных и надежных уплотнений роторов, в частности ТНА ЖРД, проведены необходимые технологические и материаловедческие исследования по выбору материалов и КЭП уплотнительных

колец, что помогло впервые создать импульсные уплотнения с металлической манжетой для работы в криогенных средах, при сверхвысоких режимных параметрах, характерных для уплотнений ТНА ЖРД; впервые выполнены экспериментальные исследования по выбору покрытий импульсных уплотнений, предназначенных для работы в среде жидкого кислорода, которые подтвердили пожаробезопасность и высокую работоспособность этого типа уплотнения; впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования одного узла импульсного уплотнения в средах с различными теплофизическими свойствами (вода, жидкие кислород и азот) в широком диапазоне режимных параметров ($n = 8400\text{--}22700$ об/мин, $p = 0,8\text{--}12,2$ МПа), подтвердившие высокую работоспособность уплотнения в этих условиях.

Полученные результаты позволили рекомендовать применение импульсных уплотнений с КЭП в ЖРД разработках НПО «Энергомаш» с годовым экономическим эффектом 445 тыс. рублей в ценах 2000 г.; применять в насосах КСВ – 20/80, используемых на Одесском припортовом заводе с годовым экономическим эффектом 22,5 тыс. гривен в ценах 1999 г. и различных разработках СумГУ с годовым экономическим эффектом 27,0 тыс. гривен в ценах 2000 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 446695 (СССР). Торцевое уплотнение с регулируемой утечкой / *К.В. Лисицын, В.А. Марцинковский, Н.В. Передерий*. Опубл. В Б.И. 1974. № 38.
2. *Москаленко В.В., Марцинковский В.А.* Характеристики и опыт эксплуатации импульсных торцевых уплотнений // Труды 6-й техн. конф. Сумы. 1991.
3. *Громыко Б.М., Колпаков А.В., Чернов А.Е.* Опыт разработки импульсных торцевых уплотнений для быстроходных турбонасосов / Труды 9-й международной научно-технической конференции. 1999. Т. 1. С. 151–159.
4. *Тарельник В.Б.* Улучшение служебных характеристик поверхностных слоев на основе железа за счет применения композиционных электроэрозионных покрытий // Электронная обработка материалов. 1995. № 4. С. 61–62.
5. *Захаров Н.В., Тарельник В.Б.* Исследование закономерностей формирования электроэрозионных покрытий с подслоем из меди // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Вып. 58. 1999. С. 69–74.
6. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. М., 1989. С. 327.
7. *Тарельник В.Б.* Исследование влияния режимов электроискрового упрочнения на качественные параметры покрытий // Сб. тр. ВГУ. Вып. 24. Киев, 1994. С. 103–107.
8. *Тарельник В.Б.* Іонне азотування квазібагатошарових електроерозійних покриттів // Машинознавство. 1999. № 6. С. 31–33.
9. *Tschernov A.E., Tarelnik W.B., Marzinkowskij W. S., Gromyko B. M.* Die ausarbeitung der methoden des elektroabtragenden legierens der kontaktflächen von impulsgleitringdichtungen. Internationales Dichtungskolloquium // Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen. Steinfurt. 1997. S. 1–16.
10. *Лещинский В.М., Тарельник В.Б., Чернов А.Е.* Разработка методов электроэрозионного легирования рабочих поверхностей импульсных торцевых уплотнений // Вістник Східноукраїнського державного університету. Луганск, 1997. С. 174–190.
11. *Tarelnik V.B.* Das mathematische modell der prozesse bei der eal der reibungspaare. X1 Internationales Dichtungskolloquium «Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen». Vulkan-Verlag, Essen, 1999. P. 263–274.

Поступила 13.03.2000

Summary

Investigations to create a new class of economical and reliable seals for rotors of turbo-driven pump unite used in liquid rocket engines were carried out on one pulsed sealing assembly with combined electro-erosional coatings in media with different thermal and physical properties (water, liquid oxygen and nitrogen) and in the wide range of operating conditions ($n = 8400\text{--}18400$ rpm, $p = 0,8\text{--}12,2$ МПа). These investigations confirmed the high serviceability of the seal mentioned above.