

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Проволоцкий А.Е., Негруб С. Л., Лапшин С.П., Морозенко Р.Е.

(НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина)

Для современной техники, в которой достаточно широко используются элементы гидравлики, характерно стремление к увеличению ресурса и производительности гидравлических агрегатов. Эти параметры, в первую очередь, зависят от качества исполнения, и, соответственно, долговечности деталей и узлов, из которых состоит гидроагрегат [1, 2].

Одним из показателей работоспособности авиационных гидравлических агрегатов – насосов [3], является допустимая утечка жидкости, при превышении которой агрегат считается выведенным из строя. Элементом, отвечающим за герметичность конструкции, является уплотнительное устройство, предотвращающее вытекание рабочей жидкости из полости насоса. К уплотнительным устройствам предъявляются такие требования:

- срок службы уплотнения, как правило, должен быть не меньше срока службы агрегата;
- обеспечение степени герметичности, определяемой условиями работы агрегата;
- малое трение и, как следствие, малый износ контактных поверхностей (например, уплотнения и цилиндра);
- простота технологии изготовления и сборки уплотнения.

По конструктивным признакам различают уплотнения для подвижных и неподвижных соединений. Для подвижных соединений широкое распространение получили манжетные уплотнения, другими словами, манжеты. Манжетой в общем случае называют упругое фигурное кольцо, которое оказывает уплотняющее действие на соответствующие детали. Манжеты изготавливаются из эластомерных материалов. Собственное контактное давление действует на узкой уплотняющей кромке за счет деформации губки манжеты в посадочном месте.

Соединение вал - манжета представляет собой пару трения. Для повышения работоспособности соединения следует стремиться к уменьшению трения в зоне контакта элементов пары, что приведет к снижению температуры и уменьшению износа контактных поверхностей. При существующих технологиях обработки подобных пар трения заранее предусматривается наличие дефектов, влекущих за собой ускоренный износ как уплотнения, так и вала. При приближенном рассмотрении проблемы износа манжет можно выделить два основных негативных фактора, влияющих на долговечность и качество работы уплотнения: дефекты макрогеометрии контактирующих поверхностей и нерациональная микрогеометрия поверхностей вала и манжеты. Если для устранения дефектов макрогеометрии необходимо усовершенствовать существующие методы механической обработки, то для создания микрорельефа, обеспечивающего требуемые антифрикционные свойства и износостойкость деталей, необходимо рассмотреть возможность применения усовершенствованных технологий механической обработки поверхностей пар трения.

Целью настоящей работы является обоснование и исследование возможности повышения эффективности работы гидравлических агрегатов за счет

совершенствования технологии обработки контактных поверхностей пар трения, входящих в их состав.

Реализации цели исследований предшествовал анализ условий работы соединений вал – уплотнение с учетом влияния на процессы, протекающие в зоне контакта, микрогеометрии трущихся поверхностей. Выход из строя уплотнений чаще всего обусловлен износом контактных поверхностей. В свою очередь, износ является результатом постоянного трения в движущейся паре вал - уплотнение. Под влиянием сжимающей нагрузки две наложенные одна на другую поверхности по мере сближения соприкасаются во все большем количестве точек [4]. Вначале взаимодействующие элементы деформируются упруго, затем, по мере возрастания нагрузки, упругая деформация сменяется пластической. Под воздействием общей сжимающей нагрузки происходит обычно упругое деформирование отдельных наиболее выступающих волн на поверхности вала, обладающих определенной шероховатостью. При этом пятна фактического касания элементов пары располагаются в некоторых областях, зонах упруго деформированного полупространства. На этих пятнах возникают высокая температура и соответственно некоторый градиент механических свойств. При снятии нагрузки происходит частичная релаксация волн, которая сопровождается разрушением образовавшихся пятен касания.

Таким образом, при анализе процессов трения и износа следует различать три последовательных этапа: взаимодействие поверхностей; изменения, происходящие на соприкасающихся поверхностях в процессе трения; разрушение контактирующих поверхностей. Как известно [4], трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Оно обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей. Объемное деформирование неминуемо, поскольку поверхности всегда волнисты, шероховаты и неоднородны по своим механическим свойствам. Вследствие указанных причин происходит внедрение более жестких выступающих элементов поверхностей в более мягкое контртело. Внедрившийся элемент (назовем его индентором), перемещаясь в тангенциальном направлении, деформирует нижележащий материал, образуя впереди индентора полусферический валик, который поднимается, расширяясь в стороны. Величина валика зависит от уровня относительного внедрения h/R (где h – глубина внедрения, R – радиус внедрившейся неровности) и прочности отдельных объемов деформируемых материалов, которые неминуемо образуются между пленками, покрывающими поверхности, коль скоро они сближены на расстояния действия межмолекулярных сил.

Переходя к трению в манжетных уплотнениях, на основании теоретических и экспериментальных исследований [1] можно сказать, что сила трения состоит из адгезионной и гистерезисной составляющих. При этом для высокоэластичных материалов гистерезисная составляющая мало зависит от шероховатости поверхности, в то время как адгезионная составляющая существенно зависит от фактической площади контакта, уменьшаясь с увеличением шероховатости поверхности. Общая сила трения также уменьшается с увеличением шероховатости поверхности. Когда манжета работает по гладкой поверхности, адгезионная составляющая является основным фактором трения. Важная особенность трения резиновых манжет – значительное увеличение коэффициента статического трения при длительной выдержке под нагрузкой. Это явление «прилипания» поверхностей – результат постоянного увеличения фактической площади касания и выдавливания пленки смазочной жидкости из зоны контакта под нагрузкой, что приводит к значительному

увеличению адгезии.

Следует считать установленным фактом то, что в большинстве случаев манжетные уплотнения работают в условиях смешанного - граничного и жидкостного трения. Тонкая пленка уплотняемой жидкости образуется между контактной поверхностью манжеты и валом и действует в качестве смазки. Толщина образующейся в зоне контакта разделительной пленки зависит от вязкости жидкости, контактного давления, температуры, скорости вращения вала, шероховатости его поверхности и наличия на ней более глубоких винтовых рисок, неизбежно образующихся при подаче инструмента в процессе шлифования. Предполагается, что масляная пленка образуется в результате проникновения жидкости в зону контакта сопрягаемых поверхностей под действием капиллярных сил, а также вследствие вибрации движущихся деталей машины, защемляющей масло между поверхностями. Практически оптимальной толщиной пленки считают такую величину, при которой образуется мениск с противоположной (атмосферной) стороны манжеты. До тех пор, пока мениск сохраняется, утечки через манжету не будет.

Исходя из данных литературных источников [1, 2, 3], можно сказать, что при движении уплотняющей пары практически всегда присутствует жидкостная пленка, разделяющая трущиеся поверхности уплотнений гидроагрегатов. Для того, чтобы определить некоторые параметры пленки жидкости, находящейся в зазоре между валом и манжетой, целесообразно обратиться к работе Л.А. Кондакова [2]. В ней говорится о том, что механизм образования смазочной пленки между уплотняющей губкой (манжетой) и валом может быть объяснен гидравлическими эффектами, возникающими вследствие микронеровностей на контактирующих поверхностях. Рядом исследований установлено, что поверхность, наполненная резиной, представляет собой совокупность n приблизительно сферических полусфер диаметром $d_c = 5-10\text{мкм}$.

Даже при идеально гладком вале в пространстве между мельчайшими впадинами находится жидкость. При скольжении со скоростью V жидкость может проникать между микровыступами, образуя пленку с определенной несущей способностью. Если предположить существование масляных клиньев высотой от h_1 до h_0 над каждым микровыступом, то методами гидродинамической теории смазки можно получить формулу для определения средней толщины пленки h [2]:

$$h = 0,81 \sqrt{\frac{d \cdot \mu \cdot V}{E} + (R_{v1} + R_{v2})}, \quad (1)$$

где R_{v1} – максимальная глубина впадины микрорельефа вала, мкм; R_{v2} – максимальная глубина впадины микрорельефа манжеты, мкм; μ – вязкость жидкости; d – диаметр сопрягаемых поверхностей, мм; V – скорость относительного движения вала и манжеты, E – модуль упругости резины, из которой сделана манжета.

На основании полученных результатов, приведенных в работе [5], посвященной исследованию надежности радиальных манжетных уплотнений авиационных агрегатов, можно сделать выводы о том, что на долговечность работы манжетных уплотнений существенное влияние оказывают следующие факторы:

- если в контактной паре за счет масляной пленки обеспечено жидкостное гидродинамическое трение, то уплотнение будет работать долго и надежно;
- если поверхность вала обработана до глянцевого уровня (низкий уровень шероховатости), то это не улучшает, а наоборот ухудшает работу уплотнений;
- на герметичность уплотнений оказывает направленность следов механической

обработки вала;

- при наличии смазки между валом и манжетой динамические эффекты значительно сглаживаются и проявляются очень резко при недостаточном количестве смазки;

- наличие на поверхности манжеты круговых рисок, перенесенных на нее с поверхности пресс-формы в процессе вулканизации, отрицательно влияет на работу уплотнений;

- поверхности вала и манжеты, изготовленные в производственных условиях по существующей технологии, обладают таким микрорельефом, который предполагает появление износа уже в начальной стадии эксплуатации соединений.

Затрагивая вопрос о влиянии качества поверхности вала и манжеты на работу соединения, можно заключить, что в различных литературных источниках приводятся несколько отличные друг от друга данные об оптимальном уровне шероховатости контактирующих поверхностей. Например, в работе [5] указывается на то, что для обеспечения длительной работоспособности радиальных манжетных уплотнений гидроагрегатов рабочие поверхности валов и манжет в месте контакта должны обладать максимальными антифрикционными свойствами. По заводским технологиям, с целью уменьшения потерь на трение, вал обрабатывают шлифованием, а затем полируют до шероховатости $Ra = 0,16-0,08$ мкм. Шероховатость контактной поверхности манжет, изготовленных методом прессования, получается как обратное отображение шероховатости пресс-формы, которая при изготовлении на окончательной операции полируется до $Ra = 0,16$ мкм.

В рабочем состоянии в контактной зоне уплотнения с валом происходят сложные, взаимосвязанные физические, физико-химические, электрические и другие процессы, в различной степени влияющие на износ. В свою очередь, эти процессы, помимо влияния на них свойств материалов, зависят от микрорельефа поверхности вала. Поверхность, обработанная шлифованием и абразивным полированием, приобретает микрорельеф, обладающий существенными недостатками. Для шлифованной поверхности характерно наличие микронеровностей, вырывов металла, образование углублений и сетки микротрещин; поверхности, обработанные абразивным полированием, отличают наличие острых выступов и шаржированных частиц абразива.

В работе [3] отмечено, что снижение шероховатости при обработке вала, как правило, уменьшает износ уплотнительной манжеты. Испытания показали, что с увеличением шероховатости (высоты неровностей) поверхности вала с 0,1 до 2 мкм коэффициент трения уплотнительной манжеты увеличивается на 30%. Однако имеется предел снижения шероховатости, после которого дальнейшее ее снижение сопровождается увеличением трения, что обусловлено ухудшением смазки. В частности, при шероховатости вала, соответствующей $Ra = 0,04$ мкм, момент трения несколько увеличивается в сравнении с моментом, возникшим при работе вала с шероховатостью контактной поверхности $Ra = 0,32$ мкм. В равной степени, уплотнение, в которое входит вал с поверхностью, обработанной до $Ra = 0,05$ мкм, потеряло герметичность раньше, чем уплотнение этого же узла при более низком (порядка $Ra = 0,3-0,4$ мкм) качестве обработки контактной поверхности вала. Практика показывает, что для надежной работы манжетных уплотнений рабочая поверхность шейки вала, контактирующая с манжетой, должна иметь шероховатость обработки не ниже значения параметра $Ra = 0,63$ мкм для валов, работающих со скоростью менее 4 м/мин и $Ra = 0,32$ мкм для валов со скоростью выше 4 м/мин.

Как следует из представленных выше результатов, немаловажным фактором в обеспечении надежности работы уплотнений является технология финишной обработки элементов соединения, обеспечивающая то или иное качество контактирующих поверхностей. Что касается окончательных методов обработки пар трения, то следует уделить особое внимание тем, которые обеспечивают высокоразвитые матовые поверхности (или поверхности с развитыми микрорельефами) контактирующих элементов. Одними из способов получения матовой поверхности являются эрозионная и струйная обработки [6, 7]. Исследования можно считать успешными, если выяснены факторы, влияющие на качество работы, долговечность уплотнений, эффективность процессов, происходящих в уплотнениях при эксплуатации пар трения и, как следствие, определены предпочтительные условия их работы. В свою очередь, эти условия непосредственно зависят от способов обработки контактирующих поверхностей соединения вал - уплотнение.

В работах [6, 7, 8] представлены результаты исследований по разработке технологии получения поверхностей, отвечающих всем требованиям, предъявляемым к поверхностям трения и имеющих преимущество перед поверхностями, обработанными по существующим традиционным технологиям (шлифование, полирование, доводка). Именно матовые поверхности, полученные струйной, электроэрозионной или комбинированной - струйной и электроэрозионной обработками, обладают рядом преимуществ перед поверхностями, обработанными в соответствии с традиционной абразивной обработкой – шлифованием и полированием. Одним из основных преимуществ предлагаемой технологии является обеспечение определенного строения микрорельефа формируемой поверхности. Микрорельеф поверхности после обработки свободным абразивом представляет собой хаотическое расположение микровыступов и микровпадин самой различной конфигурации. Такого рода поверхности называют матовыми. Образование матовых поверхностей при струйной обработке обусловлено кратковременным ударно-режущим воздействием множества абразивных частиц, соударяющихся с обрабатываемой поверхностью. При массовом воздействии абразивных зерен на обрабатываемых материалах формируются высокоразвитые поверхности с большой удельной площадью контакта без каких-либо системно направленных рисок. При рассмотрении матовых поверхностей видно, что они испещрены большим количеством углублений - резервуаров, не связанных между собой. Это обстоятельство играет важную роль в нормальной работе уплотнений, так как известно, что любые дефекты уплотняемых поверхностей в виде канавок, риск являются каналами утечки жидкости, как при их движении, так и в состоянии покоя. Геометрия самих неровностей определяет износ и его вид при работе уплотнений.

По И.В. Крагельскому [4] характер и интенсивность износа контактирующих тел зависит от вида нарушения фрикционных связей. В зависимости от прочности связи, возникающей между эластомером и твердым телом, различают пять видов нарушения единичных адгезионных связей, из которых вытекают три основных вида износа:

- адгезионный, приводящий к своеобразному скатыванию или намазыванию поверхностного слоя эластомера на вал;
- абразивный, вызванный микрорезанием эластомера острыми выступами контактирующей с ним поверхности или частицами загрязнений;
- усталостный, вследствие многократного деформирования поверхностных слоев эластомера выступами неровностей контртела.

Продолжая рассмотрение влияния трения на работоспособность соединений, следует отметить, что существуют три вида трения: сухое, граничное, жидкостное. В

работах [1, 3, 5] рекомендуется при проектировании пар трения, в частности, контактных уплотнений, стремиться к обеспечению жидкостного, либо граничного трения. Оптимальным считается жидкостное трение, при котором между трущимися поверхностями существует слой смазки. Однако в этом случае при работе соединений увеличивается вероятность утечки жидкости из зоны контакта. Поэтому при разработке уплотнений, по условиям эксплуатации не допускающих утечек, стремятся к обеспечению граничного трения.

Разделение трения на сухое и граничное в большой мере условно. При малой толщине слоя смазки она меняет свои объемные свойства, в частности, теряет подвижность под влиянием молекулярного поля твердого тела. При определенной температуре и давлении существует критическая толщина пленки h_k , ниже которой скольжения между молекулярными рядами не будет. Это обстоятельство указывает на то, что поверхностные слои смазки на металле обладают особыми физическими свойствами, отличными от ее объемных свойств. Слои смазки с толщинами ниже критической способны выдерживать большие нормальные давления, не выходя за пределы упругости. Такие особые свойства граничного слоя называют свойствами квазитвердого тела [2]. Кроме того, что жидкостная пленка, разделяющая трущиеся поверхности, способствует уменьшению силы трения и температуры в зоне контакта, она также может сглаживать отрицательные динамические эффекты, возникающие при работе уплотнительных устройств [5]. Наличие динамических зазоров можно объяснить тем, что в результате погрешностей геометрической формы вала в радиальном сечении и несовпадении его геометрической оси с осью вращения, на контактной поверхности вала всегда имеется наиболее удаленная от оси вращения и наиболее напряженная точка. Место ее положения определяется радиус-вектором r_1

$$r_1 = r_0 + \delta + \Delta \phi, \quad (2)$$

где $\Delta \phi$ – отклонение геометрической формы вала; δ – расстояние между геометрической осью вала и осью его вращения; r_0 – радиус вала.

В зависимости от скорости перемещения конца радиус-вектора по контактной поверхности и от скорости релаксации напряжений в материале манжеты за движущейся контактной зоной возможно образование зазора, величина и время существования которого зависят как от указанных выше скоростей, так и от реологических свойств резины.

При эксцентричном расположении оси вращения вала относительно его геометрической оси поверхность вала совершает колебательные движения (радиальные биения) с амплитудой, зависящей от величины эксцентриситета. При этом кромки манжеты совершают прикосновение с поверхностью вала в результате эксцентриситета оси его вращения, двигаясь по овальной (эллиптической) траектории. Если кромка манжеты не успевает, в результате противодействия сил инерции и трения, а также недостаточной упругости уплотнительного элемента, следовать за поверхностью вала, то между нею и валом образуется зазор x , мгновенное положение которого будет меняться за один оборот вала на 360° . Возможность образования такого зазора и его величина определяются значениями эксцентриситета δ и угловой скорости вала ω , которая, как известно, входит в выражение для определения центробежной силы во второй степени. Уместно отметить, что некоторое небольшое радиальное биение вала оказывает положительное влияние на работу уплотнения, поскольку оно способствует образованию смазочной пленки. Толщина этой пленки в зависимости от нагрузки на

кромку и величины ее радиального биения равна, примерно, 0,2 - 0,4 мкм [1]. Также вполне возможно, при сухом трении и работе на малых скоростях, возникновение высокочастотных фрикционных автоколебаний, которые будут способствовать увеличению динамических зазоров при определенных интервалах скоростей.

К негативным факторам, влияющим на долговечность и качество работы манжетных уплотнений, можно отнести осевое биение вала. Ограничение величины осевого биения вала обусловлено тем, что риски на изношенной части вала могут при его осевых смещениях повредить рабочую уплотняющую кромку. Это еще раз доказывает преимущество матовых микрорельефов перед другими, так как матовые поверхности не имеют направленных следов обработки.

Как указывалось выше, матовые рельефы обладают большей гидроемкостью. Примеры использования этого положительного качества приведены в работах [6, 8]. С целью повышения надежности работы уплотнения, упрощения его конструкции и технологии изготовления, а также повышения срока его эксплуатации на контактные поверхности уплотнения струйным методом наносят развитый высококапиллярный, матовый микрорельеф с хаотично расположенными микровыступами и микровпадинами. Причем высота микронеровностей на одной из контактных поверхностей должна быть не менее чем в два раза меньше высоты микронеровностей на другой контактной поверхности.

Матовый микрорельеф способен удерживать жидкость под давлением. Свойство поверхностей удерживать жидкость имеет огромное значение при эксплуатации пар трения. В этом плане большой проблемой является так называемый «сухой старт». Другими словами, особенностью трения резиновых манжет является значительное увеличение коэффициента статического трения (иногда в 5 -10 раз) при длительной выдержке соединения под нагрузкой. Это явление «прилипания» поверхностей - результат постепенного увеличения фактической площади касания и выдавливания пленки жидкости из зоны контакта под нагрузкой, что приводит к значительному увеличению адгезии [1]. Логично предположить, что жидкость выдавливается из зоны контакта по каналам, образованным на сопрягаемых поверхностях абразивным инструментом при их изготовлении. Естественно, что матовая поверхность не имеет такого недостатка, так как ее микрорельеф представляет собой большое количество закрытых, не связанных между собой резервуаров. Соответственно, сопрягаемые матовые поверхности при длительной выдержке должны удерживать и препятствовать выдавливанию жидкости из зоны контакта, что, в свою очередь, должно уменьшить коэффициент статического трения и нивелировать явление адгезии. Обеспечение этих условий позволит уменьшить усилие страгивания, а также исключит возможность работы уплотнения в режиме сухого трения, тем самым уменьшая его износ.

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности повышения надежности работы гидромашин за счет использования предлагаемых технологических методов обработки контактных поверхностей соединений, обеспечивающих создание на них развитого гидроемкого микрорельефа. Полученные результаты переданы предприятиям, выпускающим элементы гидроприводов. В дальнейшем предполагается расширить область исследований на рассмотрение работы гидромашин с развитыми микрорельефами сопрягаемых поверхностей, эксплуатируемых в различных условиях.

Список литературы: 1. Голубев А.В., Кукин Г.И. Уплотнения вращающихся валов. –

М.: Наука, 1966. – 256 с. 2. Кондаков А.А. Уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1972. – 215 с. 3. Башта Т.М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 342 с. 4. Крагельский И.В. Трение и износ – М.: Машиностроение, 1968. – 342 с. 5. Онуфриенко И.П., Жура В.П. Некоторые технологические возможности повышения износостойкости контактной поверхности вала в уплотнительных узлах авиационных гидроагрегатов // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1972. - Вып.2. – С. 19-24. 6. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1989. – 277 с. 7. Проволоцкий А.Е., Лапшин С.П. Формирование развитых микрорельефов поверхностей // Резание и инструмент в технологических системах: Сборник науч.-техн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – Вып.66. – С. 153-162. 8. Проволоцкий А.Е., Лапшин С.П., Негруб С.Л. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин // Промислова гідроліка і пневматика: Всеукраїнський наук.-техн. журнал. – Вінниця: Вінницький державний аграрний університет. – 2004. – Вып.2(4). – С. 68-71.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ АГРЕГАТІВ

Проволоцький О.Є., Негруб С. Л., Лапшин С.П., Морозенко Р.Є.

Розглянуте питання застосування розвинутих микрорельєфів на прикладі оброблених поверхонь пар тертя ущільнюючих пристроїв.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Проволоцкий А.Е., Негруб С. Л., Лапшин С.П., Морозенко Р.Е.

Рассмотрен вопрос применения развитых микрорельефов на примере обработанных поверхностей пар трения уплотнительных устройств.

TECHNOLOGICAL INCREASE OF RELIABILITY OF HYDRAULIC AGGREGATES

Provolockij A.E., Negroob S.L., Lapshin S.P., Morozenko R.E.

The question of application of developed microrelief on the example of the treated surfaces of pair of friction of condense devices is considered.

Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.