

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

Направленный выбор технологии и установление критериев оценки наиболее рационального метода упрочнения колец торцевых уплотнений

Представлены результаты анализа литературных источников и производственного опыта по выбору материалов колец торцевых уплотнений (ТУ) и основных требований к их изготовлению и эксплуатации. Предложена система 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.

Ключевые слова: торцовое уплотнение, кольцо, износ, поверхностный слой, система направленного выбора, математическая модель, критерии выбора.

Представлені результати аналізу літературних джерел і виробничого досвіду з вибору матеріалів кілець торцевих ущільнень (ТУ) і основних вимог до їх виготовлення і експлуатації. Запропоновано систему спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості поверхневого шару кілець ТУ на різних етапах їх життєвого циклу. Запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу поверхонь ТУ при терті, що дозволяє по роботі тертя визначити лінійний і ваговий знос поверхні, а також критерії вибору найбільш раціонального методу зміцнення.

Ключові слова: торцеве ущільнення, кільце, знос, поверхневий шар, система спрямованого вибору, математична модель, критерії вибору.

In this paper are presented the recommendations for material's selections of the mechanical seals rings and basic productive and operating requirements. The system of a directional selection of technology that ensures the required quality of working surfaces of the mechanical seals rings covers their entire life cycle. The mathematical frictional model is proposed as an instrument for calculating a linear and weighing abrasion of the mechanical seals rings and helps to improve selection's criteria and the most rational method of strengthening.

Key words: ring, abrasion, surface layer, criteria of selection, mathematical model, system of a directional selection of technology, mechanical seal.

Введение

Создание надежных уплотнительных узлов, 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.

Одним из самых распространенных уплотнительных элементов, широко применяемых в насосах, компрессорах и различных химических аппаратах, является торцовое уплотнение (ТУ). Оно представляет собой герметизирующее устройство, состоящее из двух деталей в виде колец – одно из которых вращается совместно с валом, а другое неподвижно, соединено с корпусом (рис. 1, а). На торцах колец расположены плоские уплотняющие поверхности, изготовленные с высоким качеством, характеризующимся геометрическими параметрами,

структурой, упрочнением, остаточными напряжениями и др.

На работоспособность уплотнений 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.

На рис. 1, б показано кольцо импульсного торцевого уплотнения насоса ЦН-30/410, перекачивающего дихлорэтан и подверженное адгезионному износу. Кольцо изготовлено из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и совершает $n=2980$ об/мин, при уплотняющем перепаде давления $p = 0,15$ МПа.

Кольца ТУ представляют собой пару трения, выполняющую роль основного уплотнительного элемента, поэтому они изготавливаются из специальных материалов, выби-

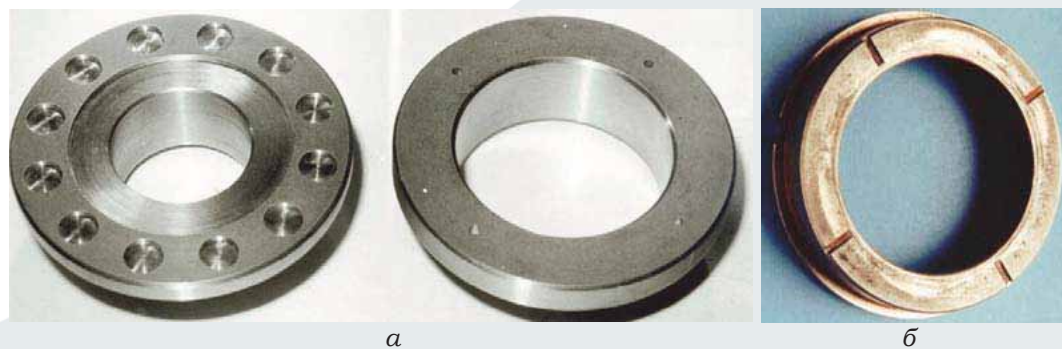


Рис. 1. Кольца импульсных торцевых уплотнений (ИТУ):
а – с электроэрозионным покрытием,
б – адгезионный износ кольца ИТУ насоса ЦН-30/410

раемых в зависимости от условий эксплуатации. Правильно выбранный материал колец ТУ обеспечивает надежную, безопасную и безотказную работу, узла уплотнения, а, следовательно, и всего агрегата.

Анализ основных исследований и публикаций

Согласно [1] 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 харак-

теристик. 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 [2].

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 [3] 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.

В [4] для характеристики напряженности условий работы ТУ принят параметр, представляющий собой произведение давления p рабочей среды на среднюю окружную скорость скольжения v в паре трения. В зависимости от значений параметров pv уплотнения подразделяют на четыре категории (табл. 1).

Таблица 1. Классификация уплотнений по параметру pv

Категория уплотнения	P , МПа	v , м/сек	pv , МПа·м/с	Определение параметра
I	$\leq 0,1$	≤ 10	≤ 1	Низкий
II	$\leq 1,0$	≤ 10	≤ 5	Средний
III	$\leq 5,0$	≤ 20	≤ 50	Высокий
IV	$> 5,0$	> 20	> 50	Наивысший

В [5] представлены требования, предъявляемые 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 теплоустойчивость; максимально возможный ресурс работы; стабильность по времени коэффициента трения и минимальная его величина.

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. [1-5].

Согласно [6] уплотнения роторов должны удовлетворять двум главным условиям: обладать требуемой герметичностью и повышенной надежностью при заданных перепадах давления, частотах вращения, температурах и физичес-

ких свойствах уплотняемой среды.

В высокооборотных насосах и компрессорах большого давления широкое применение нашли ТУ бесконтактного типа (рис. 2), у которых 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 это их уплотнительные кольца целиком изготавливаются из износостойких

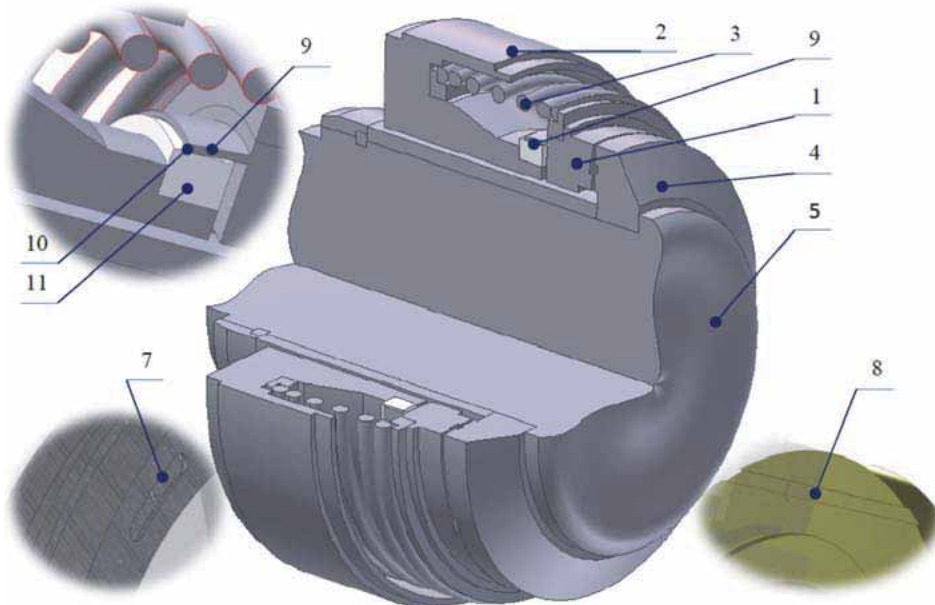


Рис. 2. Торцевое уплотнение бесконтактного типа

материалов, таких, как карбид вольфрама, карбид кремния, различные виды графитов. Стоимость колец из этих материалов достигает сотен и тысяч долларов США, что обуславливает высокую стоимость уплотнительных узлов в целом.

Уплотнение (рис. 2) содержит аксиально подвижное кольцо 1, установленное в корпусе 2, которое поджато пружинкой 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 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 торцевую уплотнительную поверхность 10 в месте контакта с уплотнительной поверхностью втулки 11.

Следует отметить, что при контактировании уса (вторичного уплотнения) с втулкой происходит фреттинг процесс, т.е. поверхность уса 10 совершает возвратно поступательные движения (длиной 3 – 4 мкм) по поверхности втулки 11.

При этом в результате фреттинг-коррозии происходит разрушение контактирующих поверхностей. Таким образом, контактирующая поверхность уса кроме обеспечения герметичности соединения должна обладать высокой износостойкостью.

В то же время, по мере усовершенствования техники, возникает необходимость использования высоких и сверхвысоких давлений, экстремальных температур (от высоких до криогенных), агрессивных сред и тому подобное. Влияние таких условий эксплуатации на герметичность разъемных соединений очень большое. Поэтому при изготовлении колец ТУ становится целесообразным применение металлических композиционных материалов типа «основа - покрытие», которые объединяют защитные свойства покрытий с механической прочностью основы [7].

В [8] 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.

Изменение защитных и трибологических свойств поверхностей деталей можно достичь за счет образования специального рельефа поверхностей пар трения [9, 10].

Резервом повышения качества композиционных материалов в плакированных стальных деталях. Использование плакирования деталей материалом с особыми свойствами, позволяет создавать конструкции

необходимой прочности, надежности и долговечности [11].

Учитывая то, что не всякие материалы могут использоваться для поверхностей ТУ, их выбор имеет решающее значение.

В литературе отсутствуют комплексные исследования направленные на разработку технологии выбора необходимого материала колец и их элементов, использование которой обеспечит максимальный ресурс работы ТУ. Не одна из имеющихся в литературных источниках рекомендаций по выбору материалов ТУ не является универсальной.

Целью настоящей работы является разработка системы и критериев направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей колец ТУ путем анализа и синтеза существующих аналогов, опыта промышленности и рекомендаций в отечественной и зарубежной литературе.

Изложение основного материала исследований

Система направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей колец ТУ охватывает весь их жизненный цикл (рис. 3), включающий в себя материал колец и их элементов, технологию их изготовления, технологию ремонта и др. Все они рассматриваются через специальные методы направленного выбора. При этом необходимо учитывать влияние выбираемых методов друг на друга, которое в конечном итоге будет сказываться на качестве изделия.

Необходимость использования

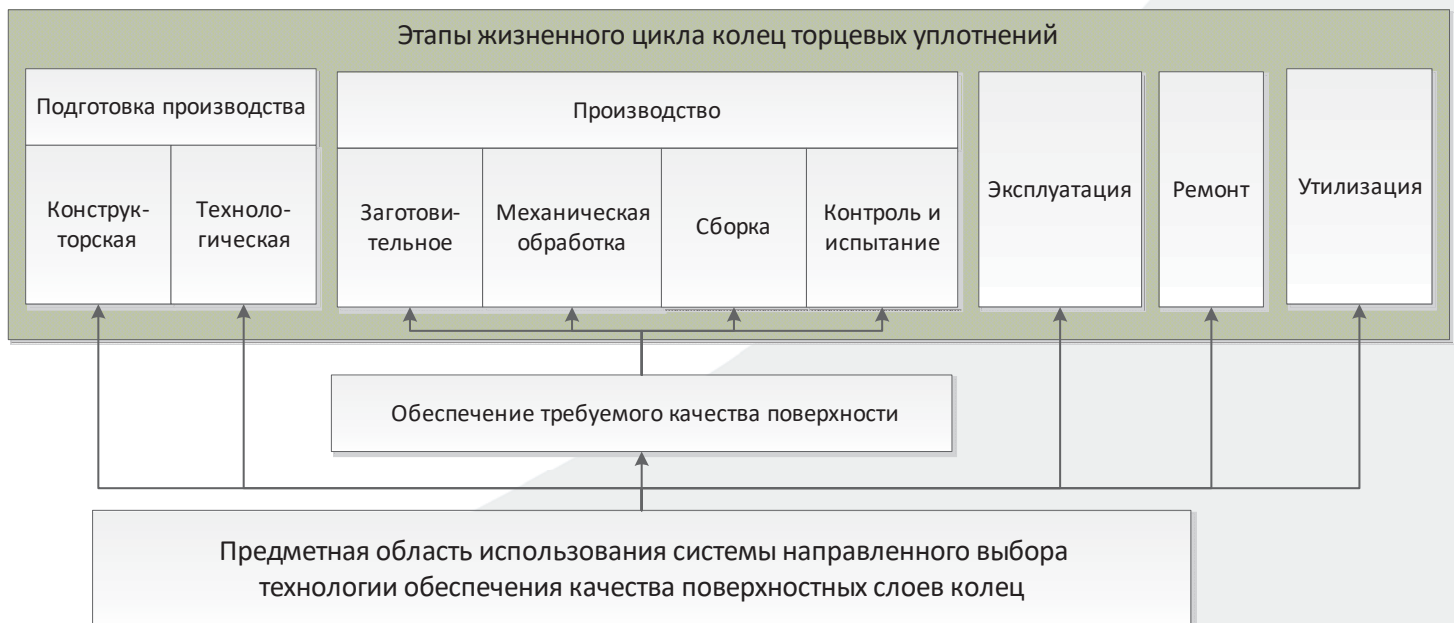


Рис. 3. Использование системы направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества поверхностного слоя колец ТУ на различных этапах жизненного цикла

системного подхода при проведении исследований требует анализа целесообразного использования направленного выбора технологий обеспечения требуемого качества поверхностных слоев колец на всех стадиях их жизненного цикла.

В настоящее время стало очевидным, что вопросы повышения износостойкости деталей трибосопряжений должны проводиться в тесной кооперации конструкторских, технологических и триботехнических решений. Правильный подбор материалов возможен только в том случае, если проведен анализ конструкционных и триботехнических характеристик узла трения и условий его работы.

На этапе конструкторской подготовки производства, при проектировании колец ТУ, осуществляющих те или иные функции, важно знать методы, использование которых может обеспечить требуемые характеристики поверхности и в соответствии с этим назначать ее качественные показатели (технологическая рациональность конструкции). Как показывает практика производств таких методов может быть много.

На этапах технологической подготовки производства знание методов повышения качества поверхностных слоев деталей машин позволяет планировать рациональную технологию получения заданных свойств.

В результате проведения научных исследований, появляется возможность выбора наиболее рационального способа получения заготовок колец требуемого качества. Возможно они будут изготавливаться из менее дешевых материалов, с меньшими допусками на обработку и т. п. Не исключена возможность более рационального применения термической обработки заготовок, сокращения числа и длительности отдельных ее этапов.

Зная требования, которые предъявляются к поверхностям колец ТУ, появляется возможность выбора таких методов механической обработки, которые будут наиболее пригодны и экономически обоснованы.

Получаемые результаты исследований также необходимо знать при

планировании и осуществлении сборочного процесса. Выбор тех или иных операций сборки: сварка, сборка с термовоздействием и др. зависит от качества полученного ранее поверхностного слоя. Это приводит к более глубокому анализу сборочного процесса, т.к. на заключительных стадиях производственного процесса окончательно формируются необходимые характеристики изделия.

При формировании поверхностного слоя с заданными характеристиками изменяются методы контроля и испытания уплотнения.

Зная материал и качество поверхностей колец, можно прогнозировать в каких условиях ТУ будет работать лучше, в каких хуже и в связи с этим, используя получаемые результаты, можно управлять процессом его рациональной эксплуатации.

Использование системы направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества колец ТУ на этапе ремонта позволяет более экономично решить задачу восстановления их работоспособности. Как показывает практика на этом этапе применение результатов научных исследований дает значительный экономический эффект.

Полученные результаты также необходимо знать для рациональной утилизации колец ТУ, т.к. их переработка во многом зависит не только от состава материалов и их структуры, а и от герметизируемой ими среды (кислота, яды, пищевые

продукты и др.).

На рис. 4 представлен набор методов для достижения необходимого качества контактирующих поверхностей колец 1 и 4 ТУ и уплотнительной поверхности уса (рис. 2), составляющих практическую область приложения результатов выполняемых научных исследований.

При решении задач повышения качества поверхностных слоев колец ТУ важно учитывать не только стоимостные, но и экологические характеристики процесса (рис. 5).

Затраты на поддержку экологических характеристик колец ТУ соответствующего уровня вносятся в сумму общих затрат. Следует отметить, что экологические характеристики могут быть использованы в качестве самостоятельного критерия оптимизации при принятии предварительно отобранных экономически целесообразных вариантов.

В качестве критериев показателей качества поверхностей деталей, в зависимости от условий их эксплуатации, могут быть использованы: предельная нагрузка, время или число циклов нагружения до образования дефектов, пределы текучести и ползучести, временное сопротивление, критические деформации, твердость поверхности и др.

Эти критерии более приемлемы к недопустимым процессам повреждения поверхностей тре-

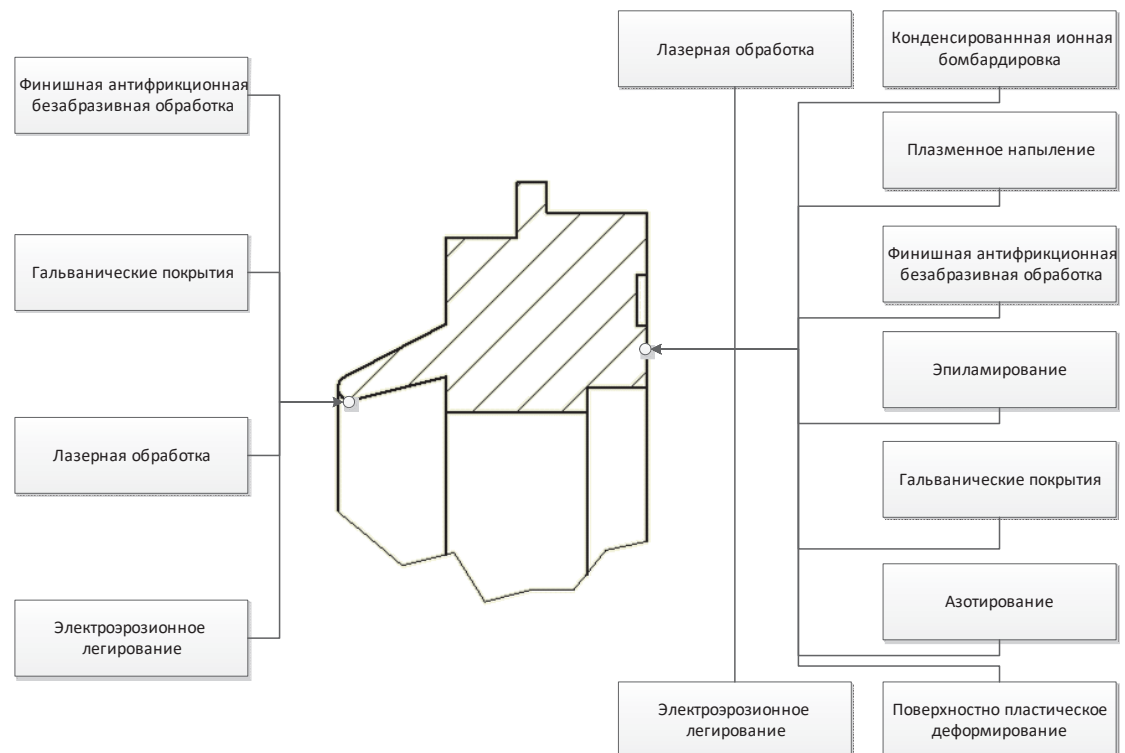


Рис. 4. Методы достижения требуемого качества поверхностей колец ТУ

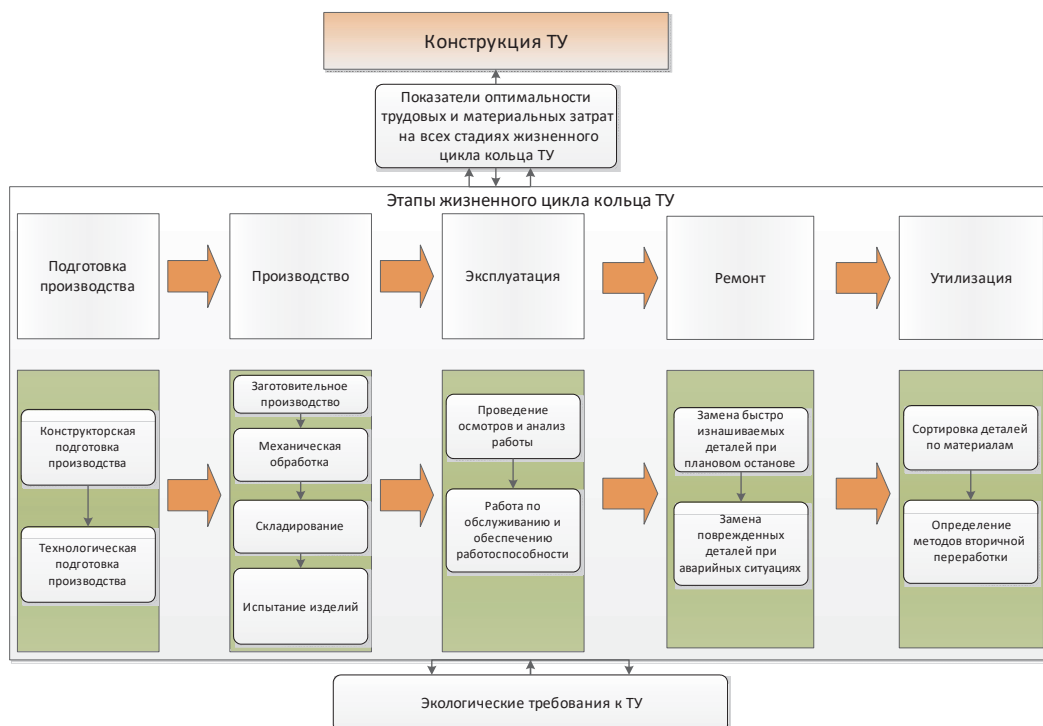


Рис. 5. Взаимосвязь показателей технологичности колец ТУ на различных этапах жизненного цикла

ния деталей и рабочих органов машин: схватывание, контактная усталость, коррозионно-механические и абразивные процессы.

Нами же рассматривается процесс нормального трения и изнашивания (механохимический износ и его основное проявление окислительный износ), а также мероприятия по снижению его уровня. Нормальные процессы определяют ресурсы работы машин - их долговечность, производительность и экономичность.

Система трения является существенно термодинамической, а закономерности преобразования энергии из внешней механической в энергию внутренних процессов определяются структурным состоянием материалов, видом кристаллических решеток и физико-химическим действием смазочных сред.

Изменение энергии системы за счет запасенной энергии вызывает значительные изменения свойств тела. При этом, в зависимости от вида кристаллической решетки материала детали может изменяться физико-механическое состояние ее поверхности.

Многие свойства тел связаны с изменением их свободной энергии при внешнем воздействии, которая, в свою очередь, определяет изменение свойств и размеров тела. Величина запасенной энергии и энергоемкость являются существенными технологическими характеристиками, по которым можно судить о достигнутом изменении

свойств или размеров тела при заданном виде внешней обработки. При практическом выборе технологии обработки материалов руководствуются не только физико-энергетическими критериями, которые дают основу для определения эффективности, но и инженерно-экономическими [12].

Таким образом, основными при оценке того или иного метода достижения требуемого качества поверхностного слоя элементов ТУ должны быть энергетические и экономические критерии.

Ниже рассмотрены энергетические критерии, оказывающие определяющее влияние на износостойкость сформированных различными технологиями поверхностных слоев.

Достоинство энергетического подхода заключается в возможности интегрального описания с помощью энергетических критериев влияния многочисленных параметров, от которых зависят процессы трения и износа.

Так как большие механические нагрузки, возникающие при внешнем трении, приводят к резкому изменению физико-механических свойств поверхностных слоев и их коренной трансформации (механическая энергия стимулирует химические реакции), то за критерий износа можно принять энергию активации процесса износа.

Если предположить, что под влиянием внешнего упругого нап-

ряжения σ , приложенного к покрытию, энергия связи U_0 снижается на величину энергии деформации $\gamma\sigma$, то, поскольку разрыв связи представляет собой дискретную стадию активации в процессе износа, разность $U_0 - \gamma\sigma$ рассматривается как энергия активации процесса износа E_A .

При нормальном трении, на стадиях приработки и установившегося износа между весовым износом (Δm) и работой, затраченной на трение ($A_{тр}$), инициирующей этот износ, в первом приближении существует экспоненциально возрастающая зависимость.

С увеличением величины работы, затраченной на трение, износ увеличивается тем сильнее, чем больше энергия активации E_A .

Исходя из экспериментальной зависимости Δm от $(-A_{тр})^{-1}$ (убывающая экспонента), можно сделать вывод, что $\ln \Delta m$ пропорционально $(-A_{тр})^{-1}$ и величине E_A , т.е.

$$\ln \Delta m \sim (-A_{тр})^{-1}, E_A$$

Переходя от приближенного равенства к точному

$$\Delta m = C \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{мп}}} \quad (1)$$

где $C = \Delta m_n$ - износ насыщения, т.е. максимально допустимый износ в период установившегося изнашивания.

Тогда

$$\Delta m = \Delta m_n \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{мп}}} \quad (2)$$

Зависимость (2) назовем уравнением износа.

Принимая в формуле (2)

$$E_A = A_{тр}, \quad (3)$$

имеем:

$$\frac{\Delta m}{\Delta m_n} = e^{-1}. \quad (4)$$

Отсюда E_A - это физическая величина, равная такой работе трения, при которой $\Delta m = \frac{\Delta m_n}{e}$, т.е.

Δm в e раз меньше Δm_n . Назовем ее константой износа ЭЭЛ поверхностей. Размерность $[E_A] = \text{Дж}$.

Для того, чтобы перейти от весового износа к линейному, т.е. износу, определяющему степень из-

менения размера изделия по глубине, необходимо уравнение износа (2) записать в виде

$$\Delta h \cdot S \cdot r = \Delta h_n \cdot S \cdot r_n \cdot e^{-\frac{E_A}{A_{mp}}}, \quad (5)$$

где S – площадь изнашиваемой поверхности, r , r_n – соответственно плотность поверхностного слоя во время установившегося изнашивания и в период наступления износа насыщения, т.е. износа на наибольшую глубину периода установившегося изнашивания Δh_n .

После необходимых преобразований имеем:

$$\Delta h = \Delta h_n \cdot \frac{r_n}{r} \cdot e^{-\frac{E_A}{A_{mp}}}. \quad (6)$$

Таким образом, при определении линейного износа необходимо делать поправку на изменение плотности изнашиваемого слоя.

Подставляя в (6) соотношение (3), имеем:

$$\Delta h = \Delta h_n \cdot \frac{r_n}{r} \cdot e^{-1}. \quad (7)$$

Отсюда

$$\frac{\Delta h \cdot r}{\Delta h_n \cdot r_n} = e^{-1}, \quad (8)$$

что совпадает с (4).

Следовательно, E_A – это физическая величина, равная такой работе трения, при которой $\Delta h \cdot r$ в e раз меньше $\Delta h_n \cdot r_n$. Отметим, что

$$\text{при } r_n = r, \quad \frac{\Delta h}{\Delta h_n} = e^{-1}.$$

Величину работы трения, необходимую для осуществления износа определенного количества вещества (Δm_x) или для получения необходимого линейного износа (Δh_x), можно определить из уравнений (2) и (6).

Тогда соответственно:

$$A_{mp} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_n}{\Delta m_x}}; \quad (9)$$

$$A'_{mp} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta h_n \cdot r_n}{\Delta h_x \cdot r_x}}. \quad (10)$$

Используя предложенный подход к решению задачи направленного выбора технологии повышения качества поверхностных слоев

ТУ, можно решать как прямую задачу – определение весового и линейного износа по известной работе трения, так и обратную – задавая весовой или линейный износ определять необходимую для этого работу трения, а следовательно, и время затраченное для выполнения этой работы. Кроме того, зная время достижения определенной величины износа, мы имеем возможность для более рациональной эксплуатации изделий, своевременно назначая время ремонта и не допуская до катастрофического износа поверхность трения.

Таким образом, на основании предложенной математической модели, появляется возможность достоверно прогнозировать величину износа для поверхностей изделий, качество поверхностных слоев которых сформированных тем или иным способом. При этом константы уравнения износа (энергия активации процесса износа, E_A и максимально допустимый износ в период установившегося изнашивания, Δm_n) может служить критерием для выбора наиболее приемлемой технологии повышения качества поверхностных слоев изделий.

Зная величину износа за определенное время, а также величину затрат на выполнение той или иной технологии, мы выбираем необходимую технологию повышения качества поверхностных слоев изделий.

Выводы:

1. Проведенные исследования позволили разработать общие положения повышения качества поверхностных слоев колец торцевых уплотнений в зависимости от требований эксплуатации.

2. Предложена система направленного выбора технологий формирования поверхностного слоя колец торцевых уплотнений, учитывающая все стадии их жизненного цикла. При этом учитываются как экономические так и экологические требования.

3. Для достижения заданного качества поверхности колец ТУ, в зависимости от ее вида и требований к ней, могут быть использованы как отдельные методы, так и их комбинации.

4. Предложена физически обоснованная математическая модель процесса износа, упрочненных поверхностей ТУ при трении, позволяющая по работе трения определять линейный и весовой износ поверхности.

5. Разработана методика определения константы износа E_A для

различных материалов пар трения, а также констант уравнения износа – весового и линейного износа насыщения.

Список литературы:

1. 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.
2. Захаров Б.С., Захаров И.Б. Уплотнения нефтяных центробежных и поршневых насосов. - М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2011. - 204 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1989. - 327с.
4. Майер Э. Торцевые уплотнения: Пер. с нем. - М.: Машиностроение, 1978. - 288 с.
5. Г.А. Голубев, Г.М. Кукин, Г.Е. Лазарев, А.В. Чичинадзе. Контактные уплотнения вращающихся валов. - М.: Машиностроение, 1976. - 264с.
6. Марцинковский В.А. Динамика роторов центробежных машин: монография / В.А. Марцинковский. - Сумы: Сумский государственный университет, 2012. - 563 с.
7. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, Б. Антошевский. Формирование поверхностей скольжения торцевых уплотнений различными методами // Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. - 2012. - №3 (34) Часть 1. - С.217-225.
8. 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.
9. Bogdan Antoszewski. Influence of Laser Surface Texturing on Scuffing Resistance of Sliding Pairs // Advanced Materials Research, V. 874, 2014, pp. 51-55.
10. Błasiak S., Kundera Cz. Numerical analysis of the grooved surface effects on the thermal behavior of a non-contacting faceseal // Procedia Engineering, V.39,2012, pp. 315-326.
11. Кирик Г.В. Новые композиционные материалы: Монография / Г.В. Кирик, В.Н. Радзиевский, А.Д. Стадник. - Сумы: Университетская книга, 2011. - 310 с.
12. А.А. Воробьев. Основы изменения свойств материалов при электроискровой обработке // Электронная обработка материалов. - 1969. - № 6. - С. 25 -30.

Современная беларусская компрессорная техника

- стационарная и передвижная,
- винтовая и поршневая,
- производительностью до 12 м³/мин,
- давлением до 1 МПа.

• производство • наладка • сервис •



иностранное частное производственно-торговое унитарное предприятие

ГОМЕЛЬКОМПРЕССОРМАШ

246050, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Подгорная, 10
тел.: +375 /232/ 77 00 63, 77 00 65 факс: +375 /232/ 71 39 76, 77 00 64
e-mail: GCM@tut.by www.gomelcompressor.by

Филиал ИЧПТУП "ГОМЕЛЬКОМПРЕССОРМАШ":
220000, Республика Беларусь, г. Минск, пер. Промышленный, 11
тел./факс: +375 /017/ 345 84 50