

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

EXPLORATION AND PERFECTING OF SLIDE BEARING FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Канд. техн. наук Некрасов В.Г.¹, Инж. Куанышев М. К.¹, Акад. Надиров Н.К.²,
Актюбинский государственный университет им. К. Жубанова, Актюбе, Казахстан¹,
Национальная инженерная академия Республики Казахстан, Алматы, Казахстан².

Abstract: The results of the study slides bearing of kinematics mechanism of the of internal combustion engines are brought in article. It is brought features material for fabrication bearing slides. The parameter of thermal stability of the bearing is applying for quantitative estimation of quality. It is shown that copper bearings have a most high quality. It is brought results of the experimental studies bearing. It is received that bearings from copper have small intensity of destroy. The copper bearings provide increase the resource of the engine in eight once and reduce expenditure for repair of the engine.

KEYWORDS: INTERNAL COMBUSTION ENGINE, KINEMATICS MECHANISM, SLIDE BEARING, COPPER, RESURCE OF ENGINE

Введение

Механизм преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение вала является одним из основных элементов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Ввиду больших и резко импульсных нагрузок на кинематические узлы механизма преобразования движения, характерных для работы поршневого двигателя внутреннего сгорания, в качестве подшипников в таком механизме используются подшипники скольжения, способные воспринимать достаточно большие удельные нагрузки. Надежность и ресурс кинематического механизма преобразования движения во многом определяет межремонтный ресурс двигателя и затраты на его ремонт. Увеличение межремонтного ресурса подшипников скольжения может существенно снизить эксплуатационные затраты и снизить себестоимость производимой продукции или услуги, выполняемой при помощи машин и механизмов, использующих ДВС.

2. Предпосылки для 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 трение. Подшипники кинематического механизма ДВС 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 ДВС 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 кривошипные подшипники – нижние подшипники шатунов, на которые воздействуют резко импульсные силы от поршня, а также смазка к ним поступает по сложному маршруту через коренные подшипники коленчатого вала и каналы в валу. В таких условиях работа подшипника происходит с постоянным 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 перешлифовки шеек вала на новый ремонтный размер.

В настоящее время большинство двигателестроительных заводов стран СНГ применяет подшипники с быстро заменяемыми вкладышами производства ЗМЗ с опорной поверхностью вкладыша, выполненной из алюминиево-оловянного сплава. На практике получено, что ресурс подшипников скольжения такого типа составляет 1500-4000 мотор-часов в зависимости от типа двигателя и условий его эксплуатации.

На работу подшипника скольжения влияет серия факторов, которые можно подразделить на внешние и внутренние (рис. 1). Выходными факторами 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 и скорость скольжения определяются типом двигателя, конструктивными его характеристиками и особенностями режима эксплуатации. Промежуточная среда задается конструкцией системы смазки и свойствами масла. Шероховатость характеризуется качеством механической обработки шеек вал 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 стальным, 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 контракта заключаются в основном в свойствах опорной поверхности подшипника, или его вкладышей.

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	Интенсивность изнашивания
Скорость скольжения			
Температура	Тепловыделение при трении	Накопление вакансий	

Рис.1. Схема действия факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие твердых тел.

3. Решение проблемы

Из теории подшипников [2, 3] следует, что сила трения и интенсивность изнашивания 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. 1). 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 базу баббита как классического варианта подшипника скольжения. А также при принятии за базу алюминиево-оловянного сплава, используемого в стандартных подшипниках скольжения для выполнения опорных поверхностей вкладышей.

Рассматривая результаты такого сравнения (табл. 1), можно видеть, почему был применен алюминиево-оловянный сплав для выполнения 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 совместном прокатке биметаллической ленты (стальная подложка и алюминиевый сплав в качестве опорной поверхности вкладыша), можно понять, почему такие вкладыши нашли широкое применение в двигателестроении.

Таблица 1. Параметры термической стойкости для различных материалов опорных поверхностей подшипников скольжения

Материал опорной поверхности подшипника	Коэффициент теплопроводности (в диапазоне температур до 200°C) $\lambda, \text{Вт/(м.К)}$	Температура плавления, $t^{\circ}\text{C}$	Параметр термической стойкости		
			$(\lambda \times t),$ Вт/м	Относительный параметр термической стойкости, %	
				База - баббит	База - алюминиево- оловянный сплав
Олово (Sn)	65	232	15 080	100,5	10,5
Свинец (Pb)	35	323	11 305	75	7,8
Баббит	50	300	15 000	100	10,5
Бронза (90% Cu, 10% Sn)	43,74	900	39 366	262,4	27,4
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

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, как 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.

Другие свойства меди, 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 дает возможность существенно повысить качество подшипников скольжения.

Для 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 проводились близких к реальным условиям эксплуатации подшипника в механизме ДВС, но при этом в ускоренном режиме [4]. Для этого использовался корпус стандартного подшипник 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/см², близкую по величине, возникающей в реальных условиях в ДВС. Но нагрузка воздействовала во время опыта постоянно, а также только на одну сторону подшипника. По расчету в таком режим работы подшипника под нагрузкой в машине трения в течение 214 ч на подшипнике с алюминиевым вкладышем произойдет одностороннее изнашивание, соответствующее работе подшипника в реальном двигателе при импульсной нагрузке за 1500 мотор-часов.

Первая серия опытов на машине трения проводилась со стандартными 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 см³/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 увеличению 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 показала, что изнашивание происходит с интенсивностью 0,000135 г/ч, или в объемных единицах 0,000015 см³/ч, т.е. по объемным величинам в 4,9 раза менее интенсивно, чем для алюминиевого вкладыша. При этом режим интенсивного изнашивания достигнут не был.

Сравнительные данные работы подшипника с медными вкладышами и стандартного подшипника с алюминиево-оловянной поверхностью скольжения проводилось по относительной величине зазора, принимая за 100% условия, которые создаются после приработки подшипника. На рис. 2 показано сравнение изменения относительной (в %) максимальной величины зазора в стандартном подшипнике и в подшипнике с медными вкладышами.

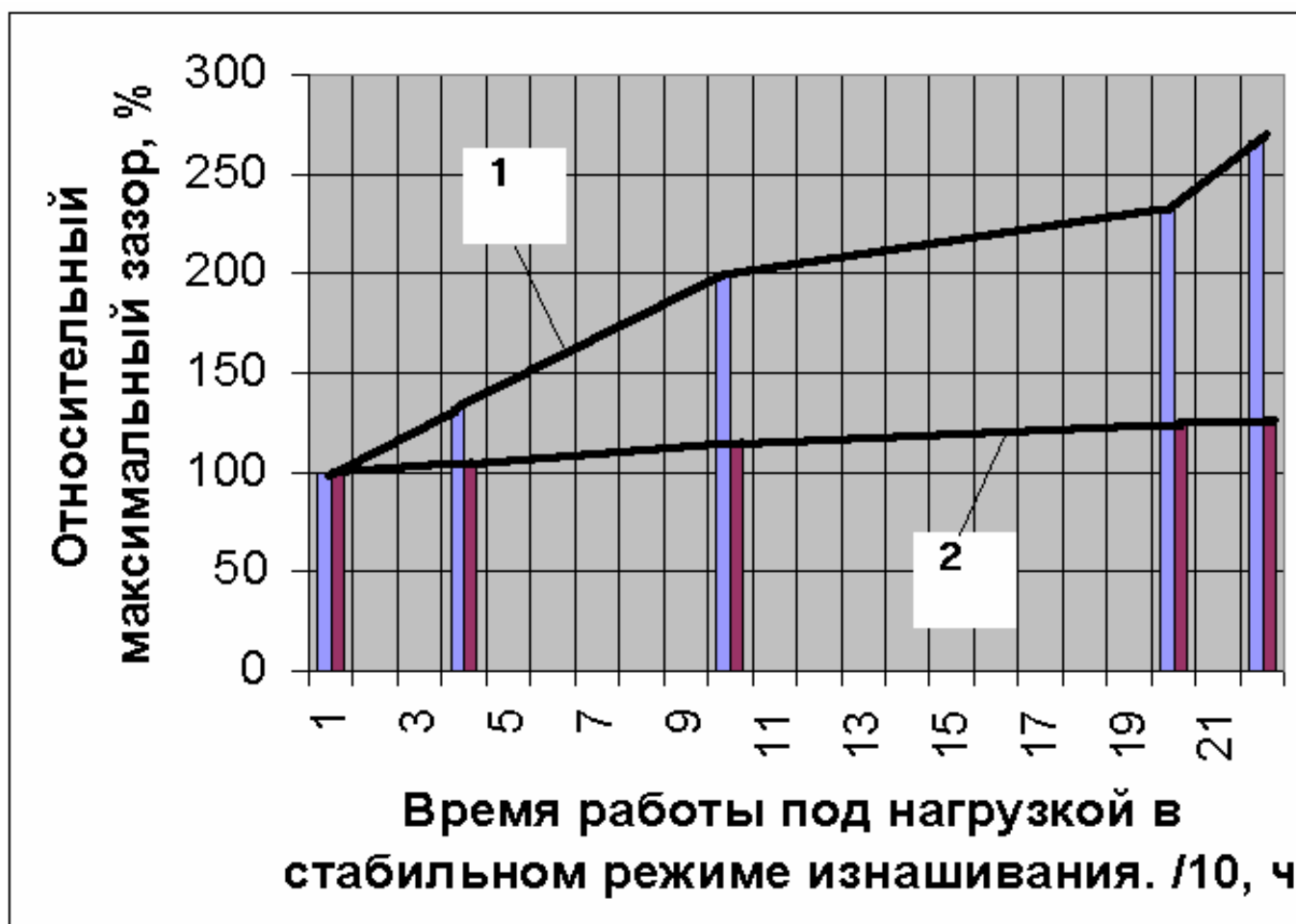


Рис. 2. Сравнение изменения относительной максимальной величины зазора в подшипнике от времени работы подшипника в режиме стабилизированного процесса изнашивания: 1 — стандартный подшипник с вкладышем с алюминий-оловянной скользящей поверхностью; 2 — медный вкладыш.

4. 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.

Были оценены экономические показатели замены алюминиевых вкладышей на медные. Стоимость рядного четырехцилиндрового двигателя за счет применения комплекта медных вкладышей увеличивается только на 2-3 %. Но увеличение межремонтного периода почти в десять раз за счет уменьшения затрат на ремонт снижает эксплуатационные расходы на ремонт в расчете на 1 час эксплуатации с 0,22 долл./ч до 0,025 долл./ч или более чем в восемь раз.

Кроме рассмотренного основного мероприятия по повышению качества подшипников скольжения, заключающегося в выполнении 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 меднении шейки вала. При этом возникает пара трения медь/медь и при перегрузках подшипника возможно возбуждение избирательного переноса снижающего силу трения и уменьшающее изнашивание [5]. Оба эти метода не проявились существенно в режиме нормальной работы подшипника. Результаты процесса изнашивания в них отличались от результатов серии опытов с медными вкладышами положительным эффектом, но с незначительным отклонением. Но при увеличении нагрузки на подшипник в два раза до 500Н не произошло резкого увеличения интенсивности изнашивания. Следовательно, эти методы можно рассматривать только как дополнительные степени защиты подшипники в 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.

Казахстан является одним из крупнейших производителей меди. Поэтому организация производства медных вкладышей из отечественной меди, существенно повышающих качественные показатели подшипников скольжения ДВС и их экономические показатели, позволит республике не только обеспечить свой транспортный сектор качественной продукцией, но и выйти на международный рынок с высококачественной и конкурентноспособной продукцией двигателестроения, производимой на предприятиях республики из отечественного сырья.

5. Заключение

На основе анализа свойств материалов получено, что при меняемые в настоящее время стандартные подшипники скольжения для кинематических механизмов преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное в двигателях внутреннего сгорания обладают ограниченными качественными показателями, не обеспечивающими большого ресурса работы двигателя. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получено, что лучшими показателями обладает 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 внедрения графита в медную основу подшипника (применение меднографита), а также предварительного омеднения шейки вала фрикционным методом. Эти дополнительные мероприятия проявляются 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.

6. Литература

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 машин и их элементов. М. Машиностроение, 1982, 181 с.
5. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. Под редакцией Гаркунова Д.Н. М. Машиностроение, 1977, 121.