

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Листопад И.А., к.т.н., доц., Ткаченко Д.И., к.т.н., доц.

*Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства имени Петра Василенко*

Рассмотрены технические аспекты совершенствования подшипников скольжения в поршневых двигателях внутреннего сгорания при использовании различных материалов для вкладышей и шеек коленчатых валов.

Введено. Выбор материала для изготовления подшипников скольжения для двигателей внутреннего сгорания является важным фактором повышения их надежности и увеличения их срока службы [1].

Известно, что для изготовления подшипников скольжения используется множество металлических сплавов на основе железа, меди, алюминия, магния, олова. Широкое применение в машиностроении получили металлокерамические материалы и пластмассы.

При работе ДВС вращение коленчатого и распределительного валов, в подшипниках скольжения присутствует трение. Для обеспечения надежной и продолжительной работы двигателя в подшипниках скольжения должны быть установлены оптимальные зазоры между трущимися поверхностями, которые должны быть заполнены масляным слоем.

Многочисленные исследователи до настоящего времени не установили оптимальные величины зазоров и толщины масляного слоя для конкретных двигателей и режимов их работы. Отсутствует также математическая модель, описывающая этот процесс.

При работе двигателя в его основных узлах возникают большие динамические нагрузки, которые могут превысить допустимые нормы величины износа подшипников скольжения и вывести двигатель из строя, что неоднократно случается в эксплуатационных условиях.

Возникает вполне обоснованная необходимость установления предельной величины износа подшипников скольжения, изготовленных из различных материалов. Необходимо также выяснить, как влияют, вкладыши из различных сплавов на износ сопряженных соединений, например с коленчатым валом.

Исследование. Как в украинской, так и зарубежной литературе много внимания уделяется исследованию надежности работы кривошипно-шатунного механизма двигателя. Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) двигателя является одним из основных элементов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Ввиду больших и резко импульсных нагрузок на кинематические узлы, КШМ во многом определяет надежность и межремонтный ресурс двигателя и затраты на его ремонт.

Увеличение меж ремонтного ресурса подшипников скольжения, а вместе

с ним и двигателя может существенно снизить эксплуатационные затраты и себестоимость машин и механизмов, использующих ДВС.

Решения проблемы. В подшипнике скольжения поверхность втулки вала и опорной поверхности подшипника образует фрикционный контакт, в котором возникает, в зависимости от условий работы один из видов трения – жидкостное, граничное либо полусухое или даже сухое трение.

Подшипники КШМ двигателя конструируются на работу в условиях жидкостного трения [1]. Однако большие и импульсные нагрузки, передаваемые от поршня, не всегда позволяют обеспечить жидкостное трение, и, в некоторые моменты, в кинематическом узле может возникать граничное или даже полусухое трение. Работа подшипников кинематического механизма многоцилиндровых двигателей усугубляется еще и тем, что при применении типовых систем смазки не все подшипники находятся в равных условиях смазки.

Особо в тяжелых условиях работают подшипники нижних головок шатунов, на которые резко воздействуют импульсные силы от поршня, к тому же, смазка к ним, поступает по сложному маршруту через коренные подшипники коленчатого вала и каналы в валу. В таких условиях работа подшипника происходит с повышенным изнашиванием фрикционной поверхности, в первую очередь, опорной поверхности вкладыша.

При большом износе, когда зазор между втулкой вала и вкладышем достигает предельной величины, резко нарушаются условия смазки, подшипник переходит в режим полусухого трения и во избежание лавинообразного характера изнашивания, двигатель должен быть выведен в ремонт для замены вкладышей а, возможно, и для обработки шеек вала под очередной ремонтный размер.

В настоящее время большинство двигателестроительных заводов стран СНГ применяет подшипники с быстро заменяемыми вкладышами производства ЗМЗ с усиленной опорной поверхностью вкладыша, выполненной из алюминий-оловянного сплава.

Эксплуатационные исследования показали, что ресурс подшипников скольжения такого типа увеличивается до 15-40 тыс. мото-часов в зависимости от типа двигателя и условий его эксплуатации.

Известно, что долговечность подшипников скольжения зависит от множества факторов, внешних и внутренних (рис. 1).

Теория показывает, что гидродинамическое давление может развиваться только в клиновом зазоре (рис. 1). Толщина масляного слоя зависит от угловой скорости и вязкости масла. Чем выше эти параметры, тем больше h . Но с увеличением радиальной нагрузки F_r на цапфу 2 толщина масляного слоя h уменьшается. При установившемся режиме работы двигателя толщина h масляного слоя должна быть больше суммы микронеровностей цапфы R_{z1} и вкладыша R_{z2} , (рис. 1).

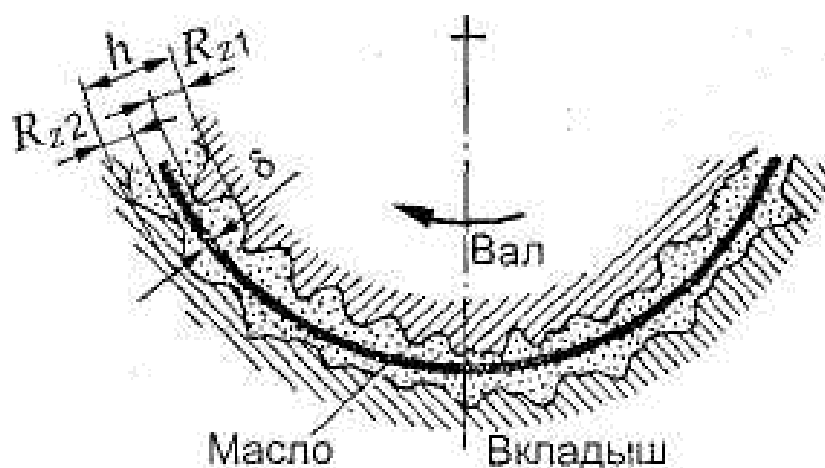


Рис. 1 – Масляный слой при установившемся режиме работы двигателя

Выходными факторами процесса являются сила трения и интенсивность изнашивания. Эти два выходных фактора между собой связаны прямой зависимостью, чем больше сила трения, тем выше интенсивность изнашивания при прочих равных условиях.

Следовательно, выходные факторы определяют качество подшипника.

Рассмотрение факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие трущихся тел, показывает, что ряд из них задаются условиями работы подшипника в ДВС. Так, нагрузка от поршня и скорость скольжения определяются типом двигателя, конструктивными его характеристиками и особенностями режима эксплуатации.

Промежуточная среда задается конструкцией системы смазки, свойствами масла и качеством изготовления сопряженных поверхностей. Шероховатость характеризуется качеством механической обработки шеек валов и опорной поверхности вкладышей, т.е. определяется технологией производства этих деталей.

Такие факторы, как природа трущихся тел, их структура, механические свойства, свойства пленок на поверхности, наличие и накопление дислокаций зависят от материала фрикционной пары.

При этом отметим, что в кинематическом механизме ДВС вал, как правило, выполняется из стали, или из легированного чугуна. Основные свойства втулок валов из этих материалов задаются по требованиям прочности и жесткости вала.

С точки зрения работы вала как втулки в паре трения производится поверхностное упрочнение шеек вала одним из методов (закалка, цементация, азотирование, цианирование или т.п.).

По этой причине влияние на свойства фрикционного контакта со стороны втулки вала ограничены.

Поэтому основные возможности влиять на параметры фрикционного контакта заключаются в основном в свойствах опорной поверхности подшипника или его факторов.

Таблица 1 - Факторы характеризующие подшипники скольжения

Входные факторы	Внутренние факторы		Выходные факторы (характеризуют качество подшипника скольжения)
Природа трущихся тел	Шероховатость	Структура	Сила трения
Промежуточная среда			
Нагрузка радиальная	Свойства пленок	Механические свойства материала	Интенсивность изнашивания
Скорость скольжения			
Температура	Тепловыделение при трении	Накопление температуры	

Решение проблемы. Из теории подшипников [2, 3] следует, что сила трения и интенсивность изнашивание поверхности трения в большой степени зависит от взаимодействия материалов во фрикционном контакте трущихся деталей.

Одним из основных процессов, нарушающих работу подшипника, является схватывание материалов.

Схватывание происходит при любых температурах и не зависит от времени контакта поверхностей, но оно интенсифицируется при повышении температуры.

Поэтому интенсивный отвод тепла от локальных зон, в которых происходит граничное или полусухое трение с выделением тепла, является одним из основных требований для работы подшипников скольжения.

Принимая температуру плавления материала как предельную, при которой схватывание может развиваться лавинообразно, был сформулирован параметр термической стойкости подшипника и определены его численные значения (табл. 2). Параметр термической стойкости представляет собой произведение коэффициента теплопроводности на температуру плавления.

Для удобства сравнения материалов между собой была принята относительная величина параметра термической устойчивости. При этом относительная величина рассматривалась в двух вариантах, при принятии за исходную базу баббит, как классический материал подшипников скольжения, базу алюминиево-оловянный сплав, используемый в стандартных подшипниках скольжения для выполнения опорных поверхностей вкладышей. Рассматривая результаты такого сравнения (табл. 2), можно видеть, почему был применен алюминиево-оловянный сплав при изготовлении стандартных вкладышей. У него параметр термической устойчивости в девять раз превышает таковой для баббита.

Учитывая невысокую цену металлов для изготовления таких вкладышей, а также отработанную технологию массового их производства, заключающуюся в совместной прокатке биметаллической ленты (стальная подложка и алюминиевый сплав в качестве опорной поверхности вкладыша), можно понять, почему такие вкладыши нашли широкое применение в двигателестроении.

Из таблицы также следует, что алюминиево-оловянный сплав обладает

далеко не предельными свойствами, обеспечивающими термическую устойчивость подшипников скольжения. Медь в чистом виде обладает показателем термической устойчивости в три раза более высокой, чем алюминиево-оловянный сплав и в 28 раз более высокой по сравнению с баббитом.

При этом все другие цветные металлы в чистом виде (алюминий, магний, кремний, свинец, олово), а также сплавы на основе меди – латунь и бронза не имеют преимуществ не только перед медью, но и перед алюминиево-оловянным сплавом, так как у них значение параметра термической устойчивости значительно меньше.

Даже такой металл, как серебро, обладающий в природе наиболее высокой теплопроводностью, имеет параметр термической стойкости только на 4% превышающий значение для меди, но, что естественно, по стоимости он несоизмеримо более дорогой.

Таблица 2 - Параметры термической стойкости для различных материалов опорной поверхности подшипников скольжения

Материал опорной	Коэффициент теплопроводности (в диапазоне температур до 200 ⁰ C) λ , Вт/(м. К)	Температура плавления, t ⁰ C	Параметр термической стойкости		
			$(\lambda \times t)$, Вт/м	Относительный параметр термической стойкости, %	
				База баббит	База алюминиево-оловянный сплав
Олово (Sn)	65	232	1 5 080	100,5	10,5
Свинец (Pb)	35	323	11 305	75	7,8
Баббит	50		15000	100	10,5
Бронза (90% Cu, 10% Sn)	43,74	900	39 366	262,2	17,2
Латунь (90%Cu, 10% Zn)	106,92	900	96 228	641,5	66,9
Кремний (Si)	55	936	51 480	343,2	35,8
Магний (Mg)	167	651	102 207	681,4	71,1
Алюминий (Al, чистый)	209	657	137 313	915,4	95,6
Алюминиево-оловянный сплав (Sn-20%)	239,36	600	143 616	957,5	100
Медь (Cu)	390	1083	422 370	2815,8	294,1
Серебро (Ag)	415	1063	441 145	2941,0	307,2

Другие свойства меди, такие как твердость, пластичность, наличие пленки окисла по твердости мало отличающейся от твердости основного металла, технологичности обработки (возможность прокатки, штамповки), также показывают целесообразность использования меди для выполнения

опорных поверхностей подшипников скольжения.

Этот результат позволяет сделать вывод, что подшипники с медными вкладышами позволяют существенно повысить качество подшипников скольжения.

С целью подтверждения этого вывода для подшипников скольжения кинематических механизмов ДВС было проведено экспериментальное определение интенсивности изнашивания подшипников на машине трения.

Методика эксперимента подбиралась таким образом, чтобы испытание проводилось в близких к реальным условиям эксплуатации подшипника в механизме ДВС, но при этом в ускоренном режиме [4], для этого использовался корпус стандартного подшипника шатуна при диаметре шейки вала 50 мм и шириной 25 мм.

Радиальная нагрузка на подшипник задавалась равной 250 Н, что создавало на подшипнике удельную нагрузку 250 кг/см^2 , близкую по величине, возникающей в реальных условиях в ДВС.

Но нагрузка воздействовала во время опыта постоянно, и только на одну сторону подшипника.

По расчету режима работы подшипника под заданной нагрузкой в машине трения в течение 220 ч подшипник СА алюминиевым вкладышем, произошло одностороннее изнашивание, соответствующее работе подшипника в реальном двигателе при импульсной нагрузке за 1500 мото-часов.

Первая серия опытов на машине трения проводилась с установленными алюминиево-оловянными вкладышами. В этой серии опытов было подтверждено, что процесс изнашивания подшипника происходит по классической зависимости.

За время 8-10 ч происходит приработка фрикционного контакта, после чего наступает стабильный режим изнашивания с интенсивностью 0,0002 г/ч или в объемных единицах $0,000074 \text{ см}^3/\text{ч}$.

После работы подшипника под нагрузкой в течение 230 ч интенсивность изнашивания резко возрастает, процесс переходит в режим ускоренного изнашивания.

Переход с режима стабильной работы на режим ускоренного изнашивания произошел при потере массы вкладыша 0,08 г, при которой радиальный зазор в подшипнике достиг предельной допустимой величины 0,15 мм.

Отметим, что именно величина зазора в подшипнике определяет его ресурс, так как при увеличении зазора сверх допустимой техническими условиями величины, нарушается режим образования масляного клина, обеспечивающего жидкостное трение.

Другая серия опытов проводилась в тех же условиях, но с медными вкладышами.

Обработка результатов опытов этой серии показала, что изнашивание происходит с интенсивностью 0,000135 г/ч, или в объемных единицах $0,000015 \text{ см}^3/\text{ч}$, т.е. по объемным величинам, в 5,0 раза менее интенсивно, чем для алюминиевого вкладыша.

При этом режим интенсивного изнашивания не был достигнут. Сравнительные данные работы подшипника с медными вкладышами и стандартными подшипниками с алюминиево-оловянной поверхностью скольжения проводилось по относительной величине зазора, принимая за 100% условия, которые создаются после приработки подшипника.

На рис. 2 приведены сравнительные изменения относительной и максимальной (в%) величин зазора в стандартном подшипнике и подшипнике с медными вкладышами.

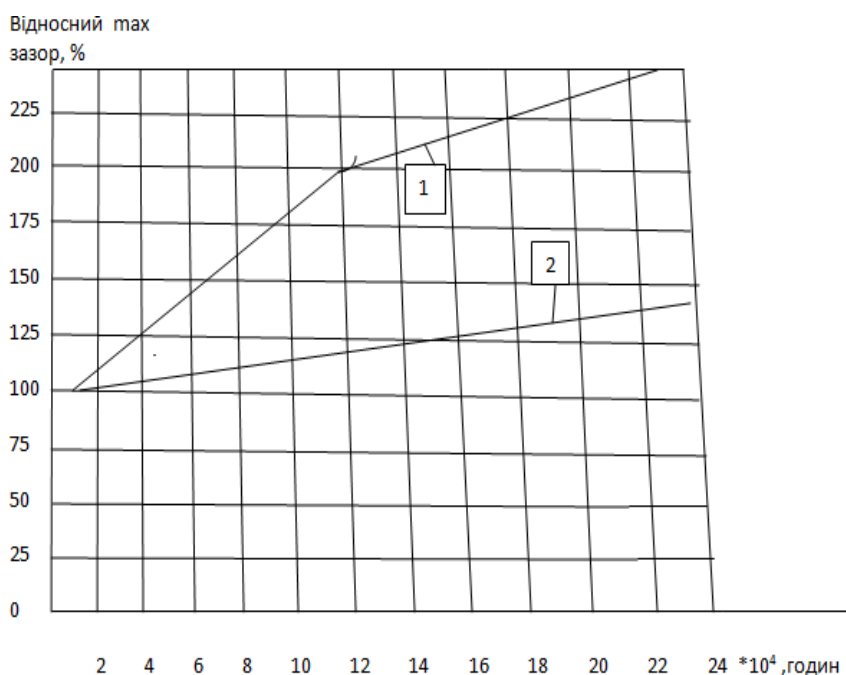


Рис. 2 – Сравнение изменения относительной максимальной величины зазора в подшипнике от времени работы подшипника в режиме стабилизировавшегося процесса изнашивания:

1 – стандартный подшипник с вкладышем с алюминиево-оловянной скользящей поверхностью; 2 – медный вкладыш.

Результаты. Графики на рис. 2 наглядно показывают, что у подшипника с медными вкладышами увеличение максимального зазора происходит с существенно меньшей скоростью.

Расчет по данным эксперимента показывает, что предельный максимальный зазор в подшипнике на машине трения может быть достигнут только после примерно 2 тыс. ч работы подшипника под нагрузкой, или в условиях работы в реальном ДВС через 14 000 ч.

Анализ полученных результатов показал, что замена рядом четырех цилиндрических двигателях алюминиевых вкладышей на медные увеличивает стоимость двигателя всего на 3 %, однако межремонтный период при этом увеличивается почти в десять раз за счет уменьшения затрат на ремонт. Снижаются также эксплуатационные расходы на ремонт, в расчете на 1 час эксплуатации, с 1,8 грн./ч до 1,9 грн./ч или более чем в восемь раз.

Кроме рассмотренного основного мероприятия по повышению качества подшипников скольжения, заключающегося в использовании вкладышей из

меди. Рассматривались также другие методы повышения качества. В частности внедрение графита в поверхность скольжения.

Графит, имея чешуйчатую структуру кристаллов, создает на поверхности твердого материала микрослой кристаллов графита. При возникновении радиальных нагрузок, превышающих способность слоя смазки разделять скользящие поверхности, либо при нарушении подачи смазки или потере маслом смазывающих свойств, в т. ч. в период запуска двигателя, графит играет роль твердой смазки, исключая схватывание металлических поверхностей.

Вполне естественно, лучшим вариантом для этого является применение порошковой технологии [3].

Поскольку применение порошковой технологии оправдано при серийном ее использовании, в опытах внедрение графита выполнено путем засверливания на поверхности вкладыша лунок и заполнения их твердеющей пастой на основе жидкого стекла.

Другой метод повышения качества подшипников заключается в предварительном нанесении меди на шейки вала. При этом возникает пара трения медь/медь и при перегрузках подшипника возможно возбуждение и избирательного переноса снижающего силу трения и уменьшающее изнашивание поверхностей [5].

Оба эти метода не проявились существенно в режиме нормальной работы подшипников. Результаты процесса изнашивания в них не отличались от результатов серии опытов с медными вкладышами, положительный эффект был, но с незначительным отклонением.

Но при увеличении нагрузки на подшипник в два раза до 500 Н не произошло резкого увеличения интенсивности изнашивания.

Следовательно, эти методы можно рассматривать только как дополнительные ступени защиты подшипников на нерасчетных режимах, когда они проявляются положительно.

На основании полученных результатов разработан предварительный регламент линии по мелкосерийному производству медных вкладышей для ремонтных предприятий, специализирующихся на ремонте двигателей внутреннего сгорания. В качестве информации следует добавить, что Казахстан является одним из крупнейших производителей меди.

Поэтому организация производства медных вкладышей из отечественной меди существенно повышает качественные показатели подшипников скольжения для ДВС и их экономические показатели, что позволит республике не только обеспечить свой транспорт качественной продукцией, но и выйти на международный рынок с высококачественной и конкурентоспособной продукцией двигателестроения, производимой на предприятиях республики из отечественного сырья.

Заключение. На основе анализа свойств материалов для подшипников скольжения получено, что применяемые в настоящее время стандартные подшипники скольжения для ДВС обладают ограниченными качественными показателями и не обеспечивают ресурса работы двигателя.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных

исследований получено, что лучшим материалом для подшипников скольжения является медь.

Подшипники с применением меди обеспечивают увеличение межремонтного ресурса двигателя в семь-восемь раз.

Величина затрат на ремонт двигателя в расчете на один час эксплуатации при использовании медных подшипников снижается более чем в восемь раз.

Медные подшипники обладают дополнительными возможностями улучшения их свойств. Это возможно при применении и внедрении графита в медную основу подшипника (применение меднографита), а также предварительного омеднения шейки вала фрикционным методом.

Полученные дополнительные мероприятия проявились в экстремальных условиях, при превышении радиальной силы на подшипник, либо при нарушении условий смазки, в том числе в пусковом режиме двигателя. Таким образом, применение меди в конструкции подшипников скольжения существенно повышает их качество.

Список использованных источников

1. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М.: Машиностроение. 1959, - 186 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968, - 480 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М. Машиностроение. 1989, - 327 с.
4. Кугель Р.В. Испытание на надежность машинных элементов. М.: Машиностроение. 1982. - 181 с.
5. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. Под редакцией Гаркунова Д.Н. – М.: Машиностроение. 1977, - 121 с.

Анотація

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Листопад И., Ткаченко Д.

Рассмотрены технические аспекты совершенствования подшипников скольжения в поршневых двигателях внутреннего сгорания при использовании различных материалов для вкладышей и шеек коленчатых валов.

Abstract

RESEARCH AND SOVERSHENSTVOVANIE PLAIN BEARINGS COMBUSTION ENGINES

I. Listopad, D. Tkachenko

Examine the technical aspects of improving the bearings in reciprocating internal combustion engines using different materials for vkladishey and journals of crankshafts.