

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Автомобильно-дорожный институт
Кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта»

Согласовано:

Декан АДИ

Ю.В. Родионов

(подпись, инициалы, фамилия)

число месяц год

Утверждаю:

Зав. кафедрой

Ю.В. Родионов

(подпись, инициалы, фамилия)

число месяц год

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Студенту гр. ЭТМК-21М _____ Гурьянова Романа Евгеньевича _____

Тема ВКР Совершенствование технологических процессов
восстановления основных элементов двигателей по их техническому
состоянию

утверждена приказом по ПГУАС № 06-09-332 от 01 12 2016 г.
число месяц год

ВКР представляется к защите 23 июня 2017 года
число месяц год

Научный руководитель ВКР _____
подпись дата инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____
(Ф.И.О. студента)

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа
на тему «Совершенствование технологических процессов восстановления
основных элементов двигателей по их техническому состоянию»

Пояснительная записка на _____ с.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
2017 г.

В данной магистерской работе произведено совершенствование технологических процессов восстановления основных элементов двигателей по их техническому состоянию.

Разработаны методология и комплекс измерительных средств для оценки показателей технического состояния основных элементов двигателей и оборудование для их восстановления.

Разработанные методы и измерительные устройства для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей ресурсопределяющих деталей позволяют повысить качество дефектовки и сборки деталей после замены вкладышей без ремонта).

Усовершенствованы технологические процессы восстановления ресурсопределяющих деталей на основе дефектовки по макрогеометрическим показателям. Основное внимание при восстановлении уделяется устранению макрогеометрических отклонений с использованием процесса электролитического железнения и созданию на трущихся сопряжениях плакирующего медного покрытия, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задиры шеек при критических условиях смазки.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобилестроение – одна из ведущих отраслей машиностроительного комплекса – является системообразующим элементом экономики, влияющим на уровень и качество жизни. Развитие грузового автомобильного транспорта оказывает существенное влияние на деятельность всех отраслей экономики страны, обеспечивая перевозки в перерабатывающей промышленности, сельском хозяйстве, торговле и других отраслях.

Настоящая работа посвящена обоснованию технологических методов и средств повышения долговечности основных элементов двигателей, а также реализации положительных решений, полученных при исследованиях.

Цель работы – повышение долговечности автомобильных двигателей и снижение затрат на обеспечение их работоспособности, путем совершенствования технологических процессов восстановления основных деталей двигателей по их техническому состоянию.

1. Обобщить и развить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки.

2. Обобщить и развить закономерности формирования свойств поверхности деталей при восстановлении.

3. Разработать методологию и измерительный комплекс для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей основных деталей двигателей, вследствие их напряженно-деформированного состояния.

4. Экспериментально проверить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки в эксплуатационных условиях и получить их параметры для установления предельного состояния.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ дефектов основных элементов деталей двигателя КамАЗ-740

1.1.1 Анализ дефектов коленчатого вала

Коленчатый вал (КВ) (рис.1.9) работает в 8-цилиндровом v-образном двигателе КамАЗ и его модификациях, которые устанавливаются на грузовые автомобили и самосвалы КамАЗ, а также на тракторы ХТЗ, Т150, комбайны «Дон», «Полесье» и стационарные энергетические установки [1].

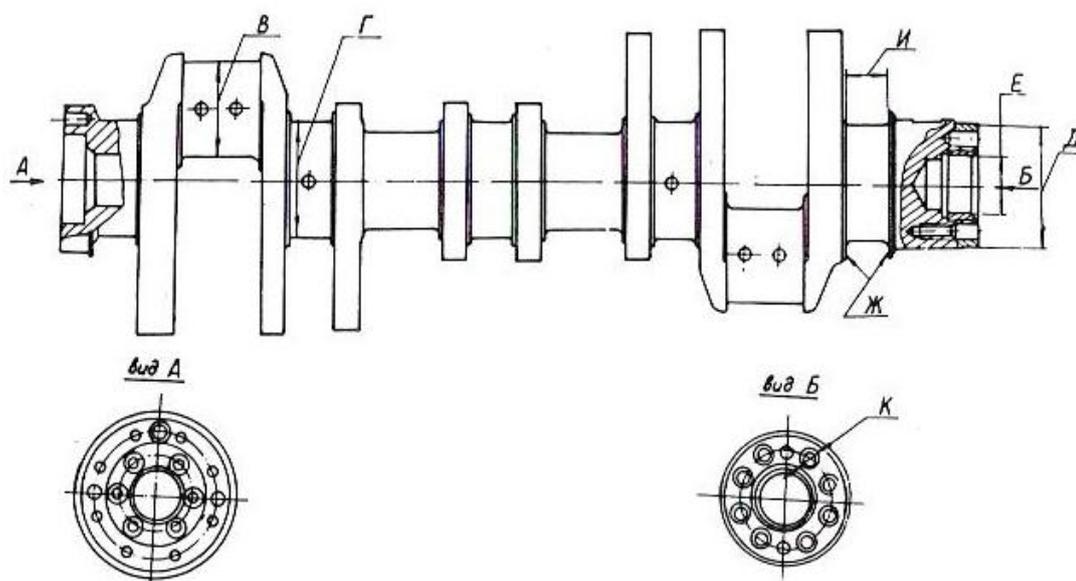


Рис. 1.1. Коленчатый вал двигателя КамАЗ-740

Мощность двигателя 154 кВт (210 л.с.) при номинальной частоте вращения коленчатого вала 2600 мин^{-1} ; максимальный крутящий момент на коленчатом вале $637 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($65 \text{ кг}\cdot\text{м}$) при частоте вращения коленчатого вала $1600-1800 \text{ мин}^{-1}$ [2, 1].

Коленчатый вал – одна из основных деталей двигателя, определяющая его ресурс, наиболее сложная в конструктивном отношении и наиболее напряженная деталь, воспринимающая периодические нагрузки от сил давления газов, сил инерции и их моментов. Действие этих сил и моментов приводит к возникновению в материале коленчатого вала значительных напряжений скручивания, изгиба и растяжения – сжатия. Кроме того, периодически изменяющиеся моменты вызывают крутильные колебания вала, которые создают дополнительные напряжения кручения.

Заготовки коленчатых валов выполняются ковкой из стали 42 ХМФА ТУ 14-1-1296-75. Материал для изготовления коленчатых валов поставляется не термообработанный в прутках (НВ 255-277), химический состав представлен в табл. 1.1 [1].

Т а б л и ц а 1.1

Химический состав стали 42 ХМФА

Наименование материала	Содержание, %
углерод	0,40-0,45
кремний	0,27-0,37
марганец	0,5-0,8
ванадий	0,08-0,12
хром	1,0-1,8
молибден	0,35-0,45
сера	0,01-0,035
фосфор	0,025
медь	0,35
никель	0,3
железо	остальное

Свойства стали, из которой формообразуется заготовка коленчатого вала, исследуемые на образцах, должны соответствовать требованиям завода изготовителя, которые представлены в табл.1.2 [1].

Т а б л и ц а 1.2

Наименование параметра	Направление волокон проката	
	продольное	поперечное
Временное сопротивление, МПа	880	880
Предел текучести, МПа	730	730
Относительное удлинение, %	12	7
Относительное сужение, %	55	35
Ударная вязкость, МПа	100	60
Предел усталости на изгиб, МПа	360	320

Коленчатый вал имеет пять коренных и четыре шатунных шейки. Коренные и шатунные шейки коленчатых валов закалены ТВЧ НРС (52...62).

Номинальный и ремонтные размеры шеек коленчатых валов и другие показатели геометрических и поверхностных свойств нового и восстановленного коленчатых валов представлены 1.3 [1].

Таблица 1.3

Наименования параметров	Значения параметров	
	нового	восстановленного
1. Диаметр коренных шеек, мм 1-го ремонтного размера 2-го ремонтного размера 3-го ремонтного размера 4-го ремонтного размера	95,0-0,015	95,0-0,015 94,5-0,015 94,0-0,015 93,5-0,015 93,0-0,015
2. Шероховатость цилиндрической части, мкм	0,20	0,16
3. Ширина коренных шеек, мм 1,2,3,4,5 1-го ремонтного размера 1,2,3,4,5	36 – 0,17	36 +0,20 -0,17 36,5 +0,05 36,5 + 0,05
4. Радиус галтелей коренных шеек, мм 1,2,3,4,5	3± 0,15	3±0,15
5. Диаметр шатунных шеек: 1-й ремонтный размер 2-й ремонтный размер 3-й ремонтный размер 4-й ремонтный размер	80 – 0,015	80 – 0,015 79,5-0,013 79,0 -0,013 78,5 – 0,013 78,0-0,013
6. Шероховатость цилиндрической части, мм	0,20	0,16
7. Ширина шатунных шеек	67±0,12	67+0,22
8. Радиус галтелей	4±0,15	4±0,15
9. Ширина щек, мм 1 и 8 2,3,4,5. 6,7 Масса, кг	36,3-0,4 27,4 26,6 69,5	

Анализ технического состояния коленчатых валов, поступивших с двигателями КамАЗ-740 в капитальный ремонт, исследовали на ЗАО «Ремдизель» [1].

Дефекты коленчатых валов и коэффициенты их повторяемости приведены в табл.1.4 и 1.5.

Т а б л и ц а 1.4

Наименование дефекта	Количество КВ, имеющих дефекты	Коэффициент повторяемости дефектов
1. Проворот, задир коренных или шатунных шеек, а также их аварийный износ, (прВ)	124	0,220
2. Деформация КВ выше допустимой (биение 3-й коренной шейки более 0,03 мм) (Б)	385	0,690
3. Трещины на коренных и шатунных шейках (ТрШ)	40	0,070
4. Износ шеек более 4-го ремонтного размера (Ипр)	8	0,015
5. Трещины на торцах вала (ТрТ)	21	0,040
6. Ослабление посадки, смятие штифтов и разрушение резьбовых отверстий под болты крепления маховика (ШтБ)	104	0,190
7. Разрушение резьбы М10 под полумуфту отбора мощности (РМ10)	12	0,210
8. Износ или повреждение поверхности (диаметр 125 (И125))	1	0,002
9. Износ гнезда подшипника более диаметра 52,02 мм или его забоины (И52)	28	0,060
10. Увеличение длины 5-й коренной шейки более 36,28 мм (L5к)	15	0,030
11. Забоины на коренных и шатунных шейках (ЗБ)	11	0,020

Из анализа 560 исследуемых коленчатых валов было выявлено, что имеющими устранимые дефекты были 470 коленчатых валов или 84%, а неремонтопригодными, то есть имевшими неустраняемые дефекты – 90 коленчатых валов, или 16% [1].

Таблица 1.5

Наименование неустраняемых дефектов	КВ с неустраняемыми дефектами		Коэффициент повторяемости дефектов
	шт.	%	
1. Провороты, задиры коренных или (и) шатунных шеек, а также их аварийный износ, не устраняемый шлифованием	53	58,9	0,090
2. Деформация КВ выше предельного (биение 3-й коренной шейки более 0,9 мм)	26	28,9	0,050
3. Трещины на коренных и шатунных шейках, не устраняемые шлифованием	36	40	0,060
4. Износ более 4-го ремонтного размера коренных или шатунных шеек	7	7,8	0,010
5. Излом КВ	8	8,8	0,010
6. Увеличение длины 5-й коренной шейки более 36,58 мм (износ)	5	5,6	0,010
7. Забоины на шатунных или (и) коренных шейках, не устраняемые шлифованием	2	2,2	0,004
8. Срыв резьбы или забой резьбы под болт крепления маховика	5	5,6	0,010
9. Износ гнезда подшипника более диаметра 52,02 мм или его забоины	2	2,2	0,004
10. Трещины на торцах	2	2,2	0,004

Срок службы коленчатого вала характеризуется возможным числом восстановления шеек под ремонтный размер.

Для анализа дефектов коленчатых валов, проявляющихся в процессе эксплуатации (износов, задиоров и биения шеек коленчатых валов), проводились исследования по данным микрометража 527 коленчатых валов в ЗАО «Ремдизель» [1, 3].

Исследования показали, что выбракованы:

из-за деформации (биению) – 61 коленчатый вал – (11,6%);
из-за наличия трещин – 24 коленчатых вала – (4,6%);
из-за задиров шеек – 105 коленчатых валов – (19,9%);
находятся в пределах номинального размера – 160 коленчатых валов (30,4%);

вышедшие за предельные значения – 27 коленчатых валов (5,1%).

По деформации (биению) коленчатых валов:

биение в пределах 0–0,1 мм – 424 коленчатых вала, из них 12 коленчатых валов с трещинами (12,8%), 24 коленчатых вала с задирами шеек (5,7%);

биение в пределах 0,1–0,9 мм – 72 коленчатых вала, из них 8 коленчатых валов с трещинами (11,1%), 57 коленчатых валов с задирами шеек (79,2%);

биение в пределах 0,9–2,5 мм – 31 коленчатый вал, из них 4 коленчатых вала с трещинами (12,9%), 26 коленчатых валов с задирами (83,9%).

Анализ исследований показывает, что основной причиной выбраковки коленчатых валов являются задиры шеек, трещины на них (рис.1.10) и деформация (биение) коленчатого вала при незначительных износах самих шеек, находящихся в поле допуска на размер.

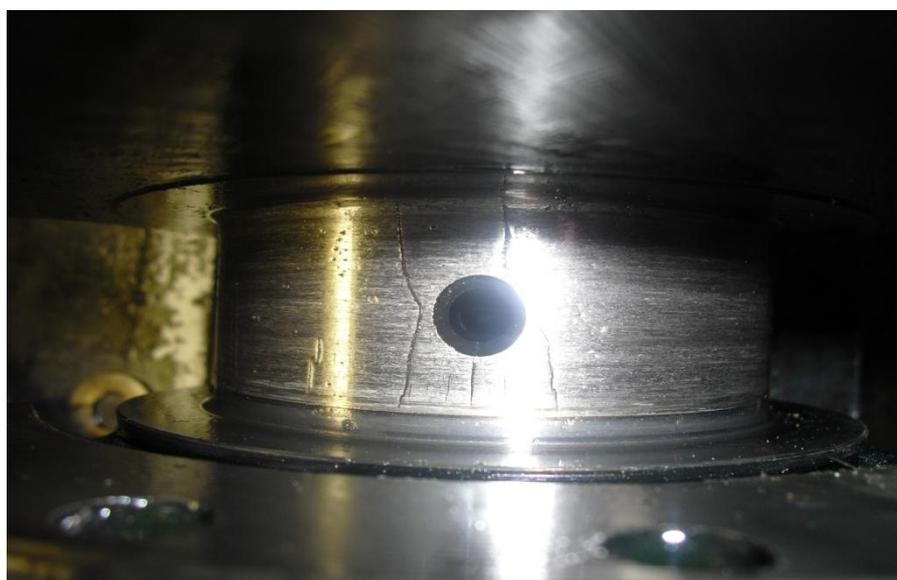


Рис. 1.2. Задир и трещины на шейке вала

При образовании задиров на шейках коленчатых валов возрастает вероятность образования на них трещин и деформации, статистическая связь между образованием трещин и образованием биения коленчатого вала слабая ($\delta=4$), а связь между образованием задиров на шейках валов и биением коленчатого вала весьма сильная ($\delta=30$).

С увеличением прогиба коленчатых валов возрастает и количество неремонтопригодных валов, их выбраковка.

При прогибе коленчатого вала более 0,9 мм его не целесообразно восстанавливать из-за образования в нем усталостных трещин, при этом до 90% валов с таким прогибом подлежат выбраковке.

Анализ этих данных показывает, что прогиб выбракованных коленчатых валов в 8,6 раз больше, чем у коленчатых валов, подлежащих восстановлению. Коленчатые валы, подлежащие восстановлению, имеют значительное рассеивание величины прогиба ($v= 1,675$).

При правильной эксплуатации автомобиля и наработке 200-250 тыс. км биение коленчатого вала в среднем составляет 0,05 мм, при увеличении биения 0,1 мм и выше растет вероятность образования задиров, схватывания шейки с вкладышем (рис. 1.3), что характерно для работы подшипников коленчатого вала в граничных условиях смазки и приводит к проворачиванию вкладышей, прогибу коленчатого вала величиной более 1 мм и его выбраковке.

Процессы, приводящие к проворачиванию вкладышей коленчатых валов, рассмотрены в работах [4, 5, 6, 7].



Рис. 1.3. Задир на шейке вала, результат схватывания с вкладышем

Еще одним фактором, характеризующим долговечность коленчатого вала, является сопротивление усталостным нагрузкам.

Несмотря на различный характер внешнего проявления отказов, обусловленных изнашиванием и усталостью, в их основе лежат одни и те же физические процессы, описываемые закономерностями механики разрушения, согласно которым большинство видов изнашивания носит усталостный характер.

На сопротивление усталостным нагрузкам в значительной степени влияют однородность материала изделия и качество его изготовления.

В процессе изготовления коленчатых валов, при формировании заготовки (штамповкой) и последующей механической обработки их выбраковка составляет около 3%, большинство которых имеют трещины, в основном по штамповому стыку (рис.1.4) [1]. Образование трещин на шейках коленчатых валов при изготовлении значительно снижает их эксплуатационный ресурс.



Рис. 1.4. Усталостные трещины на шейке вала

Кроме того, долговечность КВ, восстанавливаемых перешлифовкой под ремонтный размер, зависит от точности геометрических и координатных размеров. Несоответствие зазоров техническим условиям (ТУ) в сопряжении «шейка-вкладыш», изменение макрогеометрии и шероховатости шеек ведут к ухудшению условий работы сопряжения, вызывающему интенсивное увеличение задиров сопряжения в процессе приработки [5, 8, 9].

Анализ результатов исследований дефектов коленчатых валов, появляющихся в процессе эксплуатации, показывает, что выход из строя коленчатых валов в большинстве случаев происходит:

- из-за задиров шеек;
- при доминирующем влиянии изгиба в плоскости кривошипа;
- из-за разрушения его вследствие постоянного роста деформаций и трещин и постепенного накопления локальных дефектов.

Таким образом, для повышения долговечности коленчатых валов необходимо совершенствовать систему смазки их подшипников, особенно шатунных, контролировать формоизменение сопряжений, убирать прогиб коленчатого вала. После ремонта коленчатого вала проверять точность геометрических и координатных размеров шеек, величину радиуса галтельных переходов шатунных и коренных шеек, соответствие их ТУ,

создавать на шейках коленчатых валов покрытия, позволяющие повысить антизадирные свойства сопряжения при граничных условиях смазки, промерять посадочные места под вкладыши у шатунов и у постелей блока цилиндров.

1.1.2 Анализ дефектов блоков цилиндров

Блок цилиндров является основной корпусной деталью двигателя (рис.1.5) и представляет собой отливку из чугуна с вермикулярным графитом. Отливку подвергают искусственному старению для снятия термических напряжений, что позволяет блоку сохранить правильные геометрические формы и размеры в процессе эксплуатации. Два ряда цилиндров, отлитых как одно целое с верхней частью картера, расположены под углом 90° один к другому (рис.1.5). Левый ряд цилиндров смещен относительно правого вперед на 29,5 мм, что обусловлено установкой на каждую шатунную шейку коленчатого вала двух шатунов рядом. В каждом ряду имеется по четыре цилиндра, выходящие на верхние обработанные плоскости, которые служат привалочными поверхностями для головок цилиндров. Привалочные поверхности отличаются высокой плоскостностью и параллельны оси расточек под подшипники коленчатого вала.

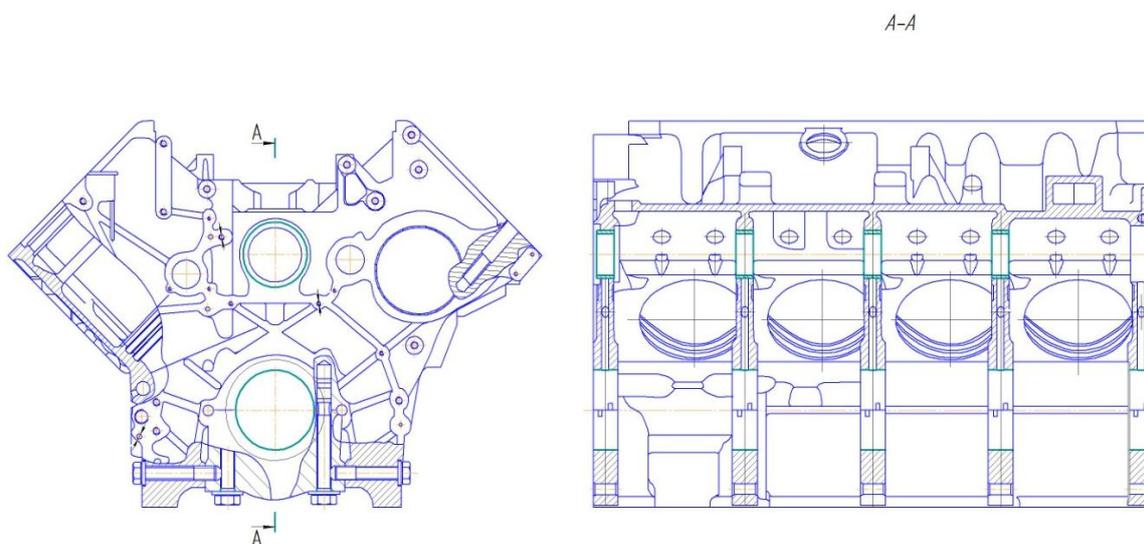


Рис. 1.5. Блок цилиндров двигателя КамАЗ

Каждый цилиндр имеет два соосных цилиндрических отверстия, выполненных в верхнем и нижнем поясах блока, по которым центрируются гильзы цилиндра, и выточки в верхнем поясе, образующие кольцевые площадки под бурты гильз. Чтобы обеспечить правильную посадку гильзы в блоке, параметры плоскостности и перпендикулярности упорной площадки под бурт гильзы к общей оси центрирующих расточек

выполнены с высокой точностью. На нижнем поясе выполнены две канавки под уплотнительные кольца, которые предотвращают попадание охлаждающей жидкости из полости охлаждения блока в полость масляного картера двигателя. Бобышки болтов крепления головок цилиндров выполнены в виде приливов к поперечным стенкам, образующим рубашку охлаждения и равномерно распределены вокруг каждого цилиндра.

Картер данного дизеля относится к классу 1А (Е), т.е. имеет соосные отверстия одинаковых диаметров (индекс 1) со свободным (для люнетов) доступом к промежуточным отверстиям (индекс А) и представляет собой систему координированных параллельных рядов глубоких прерывистых отверстий, в которых закреплены тонкостенные втулки – вкладыши (Е). Картерная часть блока связана с крышками коренных подшипников коренными и стяжными болтами. Центрирование крышек коренных подшипников производится по горизонтальным штифтам, которые запрессованы на стыке между блоком и крышками, но большей частью входят в блок для предотвращения их выпадения при снятии крышек.

Кроме того, крышка пятой коренной опоры центрируется в продольном направлении по двум вертикальным штифтам, обеспечивая точность совпадения расточек под упорные полукольца коленчатого вала на блоке и на крышках.

В процессе работы двигателя блок цилиндров испытывает значительные нагрузки от сил давления газов в цилиндрах, от сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс, а также передает реактивный крутящий момент на раму автомобиля и испытывает значительные тепловые нагрузки из-за неравномерного нагрева его отдельных частей, т.е. неравномерного распределения тепловых полей. Кроме того, блок цилиндров подвергается коррозии под действием агрессивных сред.

Одним из дефектов, по которому в капитальный ремонт поступают силовые агрегаты является проворачивание вкладышей и количество таких двигателей значительно (до 40%) [21, 7, 35, 7]. Проворачивание вкладышей обусловлено их напряженно-деформированным состоянием, приводящим к образованию прогиба вкладыша, этот процесс не внезапный, а постепенно развивающийся [26].

Причинами проворачивания коренных вкладышей являются падение давления в системе смазки, граничные условия смазки, перегрев и деформации вкладышей.

Изменение размеров и формы отверстий коренных опор от нормативных снижает натяг вкладыша с постелью блока, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, нагреванию подшипников, схватыванию их с шейкой коленчатого вала и проворачиванию (рис.1.6).

Исследования изношенных вкладышей показали, что натирные в средней части, с характерными цветами побежалости, с разрушением антифрик-

ционного слоя постепенно увеличиваются и занимают значительную площадь, приводя в дальнейшем к проворачиванию вкладышей. Измерения вкладышей с натирами показали, что они деформированы по образующей, что обуславливает форму площади натиров и прижогов [26, 12, 14].

Изменения соосности постелей блока цилиндров, которые происходят в процессе работы двигателя, обусловлены действием динамических нагрузок, перегревом опор блока цилиндров, вследствие граничных условий смазки в подшипниках скольжения коренных шеек коленчатого вала и т.д. [14, 39, 13].



Рис. 1.6. Износ постели блока в результате перегрева сопряжения и проворачивания коренного подшипника

Анализ результатов замеров постелей блоков двигателей семейства КамАЗ, проведенных в лаборатории кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ имени Гагарина Ю.А., в ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ», г. Саратов показывает, что несоосность опор блока цилиндров более чем в 3 раза превышает отклонения допустимые техническими условиями завода изготовителя. При работе двигателя с такими отклонениями в опорных поверхностях базовых деталей ресурс силового агрегата снижается и составляет 20...40% от ресурса нового двигателя.

При несоосности коренных опор 0,05 мм динамическая нагрузка на коленчатый вал увеличивается в 1,8-2 раза, а следовательно, увеличивается и интенсивность изнашивания коренных вкладышей [14, 39].

В работах проф. Ф.Н. Авдонькина [4, 5] обоснованы зависимости интенсивности изнашивания от величины износа:

$$\alpha_1 = \alpha_{01} + bS_1; \quad (1.16)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{02} + bS_2, \quad (1.17)$$

где α_1, α_2 – соответственно интенсивность изнашивания в вертикальной и горизонтальной плоскостях, мкм/тыс.км; α_{01}, α_{02} – интенсивность изнашивания в конце приработки, мкм/тыс.км; b – изменение интенсивности изнашивания за единицу износа, 1/тыс.км; S_1, S_2 – износ, мкм.

Запишем выражение для интенсивности овализации $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (1.18)$$

или

$$\Delta\alpha = \alpha_{01} - \alpha_{02} + bS_1 - bS_2 = \Delta\alpha_0 + b(S_1 - S_2), \quad (1.19)$$

т.е. интенсивность овализации $\Delta\alpha$ в процессе изнашивания возрастает прямо пропорционально величине овальности. Это приводит к увеличению овальности коренной опоры и ухудшению условий монтажа коренного вкладыша после замены, поэтому при проведении капитального ремонта двигателя необходимо промерять не только размеры и форму постелей блока, но и их соосность, и если необходимо, – устранять макрогеометрические отклонения в коренных опорах.

1.1.3 Анализ дефектов шатунов

Шатун двигателя КамАЗ (деталь 740.1004045), кованый, изготавливается из стали 40ХН2МА, твердость НВ 245...285, стержень шатуна выполнен в виде двутавра.

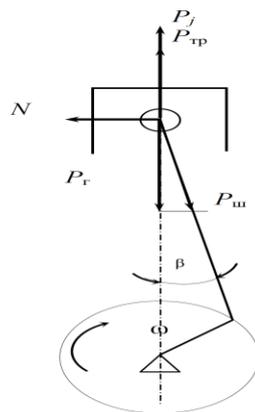


Рис.1.7. Схема сил, действующих на шатун:

P_g – сила давления газов;

P_j – сила инерции; $P_{тр}$ – сила трения поршневой группы; $P_{ш}$ – сила, действующая вдоль оси шатуна;

N – боковая сила

В верхней головке запрессована сталебронзовая втулка, а в нижней фиксируются биметаллические вкладыши.

В верхней и нижней головках шатуна условия работы разные.

Шатун воспринимает переменные по величине и направлению газовые и инерционные нагрузки, которые носят ударный характер (рис.1.7) [26].

В связи с этим к шатуну, как к одной из ресурсопределяющих деталей агрегата, предъявляют высокие требования по жесткости и прочности.

Значительных износов поверхностей шатуна, деформации при нормальной работе не происходит. В случае аварийного разрушения шатуна возможны повреждения блока цилиндров, деформации коленчатого и распределительного валов.

Возможные повреждения шатуна в процессе работы представлены в табл.1.5, схематически они показаны на рис. 1.8 [26], данные дефекты приводят выбраковке шатуна.

Втулка верхней головки шатуна изнашивается в плоскости оси шатуна, в направлении действия газовых сил.

Втулку верхней головки шатуна при ремонтных работах меняют, нижнюю головку растачивают под ремонтный размер 85,5мм, больше растачивать нельзя из-за близкого расположения к растачиваемой поверхности крепежных болтов [7].

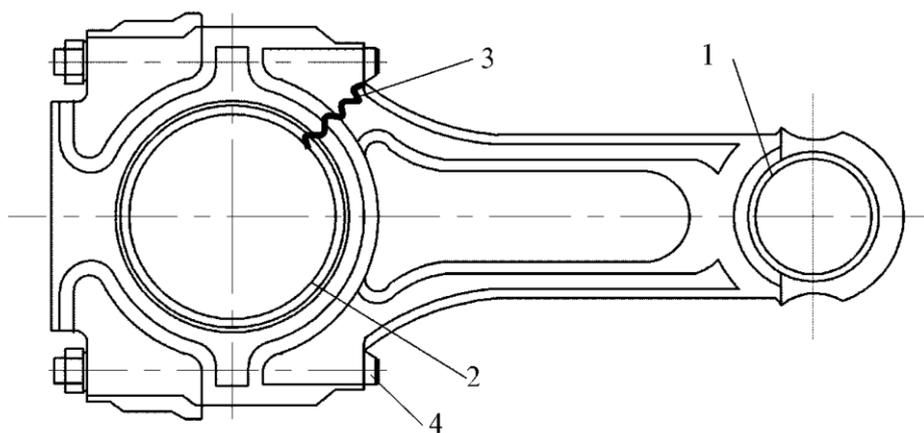


Рис.1.8. Схема основных повреждений шатуна (номера по табл. 1.5) [27]

Износ поверхности под втулку в верхней головке шатуна образуется вследствие фреттинг-коррозии, микроперемещений втулки в верхней головке под действием динамических нагрузок [24].

В отдельных случаях разрушение шатуна (рис.1.8) происходит из-за некачественной механической обработки поверхностей шатуна в процессе изготовления (задиры на рабочей поверхности, отсутствие радиусов при переходе с разных диаметров и др.), и носят производственный характер.

Данные дефекты технологические и являются резервами в повышении качества шатуна.

Т а б л и ц а 1.5

Распределение повреждений шатуна		
№ п/п	Наименование повреждений	%
1	Повышенный износ втулки верхней головки шатуна (более 50 мкм)	35
2	Задиры, прижоги на нижней головке шатуна	1,8
3	Усталостное разрушение тела шатуна	0,4
4	Обрыв шатунных болтов	0,2

Исследования поломанных шатунов показывают, что разрушения шатунов в процессе эксплуатации часто происходят у галтели (концентратор напряжений) отверстия шатунного болта (рис. 1.9).

При проведении капитальных ремонтов двигателей в ЗАО «Ремдизель» в среднем выбраковываются до 7% шатунов, у 28% шатунов производят замену изношенной втулки верхней головки шатуна на новую, с последующей расточкой под номинальный размер, годными считаются около 65% шатунов [123].



Рис.1.9. Усталостные разрушения по верхней головке шатуна и цековке под головку блока

Совершенствование технологий изготовления шатунов в ОАО «КАМАЗ» и выбор конструктивно-технологических решений по повышению надежности шатунов позволили снизить количество их поломок, имеющих часто усталостный характер [224].

Изменения в новом (усиленном) шатуне заключались в том, что увеличили радиус перехода от стержня к нижней головке шатуна с 108 мм до 130 мм, увеличили диаметр резьбы шатунного болта с М12 до М13, изменили его посадку в отверстии шатуна. Эти и другие конструктивно-технологические решения позволили повысить его жесткость [8, 13].

1.2 Обоснование необходимости совершенствования структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ

Планово-предупредительная система технического обслуживания, используемая в автотранспортных предприятиях, предназначена для поддержания работоспособности автомобилей и состоит из профилактической составляющей и ремонтной. Применение современных методов диагностирования и предупреждения отказов, а также методов восстановления работоспособности автомобилей позволило снизить затраты на поддержание их работоспособности. Предупреждение отказов автомобилей в среднем в 5 раз дешевле, чем устранение отказов [124, 186].

Форсирование двигателей повлияло на их надежность, и уровень затрат на обеспечение работоспособности этих автомобилей остается достаточно высоким. Повышение параметра потока отказов в процессе эксплуатации обусловлено изменением технического состояния автомобилей (изнашивания, усталостного разрушения, коррозии).

При текущем ремонте производят замену изношенных деталей, а также других деталей, которые близки по своему состоянию к предельному, т.е. замена элементов, состояние которых близко к предельному, носит профилактический характер в виде предупредительного ремонта. Целесообразность его проведения указано многими исследователями [9, 36, 14, 18, 16, 17, 19, 19, 27, 2].

Его преимущество заключается в применении тех видов работ, которые позволят уменьшить число внезапных отказов, что естественно снизит величину удельных затрат на обеспечение работоспособности двигателя.

Однако, предупредительный ремонт пока недостаточно пронормирован.

Исследования по изменению технического состояния автомобилей КамАЗ [124] показывают, что в процессе эксплуатации величина отказов по основным элементам двигателя увеличивается с доверительной вероятностью 0,85–0,97, что говорит о ее значимости. Эти изменения представлены на рис.1.10 [14].

Восстановительные работы, проводимые при текущем ремонте предусматривающие замену изношенных деталей характерны не только для исследуемых автомобилей. В табл. 1.14 [14] представлены отказы некоторых элементов силового агрегата КамАЗ, частота их повторения и другие параметры.

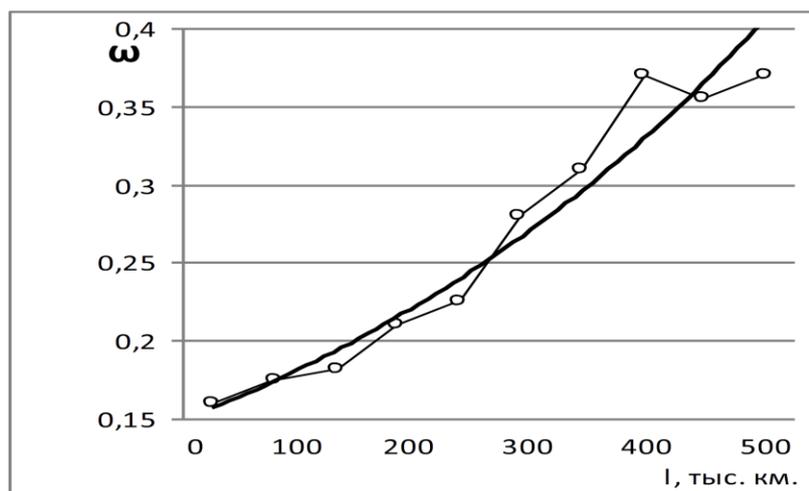


Рис.1.10. Изменение параметра потока отказов ω (отк/тыс. км) двигателей автомобиля КамАЗ в процессе эксплуатации

Т а б л и ц а 1.6

Типичные работы по устранению отказов двигателей автомобилей КамАЗ путем замены деталей и узлов

Наименование отказов и замен	Частота повторения, %	Средняя наработка, тыс.км	Коэффициент вариации
Замена вкладышей подшипников коленчатого вала:	первая	88	0,54
	последующая	64	0,61
Замена поршневых колец:	первая	96	0,58
	последующая	72	0,63
Ремонт топливного насоса высокого давления	21	106	0,64
Капитальный ремонт двигателя:	первый	132	0,48
	последующий	84	0,68
Замена коробки передач:	первая	136	0,51
	последующая	72	0,71
Замена форсунок	28	87	0,62

Рассмотренные в табл. 1.6 мероприятия по устранению отказов не могут быть рациональными, поскольку не отражают реального состояния остаточного ресурса элементов двигателя. Более того в автотранспортных предприятиях при восстановлении работоспособности автомобилей в основном применяют агрегатно-узловой метод, который подразумевает обезличивание ресурсопределяющих элементов. При таком подходе ресурс силового агрегата снижается в среднем на 46%. Это объясняется тем, что при проведении текущего ремонта силового агрегата зачастую производят замену одной или нескольких изношенных деталей и используют остальные детали, состояние которых близко к предельному, что приводит к уменьшению ресурса всего агрегата [2, 6, 14, 19]. Это

взаимовлияние, установленных и оставленных в работе элементов силового агрегата на его ресурс, необходимо учитывать при совершенствовании структуры эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателя.

Используемая на автотранспортных предприятиях структура эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей не рациональна поскольку не учитывает реальное изменение состояния силового агрегата и целесообразные формы ремонта.

Совершенствование структуры ЭРЦ двигателей целесообразно за счет обоснования рациональной периодичности восстановительных мероприятий, учитывающих изменяющееся состояние элементов двигателя при эксплуатации техники.

В результате проведенных исследований предлагается рациональная структура эксплуатационно-ремонтного цикла силового агрегата КамАЗ, при использовании автомобилей в условиях эксплуатации III категории. Совершенствованная структура ЭРЦ предусматривает:

- проведение предупредительного ремонта при пробеге – 120 тыс. км;
- проведение капитального ремонта при пробеге – 200 тыс. км;
- проведение второго предупредительного ремонта при пробеге – 280 тыс.км.

После этого рекомендуется списание автомобиля (рис. 1.11), при таком подходе средний срок службы автомобиля, при 50 тыс. км в год, в среднем составит 7 лет эксплуатации [14].

Аналогичная структура эксплуатационно-ремонтного цикла для дизелей ЯМЗ предложена проф. А.С. Денисовым [15, 12].

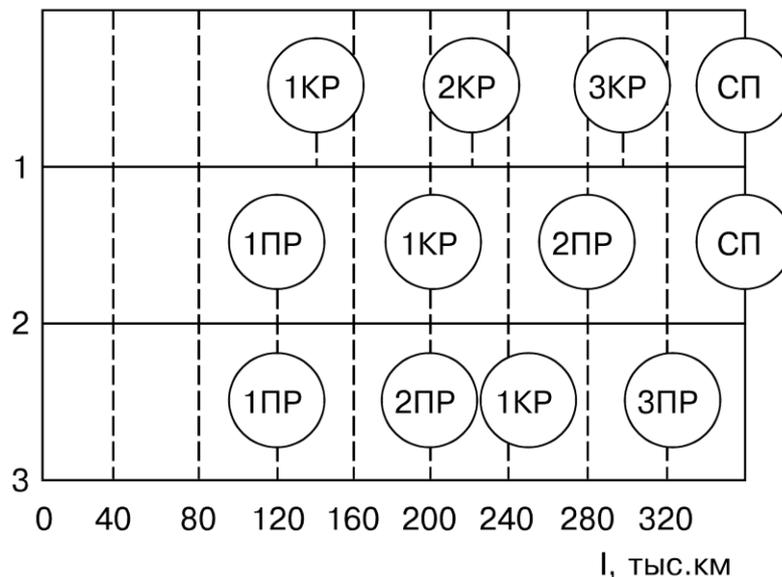


Рис.1.11. Схемы структур обеспечения работоспособности двигателей:
 ПР – предупредительный ремонт; СП – списание

Пробеги до ремонтов указаны средними, их необходимо корректировать с учетом диагностирования технического состояния. Здесь

необходимо учитывать характеристики состояния силового агрегата при предупредительном и капитальном ремонтах (табл. 1.7 [14].

Т а б л и ц а 1.7

Средние значения показателей технического состояния двигателей КамАЗ-740 перед предупредительным (ПР) и капитальным (КР) ремонтами

Показатели технического состояния	ПР	КР
Износ шатунных шеек коленчатого вала, мкм	30	45
Износ коренных шеек коленчатого вала, мкм	40	55
Овальность шеек коленчатого вала, мкм	15	25
Прогиб коленчатого вала, мкм	30	50
Износ верхних шатунных вкладышей, мкм	50	60
Износ нижних коренных вкладышей, мкм	90	100
Прогиб шатунных вкладышей по образующей, мкм	50	50
Зазор в шатунных подшипниках, мкм	200	220
Зазор в коренных подшипниках, мкм	240	260
Давление в системе смазки, МПа: при 2600 мин ⁻¹	0,25	0,20
при 600 мин ⁻¹	0,10	0,08
Износ гильз цилиндров в верхнем поясе, мкм	130	200
Овальность гильз цилиндров, мкм	60	80
Радиальный износ верхних компрессионных колец, мкм	130	140
Радиальный износ маслосъемных колец, мкм	60	70
Зазор в сопряжении канавка поршня - верхнее компрессионное кольцо, мкм	250	270
Зазор в сопряжении канавка поршня - маслосъемное кольцо, мкм	100	120
Удельный расход масла на угар в % к расходу топлива	2,0	2,5
Давление впрыска топлива форсунками, МПа	16,5	16,0
Производительность секций ТНВД при частоте вращения кулачкового вала 1300 мин ⁻¹ , мм ³ /цикл	72	70
Отклонение геометрического угла начала подачи топлива секциями ТНВД, град	0,6	0,8
Давление открытия нагнетательного клапана, МПа	0,9	0,9

С учетом повторения выхода из строя элементов силового агрегата (табл. 1.8) и введением коэффициентов повторяемости планирование предупредительного ремонта значительно упрощается [14].

Т а б л и ц а 1.8

Перечень основных деталей двигателей КамАЗ-740, заменяемых при ПР

Наименование деталей	Подлежит	
	замене, %	восстановлению, %
Вал коленчатый	5	15
Гильзы цилиндров	25	—
Поршень	25	—
Палец поршневой	25	—
Шатун	6	37
Прокладки головок блока	85	—
Вкладыши коренные	78	—
Вкладыши шатунные	69	—

Силовые агрегаты автомобилей КамАЗ-Евро моделей 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.51-320 имеют конструктивно-технологические и мощностные отличия по сравнению с силовым агрегатом КамАЗ-740. В данных двигателях увеличена мощность за счёт использования турбонаддува или увеличения рабочего объёма. Для повышения долговечности усовершенствована смазочная система: установлен односекционный масляный насос повышенной производительности, установлен теплообменник, повышено давление масла в системе, установлены форсунки для охлаждения поршней маслом. Изменения произошли в системе впуска и фильтрации воздуха, убран центробежный грязеуловитель в коленчатом вале и др.

Эти изменения влияют на ресурс и структуру ЭРЦ двигателя. Для совершенствования структуры ЭРЦ двигателей КамАЗ-Евро необходимы теоретически и экспериментально обоснованные зависимости параметров технического состояния ресурсопределяющих элементов от наработки.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью экспериментальных исследований в работе является проверка реализуемости и оценка эффективности разработанных теоретических положений и технических решений по повышению долговечности автомобильных двигателей.

2.1 Программа и общая методика исследования

В соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами работы разработана схема программы и общей методики исследования, которая приведена на рис. 2.1. Она включает в себя анализ состояния проблемы, при этом обращено внимание на проблемную ситуацию не только по литературному обзору, но и на особенности реального состояния изучаемой проблемы в автотранспортных предприятиях (АТП). На основании этого сформулированы задачи исследования, в которых аналитическая часть представлена изменением технического состояния основных элементов двигателя, рассмотрена кинетика предотказного состояния ресурсопределяющих деталей, а также исследована физика процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей. Экспериментальная часть работы представлена методикой сбора и обработки данных по техническому состоянию элементов двигателя в процессе эксплуатации, разработкой методик и средств измерения параметров, технического состояния элементов двигателя внутреннего сгорания, а также методикой определения параметров поверхностного слоя металлопокрытий при восстановлении деталей. Анализ результатов экспериментальных исследований представлен анализом параметров технического состояния деталей от наработки, а также разработкой методов и средств диагностирования и совершенствованием технологических процессов восстановления ресурсопределяющих деталей и формированием структуры ЭРЦ двигателя. Результатом являются практические рекомендации и технико-экономическая оценка исследований.

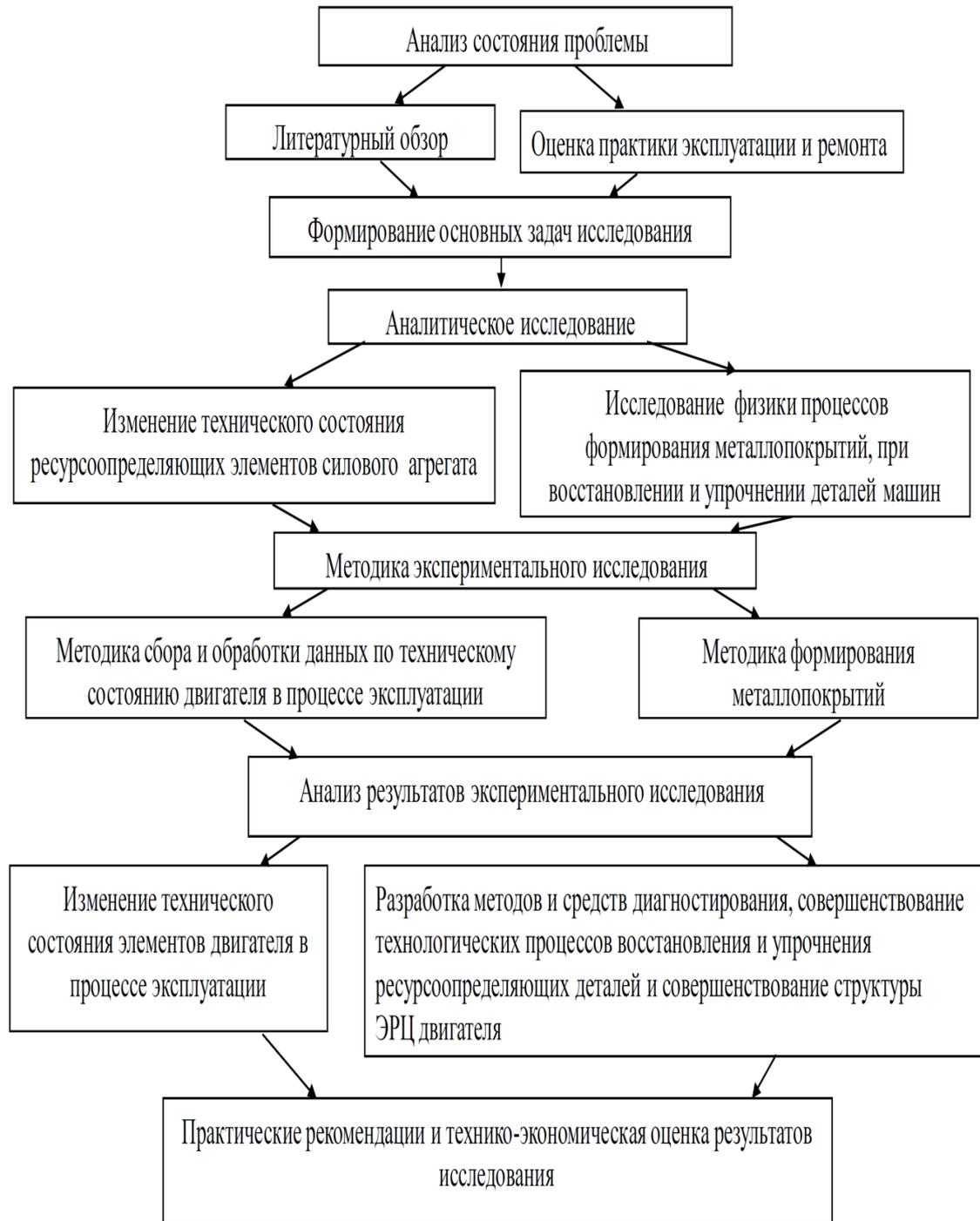


Рис. 2.1. Схема программы и общей методики исследования

2.2 Методика аналитического исследования

В процессе теоретических исследований изучаемой проблемы, были проанализированы условия работы основных элементов форсированных двигателей и их конструктивные особенности. Получены математические модели изменения диагностических параметров рассматриваемых деталей в процессе эксплуатации.

Характер моделей вероятностный, поскольку течение их зависит от различных факторов, в большинстве своем случайных.

На основе ранее проведенного математического моделирования, для определения фактического технического состояния ресурсопределяющих деталей силового агрегата, выполнены эксплуатационные исследования. Исследуемые параметры определялись с использованием метода наименьших квадратов.

Для определения напряжённо-деформированного состояния основных деталей двигателя использовали метод конечных элементов (МКЭ), базирующийся на положениях теории упругости и пластичности, он позволяет провести углубленный анализ геометрической формы, включая участки сложной конфигурации, зоны концентрации напряжений и области контактного взаимодействия в сопряжениях. В соответствии с рассматриваемыми положениями объемное напряженное состояние описывается законом Гука [31]:

$$\{\sigma\}^T = [E]\{\varepsilon\}^t, \quad (2.1)$$

где $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{xz}\}$ – вектор напряжений; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – нормальные напряжения по осям OX, OY, OZ и касательные напряжения соответственно; $\{\varepsilon\}^t = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{xz}\}$ – вектор деформаций; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – относительные линейные деформации по направлению осей OX, OY, OZ и угловые деформации соответственно. Матрица упругости при этом будет иметь вид:

$$[E] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\nu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

матрица упругости,

где $\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ – постоянная Ляме; $\nu = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига (в этих выражениях E – модуль упругости и μ – коэффициент Пуассона материала объекта исследования).

Деформации связаны с перемещениями $\{\varepsilon\}^T = [D]^T \{q\}$, где $[D]^T$ – матрица дифференцирования:

$$[D]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}; \quad (2.3)$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} - \text{вектор перемещений.}$$

Для построения трехмерной конечно-элементной модели деталей, с целью определения перемещений, напряжений, создавали твердотельную модель с последующей генерацией конечно-элементной сетки определенной геометрической формы (тетраэдры). Признаки конечного элемента характеризуют свойства материала (упругие характеристики, плотность, толщину элемента), параметры внешней нагрузки, действующей на грани элементов, расположенных на границе. Вычисление осуществляли с помощью прикладного пакета программы – АРМ Win Machine 9.7, позволяющей определять усилия, действующие на каждый конечный элемент.

Перед решением полученной системы уравнений задавали кинематические граничные условия, простейшим видом которых является ограничение перемещения детали как одного целого. Для реализации этого условия достаточно ограничить перемещение одного узла в двух направлениях и перемещение любого другого узла в одном направлении [31].

Все виды распределенных нагрузок ЭВМ приводит к эквивалентным узловым усилиям при формировании системы уравнений.

После решения сформированной системы уравнений ЭВМ выполняет расчет деформаций и напряжений в каждом конечном элементе и отображает результаты расчета в виде таблиц перемещений узлов, напряжений в элементах и узлах, полей напряжений детали.

С целью определения результатов исследований, реального состояния исследуемых элементов, разработаны методики определения изменений состояния ресурсопределяющих элементов двигателя: методики стендовых исследований и методики исследования в процессе работы силового агрегата (моторные, эксплуатационные). На основе результатов экспериментальных исследований разрабатываются практические рекомендации

по совершенствованию технологии восстановления ресурсопределяющих элементов двигателя. По результатам внедрения предложенных методов повышения долговечности форсированных двигателей приводится технико-экономическая оценка результатов исследований.

2.3 Методика измерения деталей

Измерение деталей проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81 [8].

Контроль геометрических параметров исследуемых элементов осуществлялся стандартным мерительным инструментом согласно требованию РД 50-90-86 [21] и ГОСТ 8.051-81 [9].

Для измерения соосности постелей блока двигателя КамАЗ было изготовлено специальное приспособление (патент № 104691) [23], внешний вид которого и схема измерения соосности приведены на рис. 2.2.

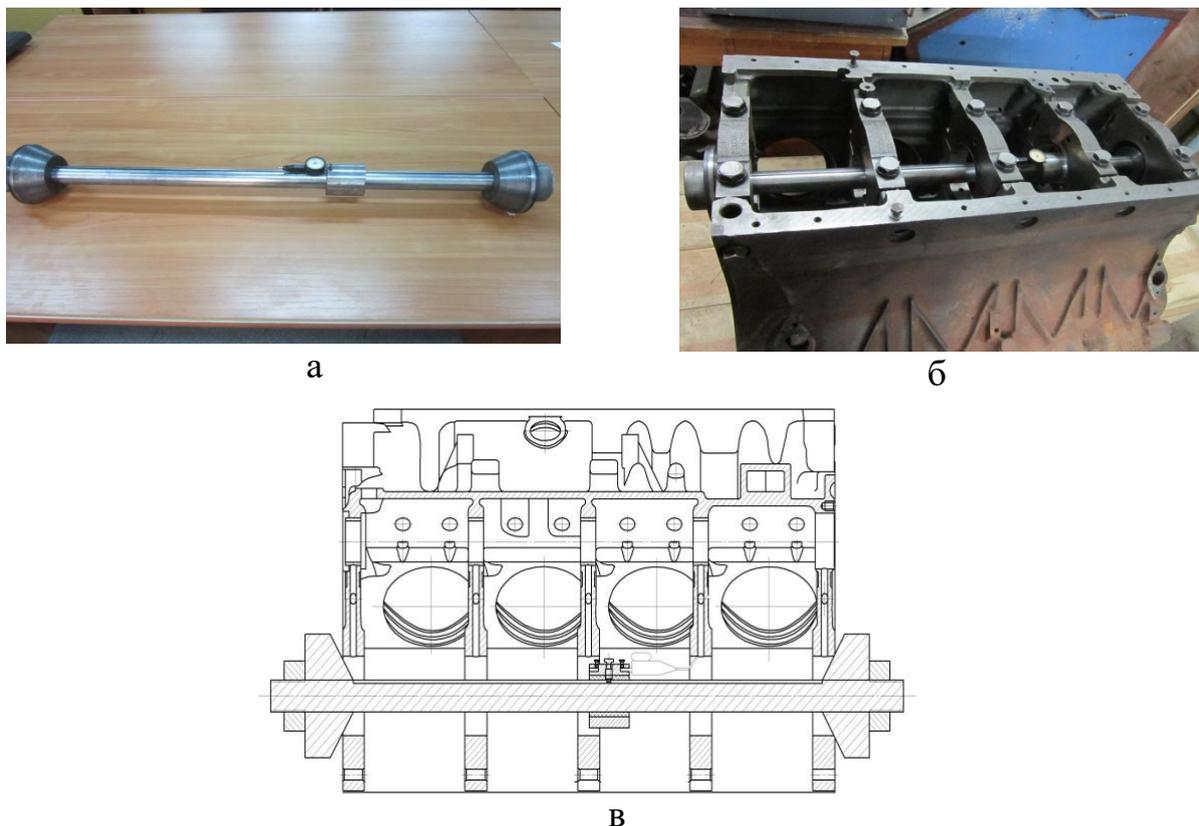


Рис. 2.2. Внешний вид приспособления (а), базирование в опорах (б) и схема измерения соосности постелей блока двигателя КамАЗ (в)

Данное приспособление базируется по торцевой поверхности отверстий коренных опор с помощью самоцентрирующихся конусных шайб (рис. 2.2). Измерение проводили с помощью индикатора часового

типа, с ценой деления 1 мкм, закрепленного на втулке, которая имеет возможность перемещения по валу, вдоль измеряемой оси. Измерение проводили следующим образом: выставляли индикатор на 0 с натягом; перемещая втулку с индикатором вдоль измеряемой оси, фиксировали показания прибора на каждой опоре, затем, поворачивая вал с втулкой на 45 градусов, повторяли измерения, измеряли отклонение от номинального размера по двум поясам в четырех плоскостях. При отклонении размеров более чем на 0,03 мм блок двигателя отправляли на восстановление.

Чтобы избежать смещения втулки с измерительным инструментом по диаметру вала, по всей длине вала отфрезерован паз, в который входит центрирующий винт, закрепленный во втулке.

Измерения геометрических отклонений размеров и формы шатуна осуществлялось изготовленным специальным устройством (патент РФ № 68755) [26, 23], внешний вид которого и схема измерения отклонений приведены на рис.2.3, 2.4.



Рис. 2.3. Приспособление для определения прогиба стержня шатуна и корсетности нижней головки шатуна (внешний вид)

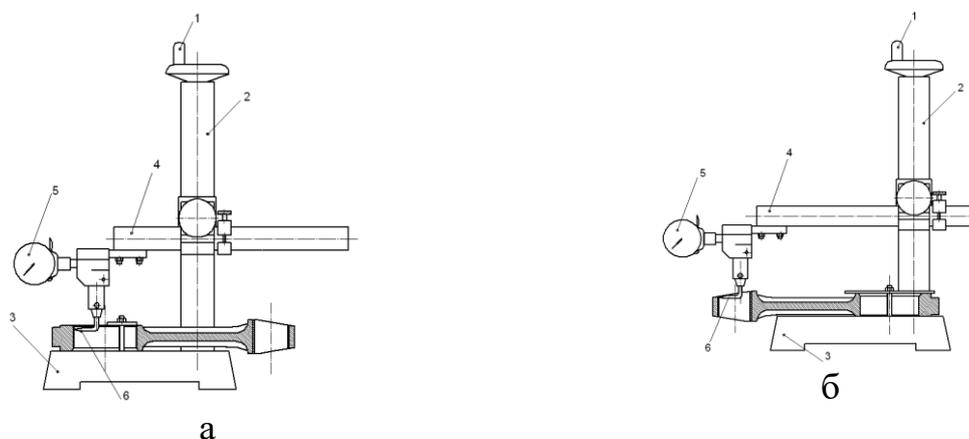


Рис. 2.4. Схема определения корсетности (а) и деформации (б) стержня шатуна на приспособлении

Измерение каждого пояса измеряемой поверхности производилось 5 раз, и в таблицы данных вносились средние значения [21]. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 8.050-73 [8]. Погрешности измерений не превышали допустимые значения по ГОСТ 8.051-81 [8].

При определении корсетности (отклонение образующей поверхности от прямолинейности) устройство работает следующим образом (рис. 2.4, а):

- шатун базируется по торцовой поверхности нижней головки и закрепляется на приспособлении;
- вращением рукоятки 1 опускаем индикатор, закрепленный на штанге 4, до касания измерительным наконечником 6 поверхности отверстия нижней головки шатуна;
- выставляем шкалу индикатора на ноль;
- проводим измерения отверстия, опуская штангу 4 вращением рукоятки 1;
- проверяем отклонения образующей поверхности отверстия от прямолинейности.

При определении деформации стержня шатуна устройство работает следующим образом (рис. 2.4, б):

- шатун базируется по торцовой поверхности нижней головки и закрепляется на приспособлении;
- вращением рукоятки 1 опускаем индикатор, закреплённый на штанге 4, до касания измерительным наконечником 6 поверхности отверстия верхней головки шатуна;
- выставляем шкалу индикатора на ноль;
- проводим измерения деформации стержня шатуна, опуская штангу 4 и закреплённый на ней стрелочный индикатор часового типа, вращением рукоятки 1;
- отклонение стрелки индикатора более 0,06 мм говорит о деформации стержня шатуна, превышающей допустимое значение, установленное заводом-изготовителем [16].

2.4 Методика определения трибологических характеристик

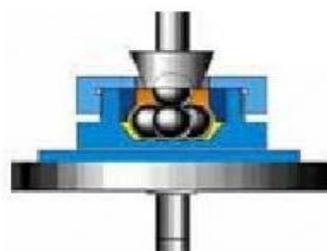
Определение трибологических характеристик трущихся поверхностей проводили на четырехшариковой машине трения, в соответствии с ГОСТ 9490-75. Настоящий стандарт устанавливает метод определения основных трибологических характеристик смазочных материалов:

- несущей способности – по критической нагрузке P_k ;
- предельной нагрузочной способности – по нагрузке сваривания P_c ;
- противоизносных свойств – по диаметру пятна износа $D_{и}$;
- противозадирных свойств – по индексу задира I_3 .

Четырехшариковая машина, узел трения которой состоит из трех зафиксированных стальных шариков, лежащих в одной плоскости на которые давит, с изменяющейся нагрузкой, четвертый шарик, схема узла показана на рис. 2.5.



а)



б)

Рис.2.5. Четырехшариковая машина трения – а)
и узел трения машины – б)

Три нижних шарика закрепляют неподвижно в чашке машины с испытуемым смазочным материалом. Верхний шарик, закрепленный в шпинделе машины, вращается относительно трех нижних под заданной нагрузкой с частотой вращения $(1460 \pm 70) \text{ мин}^{-1}$. Проворачивание шариков в процессе испытания не допускается. Шарика диаметром $6 \pm 0,01 \text{ мм}$ по ГОСТ 3722 изготовлены из стали ШХ-15 по ГОСТ 801.

В экспериментах использовались: микроскоп с увеличением до $200\times$, снабженный отсчетной шкалой с ценой деления не более $0,01 \text{ мм}$, секундомер, растворитель по ТУ 38.401-67-108, удаляющий смазочный материал с деталей узла трения и не оставляющий пленки и другие загрязнения, шабер трехгранный для удаления заусенцев, образующихся вокруг пятен износа на шариках.

Испытание состоит из серии определений. Каждое определение проводили на новых четырех шариках с нанесенным на них медным покрытием, играющим роль твердого смазочного материала.

Для проведения испытания подготовленные шарика закрепляли в шпинделе машины и в чашке для смазочного материала. При испытании смазочный материал заливали так, чтобы шарика были полностью покрыты им. Затем устанавливали чашку со смазочным материалом в машину, плавно прилагая заданную нагрузку, включив электродвигатель.

Время работы машины трения, от начала эксперимента до момента выключения электродвигателя, определялась критической нагрузкой, при которой происходило сваривание, схватывание испытываемых шариков.

При определении критической нагрузки проводили ряд последовательных определений с убывающими или возрастающими нагрузками в соответствии с рядом нагрузок, максимально приближенных к предполагаемой критической нагрузке.

Для материалов, у которых сваривание не наблюдается и момент трения ниже предельного, за нагрузку сваривания принимали нагрузку, при которой образуется пятно износа средним диаметром 3 мм и более.

2.5 Методика стендовых моторных исследований

Для определения параметров полученных аналитических зависимостей были проведены стендовые моторные исследования на двигателе КамАЗ в объеме 1550 часов, в соответствии с методикой, действующей на предприятии.

Использовали испытательный стенд фирмы «AVL», с гидротормозом фирмы «SCHENCK», укомплектованный необходимым оборудованием и приборами, точность которых соответствует требованиям ГОСТ 14846. Общий вид стенда для испытания двигателя приведен на рис. 2.6.

Перед испытаниями провели измерения коленчатого вала, шатунов и вкладышей с использованием микрометров, индикатора часового типа и нутрометра (ГОСТ 6507-80).

Измерения профиля вкладышей (прогиб) и отклонений от геометрической формы нижней головки шатуна проводили на специально созданном приспособлении (рис. 2.3, 2.4).



Рис. 2.6. Стенд для периодических испытаний двигателей КамАЗ

2.6 Методика эксплуатационных исследований

При эксплуатационных исследованиях проводили измерения размеров и формы рабочих поверхностей деталей (коленчатых валов, шатунов, постелей блоков, вала ротора и втулок турбокомпрессоров) и диагностических параметров двигателя.

Диаметр нижней и верхней головок шатуна измеряли нутромером (точность 0,01 мм).

Прогиб вкладыша измеряли индикатором часового типа МИГ-1 (с ценой деления 0,002 мм) на приспособлении, описанном выше (рис. 2.3, 2.4).

Методику измерения прогиба вкладыша (отклонение образующей поверхности от прямолинейности) использовали такую же, как и для определения корсетности нижней головки шатунов, крайнее положения стрелки индикатора являлось величиной прогиба вкладыша (рис. 2.4, а).

С целью определения эффективности предлагаемых методов поддержания работоспособности двигателей КамАЗ, были проведены сравнительные испытания двигателей с восстановленными шатунами, двигателей, прошедших капитальный ремонт, и двигателей, находящихся в эксплуатации. Количество исследуемых двигателей каждого типа по 5 единиц. Контроль исследуемых параметров проводился на двигателях с пробегом до 80 тыс. км, используя диагностические устройства, разработанные в СГТУ имени Гагарина Ю.А. и на ЗАО «Ремдизель» [7, 26, 19].

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В основе методологии обоснования технологии восстановления ресурсоопределяющих элементов двигателя лежит причинно-следственная связь условий работы объекта, изменения поверхностных слоев сопряжений, определяющих эксплуатационный срок службы автомобиля, возникновения и развития процессов изнашивания деталей, их напряженно-деформированного состояния, определяющего вероятностный характер отказов и эксплуатационную долговечность автомобиля, технологических процессов, обеспечивающих восстановление ресурсоопределяющих деталей, силового агрегата и автомобиля в целом, определяющих структуру эксплуатационно-ремонтного цикла двигателя и нормативы обеспечения работоспособности автомобиля (рис. 3.1). Все это необходимо учитывать при обосновании технологии ремонта.



Рис. 3.1. Схема причинно-следственной связи факторов и нормативов технической эксплуатации автомобилей

3.1 Анализ условий развития процессов изнашивания основных элементов двигателя

3.1.1 Изменение технического состояния шатуна

Интенсивность изменения технического состояния ресурсопределяющих деталей в процессе эксплуатации определяется условиями их нагружения. От этого зависит интенсивность изнашивания усталостного разрушения и деформации этих элементов. Динамическая нагруженность деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) обусловлена увеличением давления газов в надпоршневом пространстве и соударениями перемещающихся элементов кривошипно-шатунного механизма. Соударения в сопряжениях возникают при перекладке поршня, перемене направления действия сил (рис. 3.1) [8, 10, 13, 24, 27, 22]. Ударные явления проявляются как на шатунных, так и на коренных подшипниках коленчатого вала, в

сопряжении шейка коленчатого вала – шатун, шейка коленчатого вала – постель блока, шатун – поршневой палец – поршень [137, 331].

Сила P , действующая на поршень, раскладывается на составляющие: боковую силу, действующую нормально к оси цилиндра:

$$N = P \operatorname{tg} \beta, \quad (3.1)$$

и силу, действующую вдоль оси шатуна (рис.3.2):

$$S = \frac{P}{\cos \beta}. \quad (3.2)$$

Как показано на рис. 3.2, сила, действующая вдоль оси шатуна, является составляющей суммарной силы:

$$S = P / \cos \beta, \text{ или } P = S \cdot \cos \beta. \quad (3.3)$$

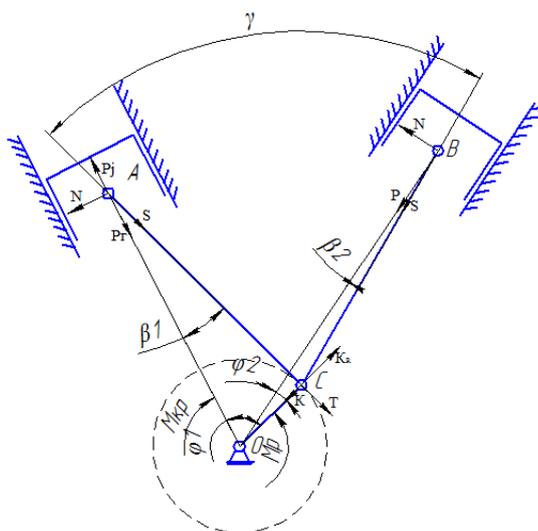


Рис. 3.2. Схема действия сил в КШМ двигателя КамАЗ-740:

P_j – сила возвратно-поступательно движущихся масс; P_r – сила действия газов;
 P – суммарная сила; K_R – центробежная сила инерции вращающихся масс;
 N – нормальная сила, воспринимаемая стенками цилиндра; S – сила, действующая вдоль шатуна; K – сила, направленная по радиусу кривошипа;
 T – сила, направленная по касательной к радиусу кривошипа;
 $M_{кр}$ – крутящий момент; M_b – реактивный момент

Общая сила трения определяется из сил инерции, давления газов в надпоршневом пространстве, сил трения, возникающих в процессе работы:

$$P = P_j + P_r - P_{тр}. \quad (3.4)$$

Исходя из этого, выражение (3.4) можно записать как:

$$P_{тр} = (P_j + P_r) - S \cdot \cos \beta. \quad (3.5)$$

Нагрузка по оси шатуна передается почти полностью. Шатун вследствие действия dp/dt совершает продольные колебания, амплитуда которых зависит только от dp/dt . Частота этих колебаний 1445 Гц и не зависит от dp/dt [26].

В такте расширения возникают газодинамические колебания, величина которых зависит от максимальной скорости нарастания давления. Эти колебания вместе с ударной нагрузкой вызывают в механизме вынужденные колебания. Шатунно-поршневая группа из-за своей инерционности не способна следить за изменением давления газов в цилиндре дизеля при сгорании топлива, поэтому имеют место собственные колебания. Вследствие несжимаемости масла колебания передаются в виде гидродинамических колебаний в масляном слое шатунного подшипника. На некоторых режимах между трущимися поверхностями сопряжений происходит уменьшение толщины масляного слоя при этом величина ее может достигать $h_{\min} = 15 \div 16,3$ мкм [26].

Коэффициент динамичности k_d с уменьшением h_{\min} снижается с 1,179 до 1,155, что обусловлено повышением несущей способности масляного слоя между вкладышем и шейкой коленчатого вала ξ с 91,5 до 164,7 с^{-1} [22].

Втулка верхней головки шатуна изнашивается в плоскости оси шатуна, то есть в плоскости действия газовых и инерционных сил. Задиры, прижоги, проворачивание вкладышей на шатунных шейках коленчатого вала приводят к повреждению головки шатуна, изменяя ее размер и форму [26, 5, 39, 12, 10].

3.1.2 Изнашивание верхней и нижней головок шатуна в процессе эксплуатации

Верхняя головка шатуна:

В верхней головке шатуна в процессе эксплуатации происходит изнашивание втулки и поршневого пальца. Данный тип сопряжения относится к динамически нагруженным, для которых, как обосновано в работах Ф.Н. Авдонькина [2, 6], справедлива экспоненциальная зависимость износа S от наработки l :

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (3.6)$$

где S_0 – износ в конце периода приработки, приведенный к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа.

Характер действующих нагрузок на шатун обуславливает изменение формы рабочей поверхности втулки в верхней головке шатуна в виде овальности, которая в процессе эксплуатации возрастает.

Для обоснования зависимости овальности втулки верхней головки шатуна от наработки примем допущение: параметр b в зависимости (3.6) одинаков и для обеих плоскостей. Обработка экспериментальных данных по износу элементов двигателей [31, 35, 23] показывает, что разница в величине параметра b не превышает 10-15%.

Считаем, что исходная овальность равна нулю, тогда овальность в процессе эксплуатации (разница износов по оси шатуна S_1 и в перпендикулярной плоскости S_2) с учетом уравнения (3.6) составит:

$$\varepsilon = S_1 - S_2 = S_{01}e^{bl} - S_{02}e^{bl} = (S_{01} - S_{02})e^{bl} = \varepsilon_0 e^{bl}, \quad (3.7)$$

где $\varepsilon_0 = S_{01} - S_{02}$ – овальность отверстия в конце приработки, приведенная к началу эксплуатации [16].

Условия работы шатуна и действующие с высокочастотными колебаниями нагрузки изменяют плотность посадки втулки в верхней головке шатуна, вследствие разрушения микронеровностей в сопряжении (рис. 3.3), что приводит к фреттинг-изнашиванию и к проворачиванию втулки [16].

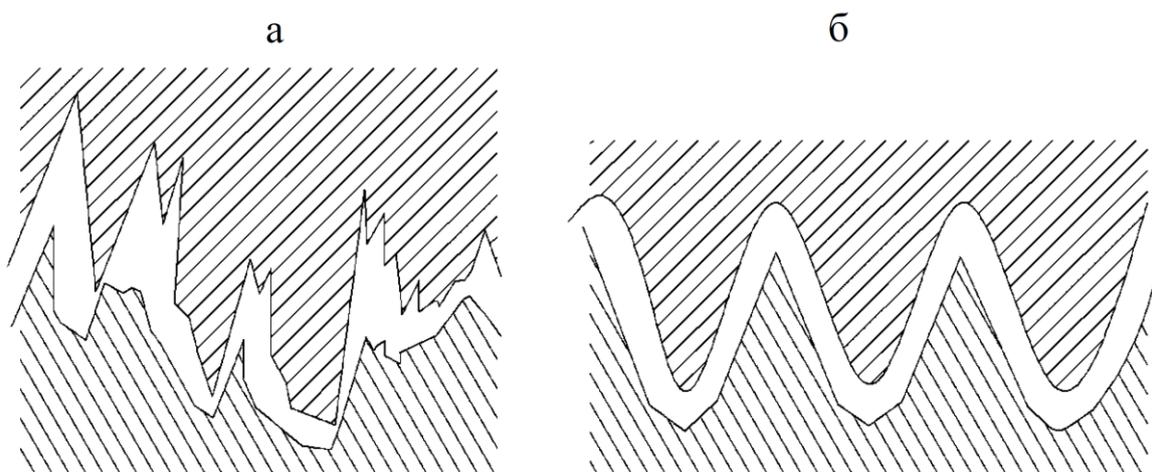


Рис.3.3. Взаимодействие микронеровностей шатуна и втулки (а) и схема условных микронеровностей (б)

По мере снижения высоты микровыступов вследствие изнашивания вероятность разрушения их снижается. Следовательно, с повышением износа интенсивность разрушения микровыступов (изнашивание) снижается. Форму зависимости можно принять линейной с учетом формы микровыступов (конус, пирамида):

$$\alpha = \alpha_0 - bS, \quad (3.8)$$

где α_0 – интенсивность изнашивания в конце периода приработки, приведенная к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа; S – износ (рис. 3.4) [16].

Поскольку интенсивность изнашивания $\alpha = dS/dl$, то, интегрируя дифференциальное уравнение (3.8), получим зависимость α от l и S от l :

$$\frac{dS}{dl} = \alpha_0 - bS; \quad l = \int \frac{dS}{\alpha_0 - bS} = -\frac{1}{b} \ln(\alpha_0 - S) + C_u, \quad (3.9)$$

где C_u – постоянная интегрирования при $S=0$ и $l=0$.

Преобразуя выражение (3.9), запишем $e^{-b_n(l-C_u)} = \alpha_{n0} - b_n S_n$ или при начальных условиях $e^{b_n C_u} = \alpha_{n0}$.

После преобразований получим:

$$\alpha_{no} e^{-b_n l} = \alpha_{n0} - b_n S = \alpha_n, \text{ или } \alpha_n = \alpha_{no} e^{-b_n l}. \quad (3.10)$$

То есть, интенсивность изнашивания при наработке уменьшается.

Решение выражения (3.10) относительно износа S :

$$S_n = \frac{\alpha_{n0}}{b_n} (1 - e^{-b_n l}), \quad (3.11)$$

где $\frac{\alpha_{n0}}{b_n} = S_n$ – износ в конце приработки, приведенный к началу эксплуатации (рис. 3.4) [16].

По аналогичной зависимости в процессе эксплуатации увеличивается и овальность верхней головки шатуна.

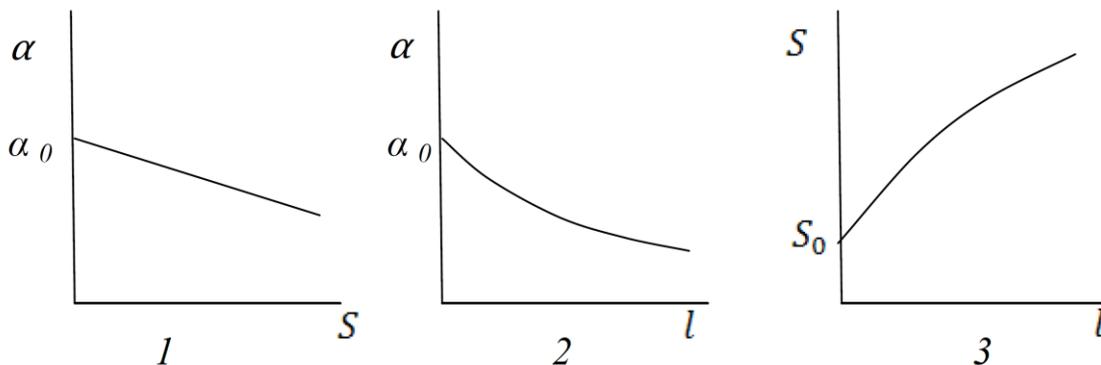


Рис.3.4. Характер зависимости интенсивности изнашивания α от износа S (1) и пробега l (2), износа S от пробега l (3)

Таким образом, для поддержания работоспособности силового агрегата необходимо определить технологии восстановления ресурсопределяющих деталей, в частности верхней головки шатунов, с учетом процессов, происходящих в сопряжениях [15, 16].

Нижняя головка шатуна:

Характер работы сопряжения нижней головки шатуна, которое тоже является неподвижным, отличается от характера работы сопряжений верхней головки.

В результате потери геометрической формы вкладышем (проявление прогиба) (рис. 3.5) возрастает вероятность схватывания вкладыша с шейкой коленчатого вала и его проворачивание [16, 12, 16, 18].

Т.е. данный дефект (проворачивание вкладышей) является результатом деформирования вкладышей. В процессе работы вкладыш с измененной геометрической формой (прогибом по образующей) краями будет изнашивать нижнюю головку шатуна (рис. 3.5), что в итоге изменит ее геометрическую форму и изменит условия работы неподвижного сопряжения вкладыш – нижняя головка шатуна.

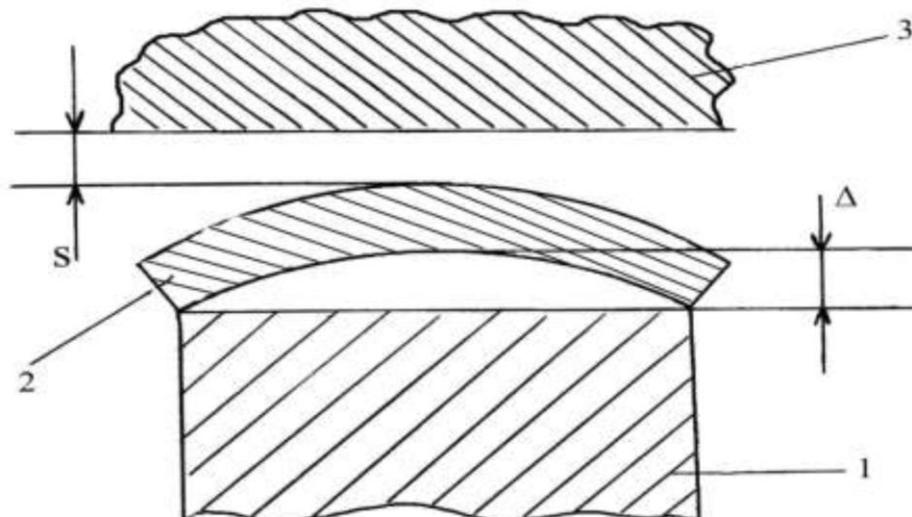


Рис. 3.5. Характер поперечной деформации вкладыша:
1 – шатун; 2 – вкладыш; 3 – шейка вала; Δ – прогиб вкладыша;
 S – зазор в подшипнике

Это обуславливает рост корсетности нижней головки шатуна, величина которой прямо пропорциональна величине деформации вкладыша, вследствие повышения его упругости (рис. 3.6) [26]:

$$F = c\Delta, \quad (3.12)$$

где F – сила деформации (по краям вкладыша $F/2$); Δ – прогиб вкладыша; c – характеристика (жесткость) пружины (вкладыша).

В работах [8, 123, 124, 128] показано, что зависимость Δ (прогиба вкладыша) от наработки силового агрегата l экспоненциальная:

$$\Delta = \Delta_0 e^{bl}, \quad (3.13)$$

где Δ_0 – относительный прогиб в конце приработки, приведенный к началу эксплуатации; b – параметр интенсификации. С учетом этого и зависимости (3.12) корсетность нижней головки шатуна K (рис. 3.6) с увеличением наработки тоже увеличивается экспоненциально:

$$K = K_0 e^{bl}, \quad (3.14)$$

где K_0 – корсетность в конце приработки; b – параметр интенсификации [26].

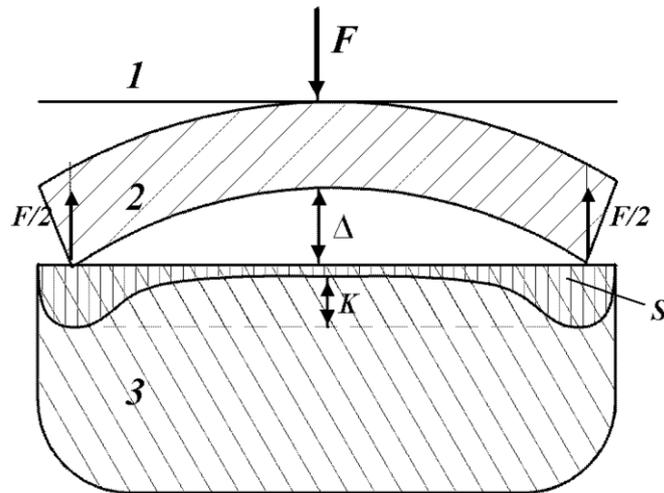


Рис. 3.6. Схема деформации вкладыша с прогибом Δ , силой F :
1 – шейка; 2 – вкладыш; 3 – шатун

Анализ исследований ремонтного фонда шатунов показывает, что при наработке двигателем 100 тыс. км и более у шатунов наблюдается изменение размеров и формы нижней головки обусловленные деформированием вкладыша (рис. 3.6). Эти отклонения находятся в верхнем поле допуска на размер или выходят за него. Следовательно, при восстановлении работоспособности двигателя путем замены вкладышей, ресурс силового агрегата будет несколько ниже, т.к. без восстановления формы нижних головок шатунов условия контакта вкладышей с ними ухудшатся, что может привести к перегреву сопряжения вследствие снижения теплообмена между ними.

В данном неподвижном сопряжении момент трения составит [26, 13]:

$$M_k = \frac{\pi}{2} D^2 b (1 - H) g_{\Sigma} f, \quad (3.15)$$

где D – диаметр постели шатуна; b – ширина вкладыша; H – часть площади, на которой вкладыш не контактирует с постелью шатуна; f – коэффициент трения стали по стали.

Отсюда видно, при наработке корсетность увеличивается, момент трения M_k , в сопряжении вкладыш – головка шатуна снижается. Поэтому при проведении текущего ремонта двигателя необходимо дефектовать ресурсопределяющие элементы, в частности шатуны и восстанавливать их при необходимости [26, 12, 15, 25, 17, 18, 6].

3.1.3 Анализ напряженно-деформированного состояния шатуна в процессе эксплуатации

Действующие на шатун циклические нагрузки (рис. 3.7) имеют динамический характер воздействия. Возникающие низкочастотные

колебания в механизме соответствуют скоростному режиму двигателя, а высокочастотные колебания — это собственные колебания, возникающие от инерционных нагрузок и увеличивающиеся при увеличении зазоров в сопряжении. При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов [31, 31] рассматривали работу деталей с напряжениями в пределах упругости их материала. В процессе наработки амплитуда динамических нагрузок в сопряжениях (подшипниках) возрастает с повышением зазоров.

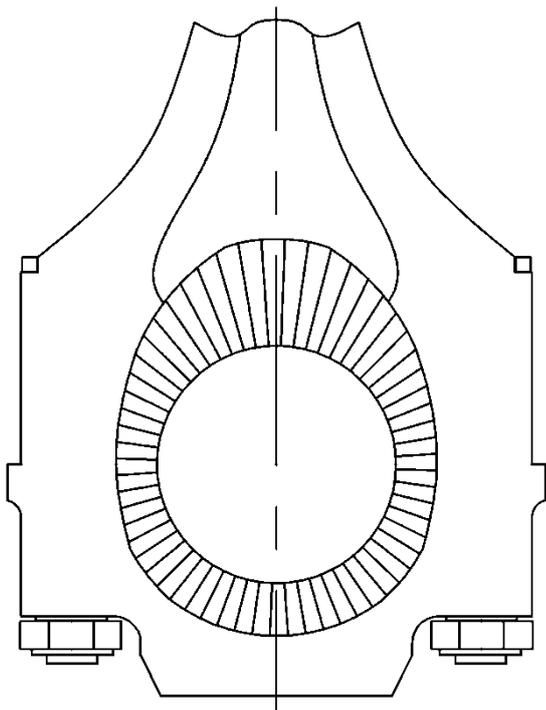


Рис. 3.7. Эпюра нагрузок в нижней головке шатуна

Повышающиеся в 2,5-3 раза зазоры, вследствие износа сопряжений, вызывают рост динамических нагрузок [23, 34]. Из вышеописанного определено, что зазоры в сопряжениях увеличиваются по экспоненте [25, 26] аналогично возрастают и динамические нагрузки.

Вследствие увеличения динамических нагрузок и повышения температуры в трущейся паре в материале детали проявляются такие свойства, как ползучесть. Данное свойство связано с возрастанием пластических деформаций при неизменных или увеличивающихся нагрузках.

Вероятность возникновения такого свойства, приводящего к деформации рабочих поверхностей, потери их соосности зависит также от наработки силового агрегата (возникновение остаточных деформаций) и условий его эксплуатации (перегрев двигателя). Вероятность показана на рис.38 (заштрихованная поверхность F). Это объясняет те геометрические изменения (овальность) происходящие в нижней головке шатуна в

процессе работы, которые обусловлены возникновением деформаций, в том числе и остаточных, вследствие действия динамических нагрузок. Направление действия нагрузок определяет форму овальности ε с большей осью овала по оси шатуна, в соответствии с эпюрой нагрузок (рис. 3.7).

Форма зависимости овальности ε от наработки l аналогична (3.6):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon^{bl}, \quad (3.16)$$

где ε_0 – овальность в конце приработки, приведенная к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности овализации на единицу овальности [26].

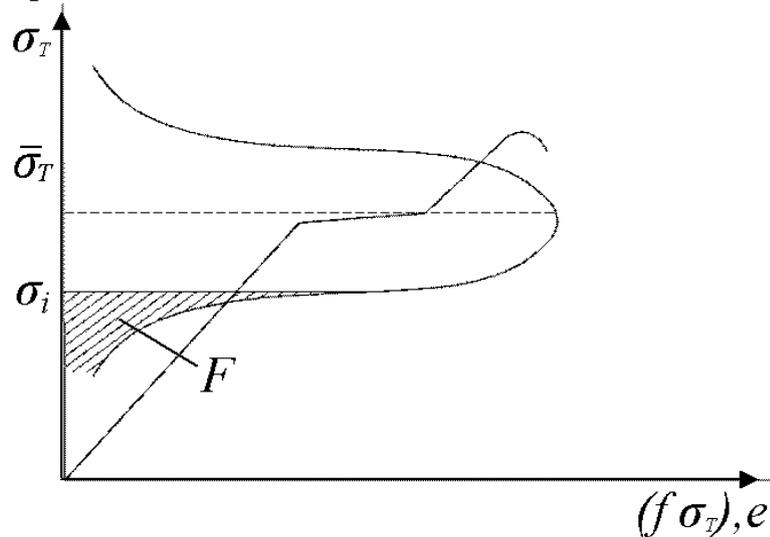


Рис. 3.8. Распределение предела текучести и диаграмма напряжение – деформация

Изменение размеров и формы нижней головки шатуна приводит к потере формы вкладыша, как тонкостенного элемента, потере плотности его посадки и провороту. Проворачивание вкладышей – результат его закономерного деформирования по образующей в виде прогиба.

При анализе деформаций вкладышей и возможных причин их проворачивания исходили из упругопластических свойств материала вкладышей и их напряженно – деформированного состояния при эксплуатации [26, 23].

Исследования вкладышей вышедших из строя двигателей (проведенные в лаборатории кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ имени Гагарина Ю.А. и ОАО «Саратовский автоцентр КАМАЗ»), подтвердили исследования [11, 13], что изменения наружной и внутренней поверхностей, формы вкладышей предшествуют процессу их проворачивания. Эти изменения (рис. 3.9, 3.10) проявляются в виде прогиба вкладышей по образующей (Δ), уменьшения в свободном состоянии их размера (δ), появления натиров, следов температурного

воздействия, прижогов, приводящие к ухудшению условий посадки вкладыша (натяга) [26].

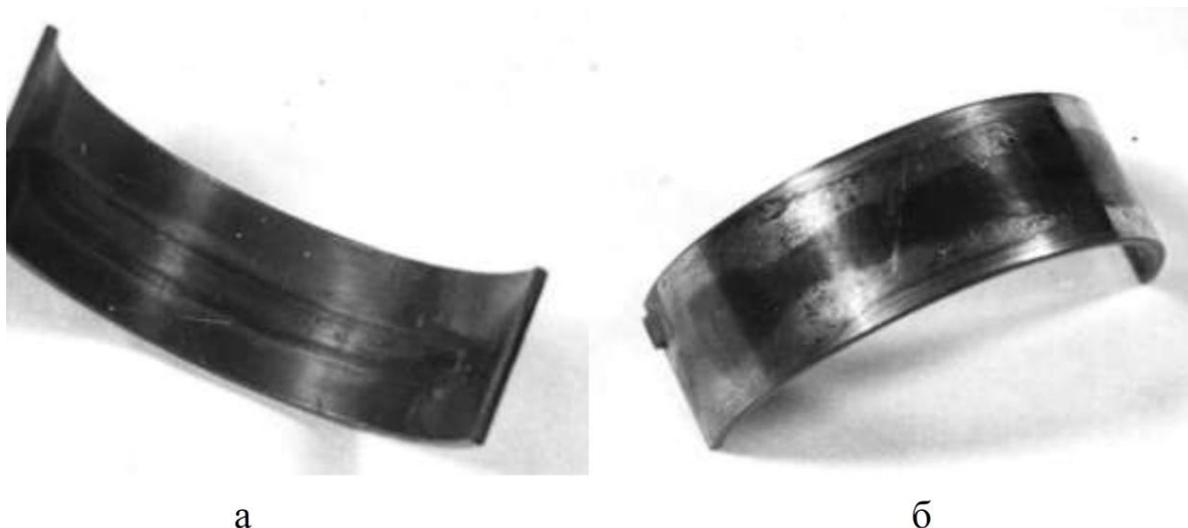


Рис. 3.9. Вид вкладыша после эксплуатации со стороны рабочей поверхности (а) и постели (б)

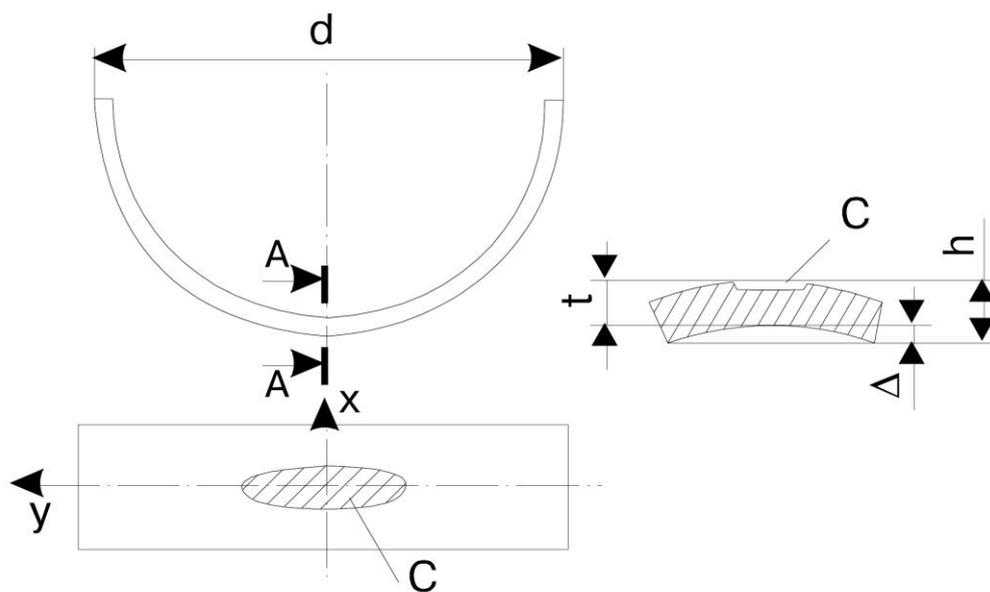


Рис. 3.10. Схема деформации и расположения зон натиров и прижогов шатунных вкладышей

Одной из причин схватывания вкладышей с шейками коленчатого вала и их проворачивания принято считать поступление с маслом в подшипники абразивных частиц [25]. Абразивные частицы, попадая между трущимися поверхностями, образуют кольцевые риски, как на шейке вала, так и на антифрикционном слое вкладыша, что приводит к увеличению зазора в сопряжении, повышению температуры, задиру и проворачиванию

вкладышей. Для снижения воздействий данного фактора на двигателе КамАЗ улучшили очистку масла, используя бумажные фильтрующие элементы, совершенствовали центробежную очистку масла, но проворачивание вкладышей не было исключено [19].

Проведенные исследования эксплуатационных разрушений вкладышей на силовых агрегатах КамАЗ [26, 13] показывают, что проворачивание вкладышей происходит вследствие их деформирования.

Коренные вкладыши выходят из строя в 5 раз реже, чем шатунные [26, 112, 123, 128], причинами их проворачивания является снижение давления в системе смазки (неисправности масляного насоса, задиры и износ шеек и вкладышей), схватывание сопряжения из-за граничных условий смазки и прогиба вкладышей [26, 1, 12, 19, 21, 31].

Из вышесказанного следует, что причиной задиров и проворачивания вкладышей коленчатых валов является нарушение условий жидкостной смазки в подшипнике.

Вследствие сложной геометрической формы и условий нагружения элементов шатуна аналитические решения имеют погрешность и требуют коррекции с помощью эмпирических коэффициентов. Для более точного исследования напряженно-деформированного состояния шатуна используем метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий решать задачи теории упругости применительно к деталям сложной формы [31].

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) шатуна, с использованием метода конечных элементов (МКЭ), и твердотельное моделирование, с автоматическим построением конечно-элементной сетки (трехмерные конечные элементы), рис. 3.11, подтверждают результаты исследования рассеивания размеров и форм рабочих поверхностей деталей вследствие действия нагрузок в процессе эксплуатации [31]. Треугольные трехузловые конечные элементы позволяют достаточно точно аппроксимировать криволинейные границы подобластей шатуна.

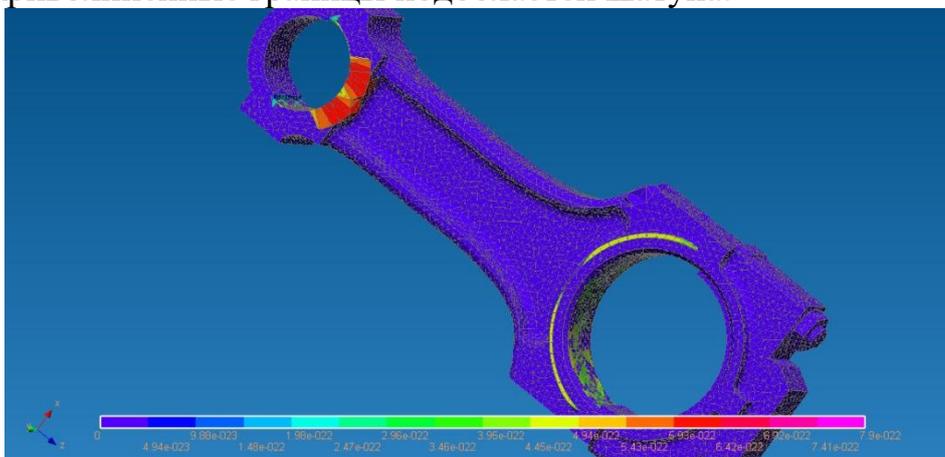


Рис. 3.11. Распределение напряжений в нижней и верхней головках шатуна σ_z , (МПа) при действии сил давления газов

Вычисление осуществляем с помощью программы APM Win Machine 9.7, которая позволяет определять усилия, действующие в подшипниках поршневой и кривошипной головок, инерционные усилия, действующие на каждый конечный элемент.

При расчете верхней головки шатуна сила давления газов прикладывалась к поршню, при расчете нижней головки шатуна сила давления прикладывалась к шатунной шейке коленчатого вала, а сила инерции – в виде объемной силы. Перераспределение нагрузок при взаимодействии шатуна с элементами цилиндропоршневой и кривошипно-шатунной группы осуществлялось введением контактных элементов.

С учетом этих процессов при ремонте шатуна целесообразно контролировать овальность нижней головки и восстанавливать ее при достижении предельной величины [16, 37].

3.2 Изменение технического состояния коленчатого вала

Сила S (рис. 3.2), действующая на шатунные шейки коленчатого вала, который представляет собой пространственную многоопорную балку переменного сечения (рис. 3.12), может быть разложена на две составляющие: радиальную, направленную вдоль оси кривошипа, и тангенциальную силу, действующую перпендикулярно кривошипу (рис. 3.13) [31, 32]:

$$Z = P_1 \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos(\beta)}; \quad (3.17)$$

$$T = P_1 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\beta)}. \quad (3.18)$$

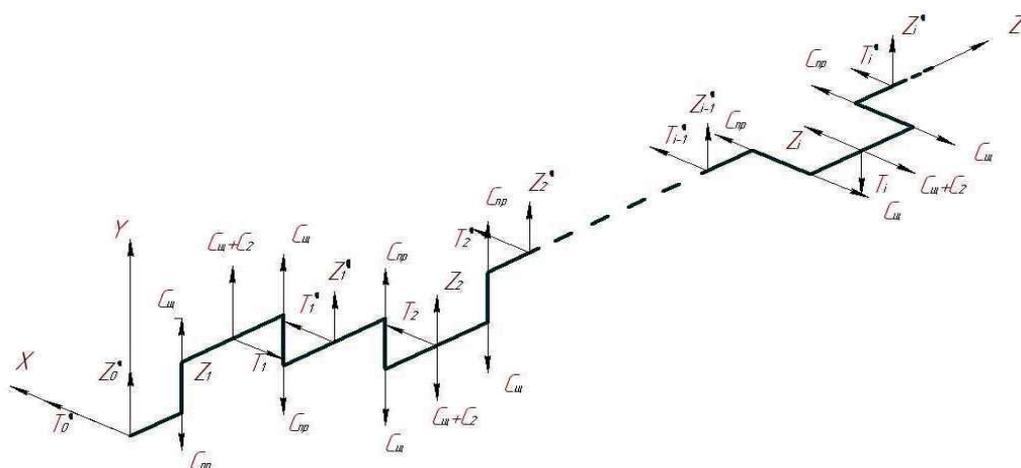


Рис. 3.12. Расчетная модель коленчатого вала V-образного двигателя

По результатам теплового и динамического расчета построены графики нагрузок на коренную опору блока цилиндров (рис.3.13).

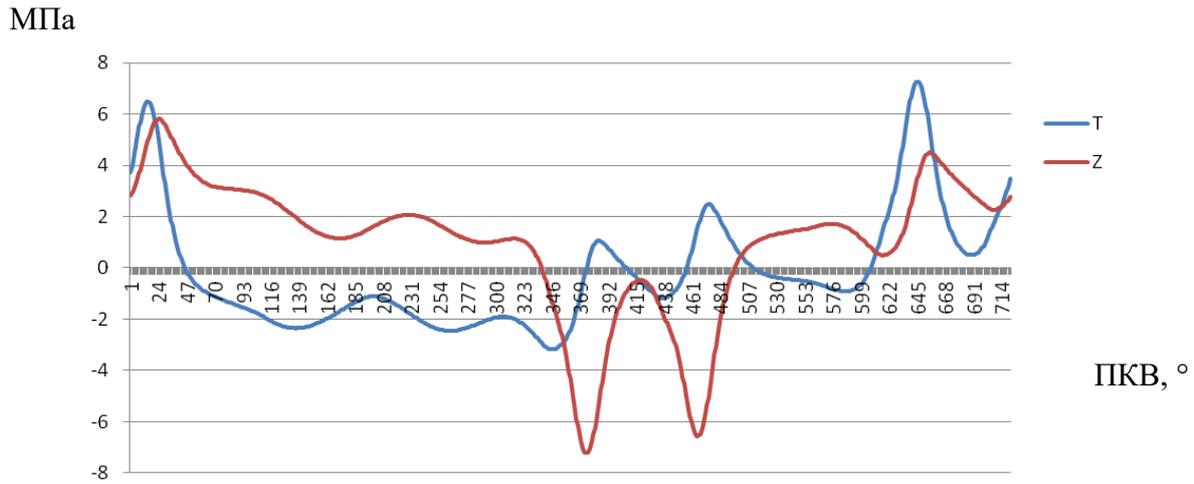


Рис. 3.13. Нагрузки на коренную опору блока цилиндров по углу поворота коленчатого вала:
 T – тангенциальное усилие, Z – нормальное усилие

Система нагружающих коленчатый вал усилий в течение рабочего цикла двигателя непрерывно меняется по углу поворота вала (рис. 3.12).

Нагрузка T, от действия газовых сил на кривошип, создает крутящий момент $M_{кр}$ на валу:

$$M_{кр} = TR. \quad (3.19)$$

Также на шатунную шейку действуют изгибающие моменты в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 3.14) [31].

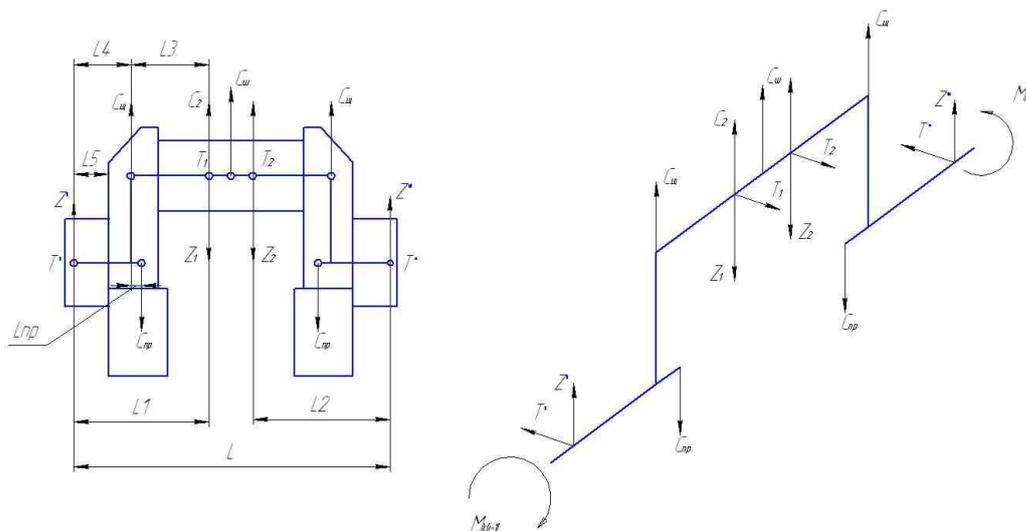


Рис. 3.14. Расчетная схема колена вала V-образного двигателя:
 $C_{ш}$, $C_{щ}$, $C_{пр}$ и C_2 – центробежные силы шатунной шейки, щеки, противовеса и массы шатуна, отнесенной к шатунной шейке

Напряжения кручения $\tau_{\text{ш}}$ и изгиба $\sigma_{\text{иш}}$ определяются в точке выхода на поверхность маслоподводящего отверстия. Крутящий момент, действующий на шатунную шейку, определяется из выражения:

$$M_{\text{кш}} = M_{\text{к}(i-1)} + T^1 R. \quad (3.20)$$

Максимальные, минимальные и средние значения касательных напряжений, а также амплитуда определяются по формуле

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{ш max}} &= \frac{M_{\text{км max}}}{W} \\ \tau_{\text{ш min}} &= \frac{M_{\text{км min}}}{W} \\ \tau_{\text{шср}} &= \frac{\tau_{\text{ш max}} + \tau_{\text{ш min}}}{2} \\ \tau_{\text{ша}} &= \frac{\tau_{\text{ш max}} - \tau_{\text{ш min}}}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (3.21)$$

где $W_{\text{кш}}$ – момент сопротивления кручению шатунной шейки в расчетном месте (месте маслоподводящего отверстия или по галтели).

Изгибающий момент, действующий в расчетном сечении в плоскости колена (рис. 3.14):

$$M_z = Z^1 (L_4 + L_3) + C_{\text{ш}} L_3 - C_{\text{пр}} (L_3 - L_{\text{пр}}). \quad (3.22)$$

Изгибающий момент, действующий в расчетном сечении в плоскости, перпендикулярной плоскости колена:

$$M_{\text{ишГ}} = T^1 L_1. \quad (3.23)$$

Напряжения изгиба в плоскости маслоподводящего отверстия:

$$\sigma_{\text{иш}} = \frac{M_{\text{иш}}}{W_{\text{иш}}}, \quad (3.24)$$

где $W_{\text{иш}}$ – момент сопротивления изгибу шатунной шейки (в месте маслоподводящего отверстия или по галтели).

Максимальные и минимальные напряжения, амплитуда и среднее значение нормальных напряжений цикла:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{uui \max} &= \frac{M_{uui \max}}{W_{uui}} \\ \sigma_{uui \min} &= \frac{M_{uui \min}}{W_{uui}} \\ \sigma_{uui a} &= \frac{\sigma_{uui \max} - \sigma_{uui \min}}{2} \\ \sigma_{uui t} &= \frac{\sigma_{uui \max} + \sigma_{uui \min}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Наиболее опасными являются галтели коленчатого вала – места перехода щек в коренную шейку вала. Щеки нагружаются переменными и изгибающими моментами в двух плоскостях, а также сжимающими и растягивающими силами, что приводит к образованию усталостных трещин и поломке вала (рис. 3.15) [26, 31].



Рис. 3.15. Усталостное разрушение коленчатого вала

Также в галтелях действуют напряжения от кручения соответствующей щеки. Анализ поломок коленчатых валов двигателя КамАЗ показывает, что разрушения в основном носят усталостный характер, преимущественно из-за действия изгибающих моментов, нежели от действия крутящих моментов. Разрушение чаще начинается в галтелях сопряжения щек с шейками или у краев отверстий, масляного канала для смазывания шеек, т.е. в зонах наибольшей концентрации напряжений (рис. 3.16) [13, 12, 23, 33].

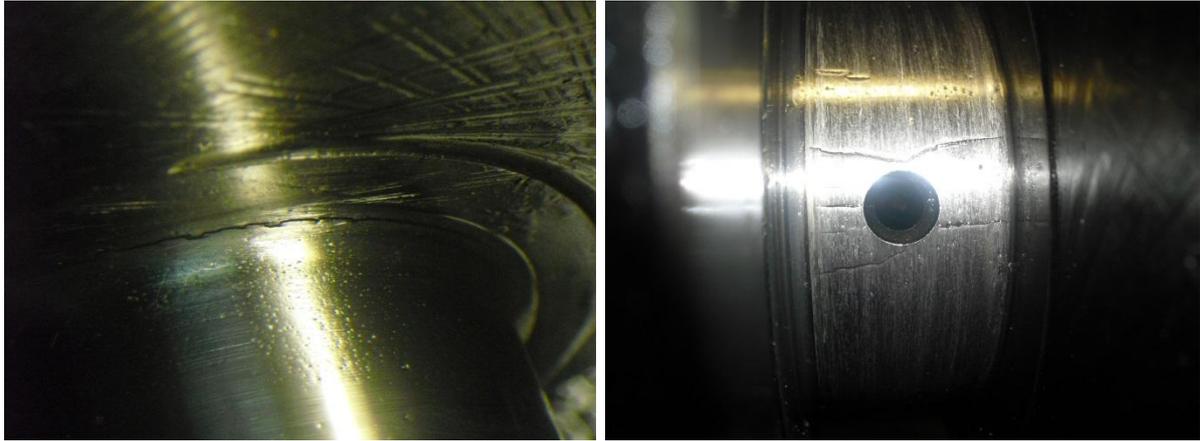


Рис. 3.16. Усталостные трещины в зонах концентрации напряжений: в галтелях вала (а), в зоне маслоподводящего отверстия (б)

Разрушение коленчатого вала по щеке происходит в зоне перекрытия шатунных и коренных шеек, для коленчатых валов двигателя КамАЗ перекрытие составляет 27,5 мм при номинальном размере шеек [26].

Изгибающий момент, действующий в плоскости колена:

$$M_{\text{ищ}} = Z^1 L_4 + C_{\text{пр}} L_{\text{пр}}. \quad (3.26)$$

Номинальные напряжения изгиба в этой плоскости:

$$\sigma_{\text{ищ}} = \pm \frac{M_{\text{ищ}}}{W_{\text{ищ}}}, \quad (3.27)$$

где $W_{\text{ищ}} = \frac{b^2 h}{6}$ – момент сопротивления щеки изгибу в плоскости колена;

знак «плюс» относится к точке 2, знак «минус» – к точке 1 (рис. 3.14).

Растягивающая (сжимающая) сила, действующая на щеку:

$$P_{\text{щ}} = -Z + C_{\text{пр}}. \quad (3.28)$$

Напряжения растяжения (сжатия) в щеке:

$$\sigma_{\text{рщ}} = P_{\text{щ}} / F_{\text{щ}}. \quad (3.29)$$

где $F_{\text{щ}} = bh$ – площадь сечения щеки.

Общие нормальные номинальные напряжения определяются как сумма напряжений от изгиба и от растяжения (сжатия):

$$\sigma_{\text{щ}} = \sigma_{\text{ищ}} + \sigma_{\text{рщ}}. \quad (3.30)$$

Для более полного и точного анализа напряженно-деформированного состояния шеек коленчатого вала воспользуемся численными методами. Численные методы, в отличие от аналитических, позволяют получить решение задачи не в виде окончательных расчетных зависимостей, а в виде

массивов чисел, характеризующих поля напряжений или других исследуемых параметров узла или детали. Наиболее универсальным из численных методов является метод конечных элементов МКЭ [32]. Данный метод позволяет достаточно точно описать криволинейные границы деталей, различные условия закрепления и нагружения исследуемых элементов. Анализ напряженно-деформированного состояния в элементах двигателя, находящихся в условиях высоких механических нагрузок при умеренных температурах проводили методами теории пластичности, устанавливающей связи между пластическим деформированием и напряжением [6, 31].

Деформация θ пропорциональна среднему нормальному напряжению:

$$\sigma_o = K \theta, \tag{3.31}$$

где $K = E/3(1-2\mu)$.

Как следует из (3.31), связь деформации θ и напряжения σ_o такая же, как в теории упругости [32]. Исходя из этого, в результате пластического деформирования изменения объема тела не происходит, а меняется форма.

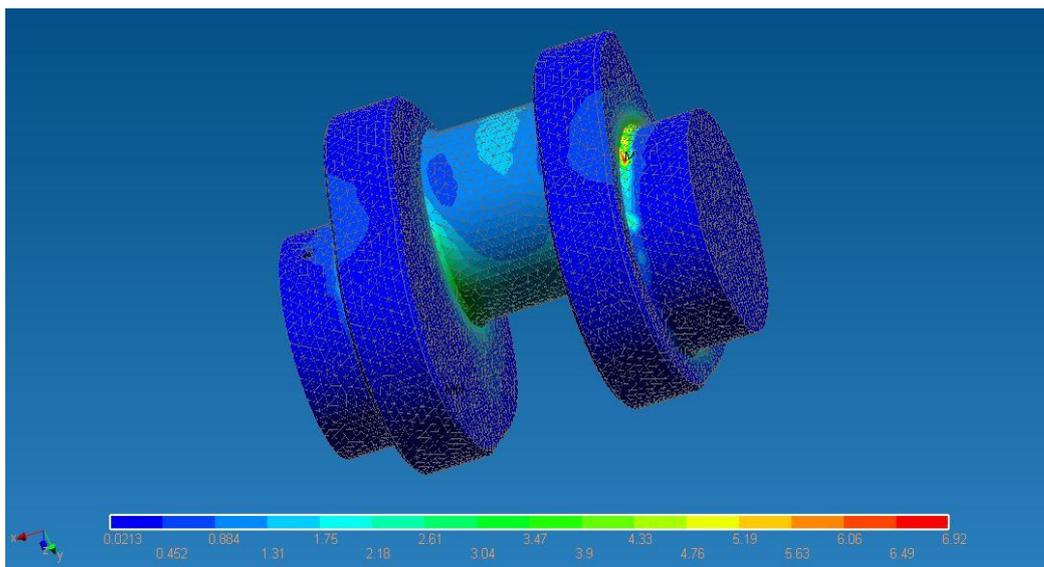


Рис. 3.17. Распределение напряжений σ_z (МПа) в коленчатом вале двигателя КамАЗ-740

Наибольшие напряжения находятся в зоне галтелей шатунной и коренной шеек в результате действия изгибающих моментов. Увеличение НДС в местах концентрации напряжений (галтели и области вблизи маслоподводящих отверстий) с повышением динамических нагрузок, в свою очередь, приводит к образованию усталостных микротрещин (рис. 3.16).

Техническое состояние коренных подшипников характеризуется: износом и овальностью коренных шеек коленчатого вала, размерами и формой вкладышей, коренных опор блока цилиндров и их соосностью, а также зазорами между сопряженными деталями [14, 18, 199, 33].

Основное воздействие на коренную шейку оказывают крутящие моменты. Максимальное значение силы давления газов, направленное вдоль оси цилиндра, достигает $p_z=8,4$ МПа (рис. 3.18).

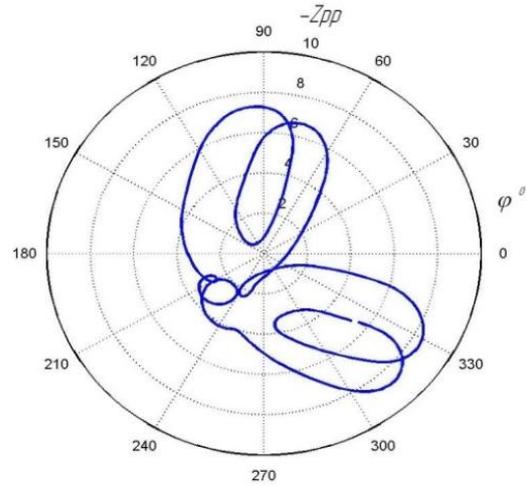


Рис. 3.18. Векторная диаграмма сил, действующих на коренную шейку

Максимальные и минимальные номинальные напряжения, амплитуда и среднее значение касательных напряжений цикла определяются из выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{k \max} = \frac{M_{kk \max}}{W_{kk}} \\ \tau_{k \min} = \frac{M_{kk \min}}{W_{kk}} \\ \tau_{xa} = \frac{\tau_{k \max} - \tau_{k \min}}{2} \\ \tau_{km} = \frac{\tau_{k \max} + \tau_{k \min}}{2} \end{array} \right. , \quad (3.32)$$

где $W_{kk} = \pi \frac{d_1^4 - d_{1BH}^4}{16d_1}$ – момент сопротивления кручению коренной шейки, а

именно $M_{kk \max}$, $M_{kk \min}$, максимальный и минимальный крутящие моменты в коренных шейках, определяют по выражению $M_{ki} = M_{k(i-1)} + TR$.

Опорные реакции левой и правой опор колена вала (рис. 3.11) определяются из выражений:

опорные реакции левой опоры

$$\left. \begin{array}{l} Z' = (Z_1 - C_2) \frac{L - L_1}{L} + (Z_2 - C_2) \frac{L_2}{L} - 0,5C_{ш} - C_2 - C_{ш} + C_{пр}; \\ T' = T_1 \frac{L - L_1}{L} + T_2 \frac{L_2}{L}; \end{array} \right\} (3.33)$$

опорные реакции правой опоры

$$\left. \begin{aligned} Z'' &= (Z_2 - C_2) \frac{L - L_2}{L} + (Z_1 - C_2) \frac{L_1}{L} - 0,5C_{ш} - C_2 - C_{ш} + C_{пр}); \\ T'' &= T_2 \frac{L - L_2}{L} + T_1 \frac{L_1}{L}. \end{aligned} \right\} (3.34)$$

Исследования надежности коленчатых валов показывают [117, 98, 262, 303, 304], что основной причиной их выхода из строя являются задиры на шейках коленчатых валов (40% двигателей). Причиной низкой надежности считаются неудовлетворительные антизадирные свойства при недостаточном пульсирующем подводе масла в подшипники [6, 7, 10, 11, 14, 119, 18, 15], нарушении в них условий гидродинамической смазки. На основании результатов исследований установлена связь между задиром, схватыванием шеек коленчатого вала с вкладышем и процессом зарождения трещин.

В соответствии с исследованиями проф. А.С. Денисова [10, 12, 16] зависимость давления масла в двигателе от пробега автомобиля, уменьшающаяся экспоненциальная:

$$p = p_0 e^{-b_p l}, \quad (3.35)$$

где p_0 – давление в конце приработки, приведенное к началу эксплуатации; b_p – параметр интенсификации; l – пробег = 0.

Нарушение условий гидродинамической смазки повышает вероятность изменения условий трения в сопряжениях ресурсопределяющих деталей и возникновения условий недостаточной жидкостной смазки (рис. 3.19) с коэффициентом трения, достигающим 0,05-0,08 [31, 22].

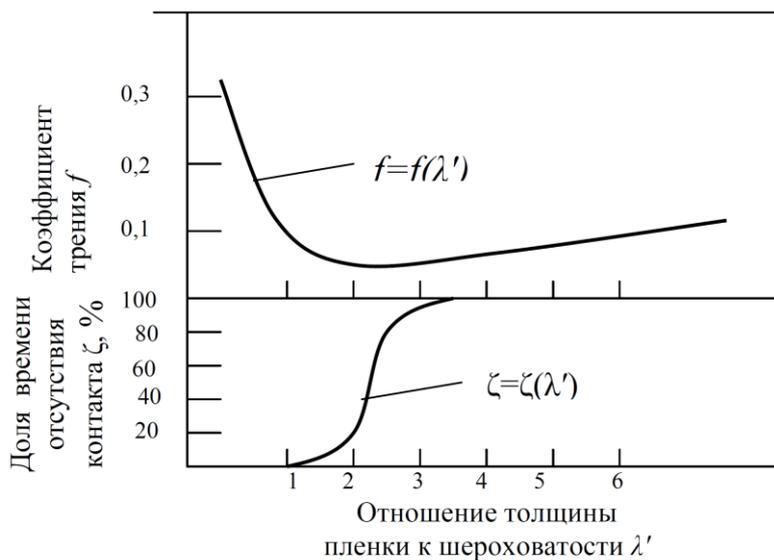


Рис. 3.19. Кривые Штрибека и доли времени отсутствия контакта (схема) [11, 20]

Подшипники, тяжело нагруженные и работающие при высокой частоте вращения, нуждаются в постоянном подводе масла под давлением, для обеспечения гидродинамической смазки. При нарушении этого (нестабильность подачи, уменьшение давления масла) образуются условия полужидкостной смазки, приводящие к уменьшению толщины масляной пленки и повышению вероятности соприкосновения микронеровностей шейки вала и вкладыша [10, 30], тепловыделение в подшипнике увеличивается, вследствие чего полужидкостное трение сопряжено с опасностью перегрева и выхода подшипника из строя (рис. 3.20).

Процесс движения вала в подшипниках скольжения обусловлен изменяющимися условиями работы (трения) и перемещениями вала в подшипнике по полукругу Гюмбеля (рис. 3.21) [16]. В начальный период вращения и условиях граничной смазки вал перемещается в сторону, противоположную вращению, на угол φ , в таких условиях происходит касание микронеровностей пары трения и их истирание (рис. 3.21, *a*).

С увеличением частоты вращения вал проталкивает под себя масло и «всплывает», образуя под собой масляный клин (гидродинамическая смазка).

Описанная траектория движения вала представлена на рис. 3.21, *в*. При $l/d \rightarrow \infty$ траектория представляет собой правильную полуокружность (полукруг Гюмбеля) [16].



Рис. 3.20. Задиры шейки коленчатого вала

При изменении условий работы в подшипнике и перехода вала его центру по кругу Гюмбеля нагрузка в этот момент увеличивается, и положение вала становится не устойчивым, он начинает прецессировать, касаясь о стенки подшипника. Для возвращения условий гидродинамической смазки необходимы условия для перемещения вала обратно по кругу Гюмбеля.

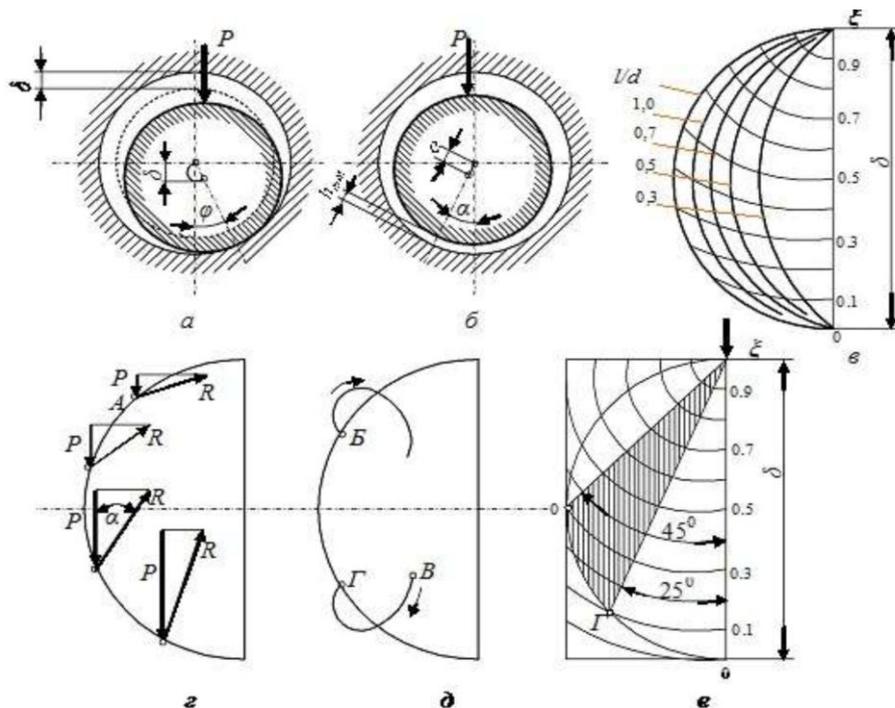


Рис.3.21. Положение вала в подшипнике и схема образования циклических вихревых движений вала

Таким образом, изменения в работе подшипника скольжения вызывают смещение вала, движение вала становится циклическим, что приводит к касанию микронеровностей сопряжения, повышению трения и тепловыделению в подшипнике [16].

При повышении относительной толщины масляного слоя ξ вал смещается под действием внешних нагрузок с равновесного положения (точка Б на рис. 3.21, д), совершает движение по спирали возрастающего радиуса, пока не приблизится к поверхности подшипника и не оттолкнётся от неё под действием гидродинамических сил, возвращаясь в исходное положение, после чего цикл возобновляется.

При небольших значениях толщины масляного слоя ξ вал перемещается по спирали (точка В), циклическое движение уменьшается, возобновляются условия гидродинамической смазки. Разделом между стабильным и нестабильным условием жидкостной смазки является место соприкосновения полукруга Гюмбеля с направлением приложения нагрузки, точка О (рис. 3.21, е). В данном месте оси вала и подшипника находятся под углом 45° к действию силы, а $\xi = 1 - \varepsilon = 0,3$.

При относительной толщине масляного слоя $\xi < 0,3$ коэффициент стабильности его увеличивается. При $\xi < 0,1$ могут возникнуть условия опять перехода подшипника в область граничной смазки. Т.е условия, при которых подшипник устойчиво работает при жидкостном трении, находится между 45° и 25° рис. 3.21 (заштрихованная часть) [16].

Вследствие того, что работоспособность подшипника во многом обусловлена внешними (эксплуатационными) факторами, то связь коэффициента трения с величиной зазора в подшипнике носит вероятностный характер.

Для описания аналитической зависимости интенсивности изнашивания от зазора в сопряжении подшипника скольжения примем линейный характер зависимости между интенсивностью изнашивания α и коэффициентом трения f в виде:

$$\alpha = c \cdot f, \quad (3.36)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Для обоснования другого допущения исследуем характер взаимодействия микровыступов сопряжения при неустойчивой работе подшипника (рис. 3.22) [26].

В условиях гидродинамической смазки и значений толщины масляной пленки, при которых не происходит касания микронеровностей пары трения, коэффициент трения f сопряжений будет равен коэффициенту жидкостного трения $f_{ж}$. Величина масляного слоя h_0 при таких условиях не будет меняться (линия 1 на рис. 3.22).

При изменении условий работы, уменьшении толщины масляного слоя h_0 (кривая 2 на рис. 3.22) возникают условия полужидкостной смазки $\tau_{пж}$ (или $l_{пж}$) и вероятность контакта микровыступов P_{k1} . В таких условиях возникает приращение полужидкостного трения $f_{пж}$.

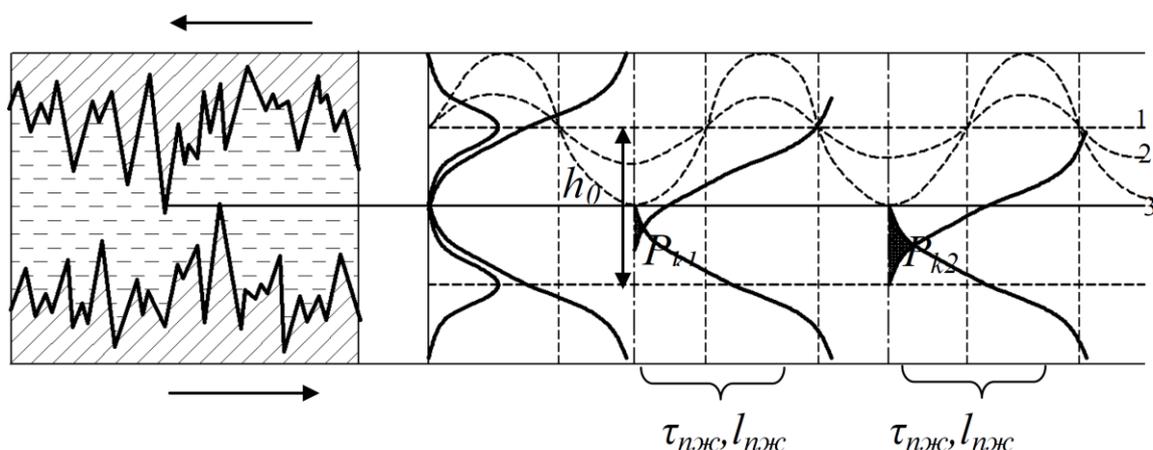


Рис.3.22. Схема взаимодействия микронеровностей поверхности трения при постоянном и переменном режимах (толщина масляной пленки h):
 $\tau_{пж}, l_{пж}$ – соответственно время работы и путь трения в полужидкостном режиме;
 P_{k1}, P_{k2} – вероятность взаимодействия микровыступов

Общий коэффициент трения при этом составит:

$$f = f_{ж} + f_{пж}. \quad (3.37)$$

С увеличением износа в сопряжении амплитуда колебаний повышается (кривая 3 на рис. 3.22), что повышает время работы сопряжения в условиях

полужидкостной смазки $\tau_{\text{пж}} (l_{\text{пж}})$ и вероятность контакта микровыступов P_{k2} , а также приращение $f_{\text{пж}}$. Принимая во внимание форму кривых распределения высоты микровыступов примем допущение о прямой пропорциональности увеличения зазора ΔS в сопряжении из-за износа и полужидкостного трения $f_{\text{пж}}$:

$$f = f_{\text{ж}} + c' \cdot \Delta S, \quad (3.38)$$

где c' – коэффициент пропорциональности.

Исходя из выражений (3.36) и (3.38) интенсивности изнашивания α :

$$\alpha = \alpha_0 + b \cdot \Delta S, \quad (3.39)$$

где $b = c \cdot c'$ – изменение интенсивности изнашивания на единицу приращения зазора (на единицу износа); α_0 – интенсивность изнашивания при устойчивом режиме работы подшипника (в конце периода приработки).

Зависимость интенсивности изнашивания элементов двигателя от наработки обоснована в работах проф. Ф.Н. Авдонькина [2, 3, 6], но он рассматривал увеличение зазора вследствие работы удара в сопряжениях. Анализ исследований работы подшипников скольжения с жидкостной смазкой показывает, что при обеспечении гидродинамических условий смазки удар в сопряжении невозможен из-за демпфирующих свойств масла между поверхностями трения. Более того, работа удара является интегральным показателем, а интенсивность изнашивания – дифференциальным.

Зависимость (3.39) можно записать:

$$\alpha = \frac{dS}{dl} = \alpha_0 + b \cdot \Delta S. \quad (3.40)$$

После преобразований получим:

$$l = \int \frac{dS}{\alpha} = \int \frac{dS}{(\alpha_0 + b \Delta S)}. \quad (3.41)$$

Найдем неопределенный интеграл:

$$l = \frac{1}{b} \ln(\alpha_0 + b \Delta S) + c_u. \quad (3.42)$$

Постоянную интегрирования c_u определим из начальных условий:

$\Delta S = 0$ при $l = 0$:

$$c_u = -\frac{1}{b} \ln \alpha_0. \quad (3.43)$$

С учетом этого выражение (3.42) примет вид:

$$l = \frac{1}{b} \ln \frac{(\alpha_0 + b\Delta S)}{\alpha_0}. \quad (3.44)$$

Зависимость износа от пробега с учетом (3.44)

$$\Delta S_n = \frac{\alpha_{n0}}{b_n} (e^{b_n l} - 1). \quad (3.45)$$

Выражение $\frac{\alpha_{n0}}{b_n}$ – это значение износа в конце приработки S_{n0} , вследствие чего общий износ при наработке увеличивается по экспоненциальной зависимости:

$$S_n = S_{n0} e^{b_n l}, \quad (3.46)$$

интенсивность изнашивания с учетом зависимостей (3.40) и (3.45):

$$\alpha_n = \alpha_{n0} e^{b_n l}, \quad (3.47)$$

где α_{n0} , S_{n0} – соответственно интенсивность изнашивания и износ в конце приработки, приведенные к началу эксплуатации ($l=0$); b_n – изменение интенсивности изнашивания [16].

Таким образом, обоснованные зависимости могут быть теоретической основой прогнозирования изменения технического состояния подшипников коленчатого вала и других динамически нагруженных сопряжений в процессе эксплуатации силового агрегата.

Для обеспечения надежной работы подшипников на всех режимах работы двигателя необходимо обеспечить два условия, вытекающих из физического анализа процесса:

Первое – чтобы производительность насоса не уменьшалась из-за снижения сопротивления в цепи (износов в сопряжениях), что частично выполнено на двигателях КамАЗ-Евро, до наработки 80-100 тыс. км.

Для этого необходимо создать на шейках коленчатых валов тонкий слой твердой смазки на основе меди, предотвращающей процессы схватывания при критических условиях работы сопряжения, и тем самым обеспечить условие положительного градиента механических свойств [7, 18, 22, 25, 34], согласно которому поверхность трения должна обладать меньшей прочностью, чем нижележащие слои, т.е. обеспечить наличие смазки (либо жидкостной, либо твердой) между трущимися поверхностями, для предотвращения процессов схватывания в сопряжении [9, 11, 13].

Второе – относится к механическому взаимодействию; это – условие минимального внедрения контактируемого тела в сопряженную поверхность [10, 18, 17].

Твердость шеек коленчатых валов должна быть высокой (50-55 HRC) при оптимальной шероховатости [3, 33].

Изменения в смазочной системе двигателей КамАЗ-Евро, по сравнению с базовым двигателем КамАЗ-740 (повышение производительности масляного насоса, использование теплообменника, совершенствование системы фильтрации, повышение исходного давления до 0,55 МПа и др.) позволили снизить задиры шеек коленчатых валов, но не устранить их совсем [13, 27].

3.3 Изменение технического состояния опор блока цилиндров

Нагрузки на опору блока цилиндров, воспринимаемые от коренных шеек коленчатого вала, отклонены от вертикали в обе стороны на 45° (рис. 3.23).

Следствием действия равнодействующей газовых сил Q является изменение размеров и формы коренной опоры блока. Горизонтальная составляющая равнодействующей силы Q_x образует изгибающий момент.

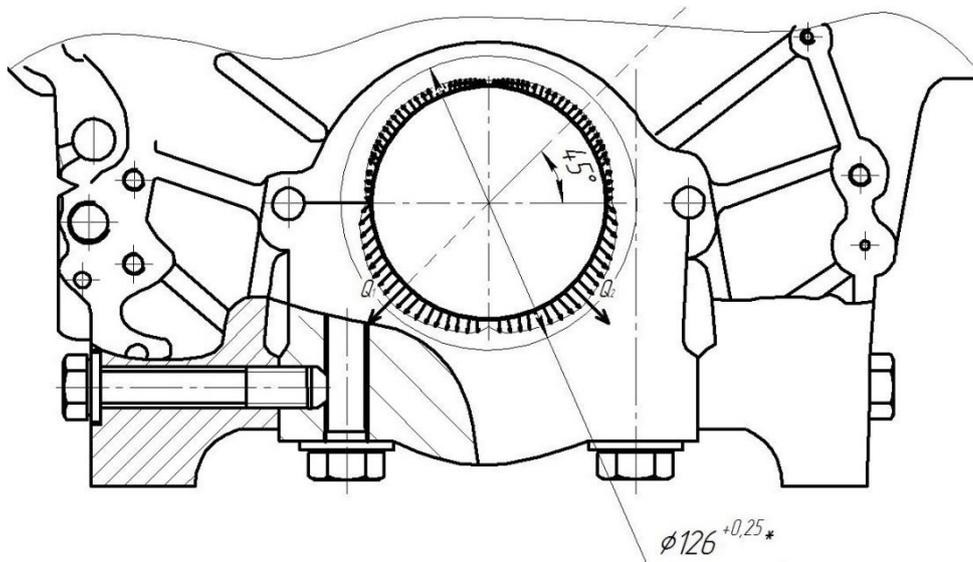


Рис. 3.23. Схема действия равнодействующих газовых сил Q

Это приводит к повышению зазора в сопряжении вал – вкладыш и увеличению динамических нагрузок на опору. Часть горизонтальной составляющей Q'_x :

$$Q'_x = Q_x f_{тр}, \quad (3.48)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения.

Наибольший изгибающий момент находится в плоскости разъема картера и крышки [14, 39]. Вследствие действия этих нагрузок происходит фреттинг-изнашивание в сопряжении картера и крышки опоры блока цилиндров, что изменяет размер и форму опоры (в виде овальности), а в

сопряжении вкладыш и опора блока этот вид изнашивания проявляется в виде корсетности, аналогично как и в нижней головке шатунов.

Это приводит к уменьшению жесткости вкладыша и передачи нагрузки на опору блока цилиндров через упругий элемент (вкладыш). Поэтому здесь будут наблюдаться максимальные амплитуда вибраций и скорость изнашивания. Это подтверждается следами фреттинг-изнашивания на коренной опоре и на обратной стороне коренных вкладышей (рис. 3.24) [14].



Рис. 3.24. Фреттинг-изнашивание на крышке коренной опоры (а) и на обратной стороне коренного вкладыша (б)

В соответствии с обоснованными профессором Ф.Н. Авдонькиным зависимостями интенсивности изнашивания от износа:

$$\alpha_1 = \alpha_{01} + bS_1; \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{02} + bS_2, \quad .49)$$

(3

.50)

где α_1 , α_2 – соответственно интенсивность изнашивания в вертикальной и горизонтальной плоскости, мкм/тыс. км; α_{01} , α_{02} – интенсивность изнашивания в конце приработки, мкм/тыс. км; b – изменение интенсивности изнашивания за единицу износа, 1/тыс. км; S_1 , S_2 – износ, мкм.

Выражение для интенсивности овализации $\Delta\alpha$ будет иметь вид

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (3)$$

или

.51)

$$\Delta\alpha = \alpha_{01} - \alpha_{02} + bS_1 - bS_2 = \Delta\alpha_0 + b(S_1 - S_2).$$

(3

.52)

То есть интенсивность овализации $\Delta\alpha$ в процессе изнашивания возрастает прямо пропорционально величине овальности. Это приводит к

увеличению овальности коренной опоры и ухудшению условий монтажа коренного вкладыша после замены, поэтому при ремонте необходимо контролировать и при необходимости устранять макрогеометрические отклонения в коренных опорах.

При увеличении динамических нагрузок, вследствие увеличения зазоров в сопряжении и достижения действующим напряжением предела текучести σ_T материала блока цилиндров, возникают условия начала пластического деформирования рабочих поверхностей опор, а при повышении температуры в трущемся сопряжении появляются такие свойства, как ползучесть материала. После снятия нагрузки в элементах опор блока цилиндра имеют место остаточные деформации и напряжения. Общая деформация ϵ равна сумме деформаций упругости ϵ_y , пластичности $\epsilon_{пл}$ и деформации ползучести $\epsilon_{пол}$:

$$\epsilon = \epsilon_y + \epsilon_{пл} + \epsilon_{пол}. \quad (3.53)$$

Появление пластической деформации происходит как вследствие достижения действующими напряжениями предельных значений (предела текучести материала σ_T),

так и вследствие ползучести в условиях повышенных температур. Ползучесть проявляется у углеродистых сталей и чугунов при температуре свыше 300°C . Существенным фактором является продолжительность работы детали в таких условиях. Если перемещения точек тела опоры блока остаются неизменными, то со временем изменяются напряжения, и имеет место



Рис. 3.25. Трещина в опоре блока (фотография сделана с микроскопа Webers W2C $\times 200$)

чистая релаксация, проявляющаяся в образовании трещин в опоре блока, обычно в зоне концентрации напряжений – по отверстию масляного канала (рис. 3.25).

Классическая схема процесса ползучести, при постоянном во времени напряжении σ , представлена на рис. 3.26. Существует упругое и пластическое последствие. В первом случае при снятии нагрузки (линия BC на рис. 3.26), деформации уменьшились бы до нуля, в случае пластического последствия, характерного для опор блока цилиндров они, затухая со временем, сохраняются (линия CD на рис. 3.26) [32].

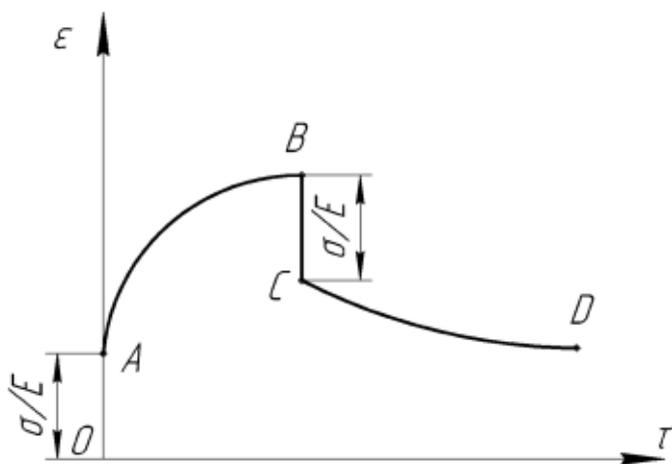


Рис. 3.26. Классическая кривая, иллюстрирующая пластическое последствие

В основе расчетов на ползучесть лежат данные экспериментов при одноосном напряженном состоянии на образцах при постоянной во времени

нагрузке и температуре, представленные в виде кривых ползучести на рис. 3.26.

Изменение размера и формы опоры блока цилиндров в процессе пластического деформирования происходит в нескольких стадиях при эксплуатации двигателя.

В первой стадии ползучести за счет механического упрочнения поверхностного слоя опоры скорость деформации ползучести ξ^c :

$$\xi^c = d\epsilon / d\tau. \quad (3.54)$$

уменьшается до минимальной ξ_{\min}^c , которая сохраняется на протяжении длительного времени эксплуатации (второй стадии). Первая и особенно вторая стадии представляют наибольший интерес с точки зрения длительности работоспособности материала в условиях ползучести. В третьей стадии, заканчивающейся разрушением, поверхность теряет размер и форму, происходит перегрев сопряжения, проворот вкладыша (вязкое разрушение поверхности вследствие задиров), или образование внутренних трещин (хрупкое разрушение поверхности). С ростом напряжения и температуры продолжительность второй стадии уменьшается.

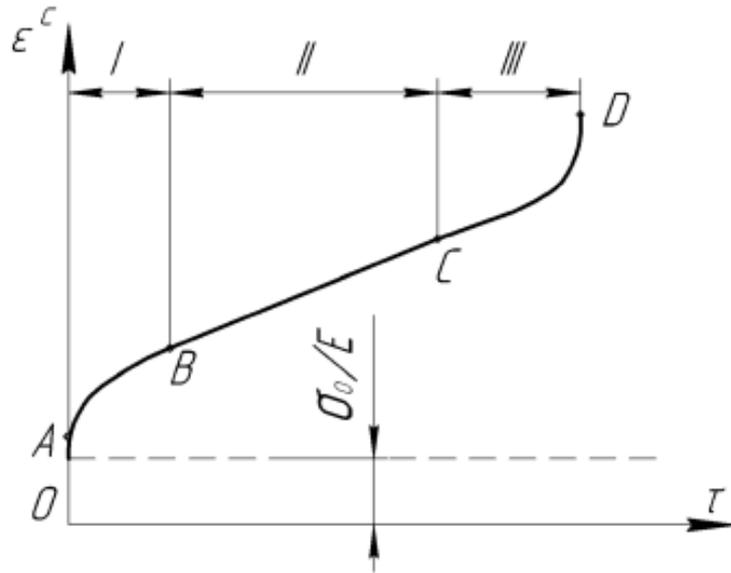


Рис. 3.27. Кривая ползучести:
I-II-III – стадии

Минимальная скорость ползучести ξ_{\min}^c зависит от напряжения σ и температуры T :

$$\xi_{\min}^c = Q(\sigma)\theta(T). \quad (3.55)$$

Существуют различные представления функции $Q(\sigma)$. Чаще других используется выражение [312]:

$$Q(\sigma) = k\sigma^n, \quad (3.56)$$

где k и n – коэффициенты, зависящие от температуры и определяемые экспериментально [312].

Для жаропрочных сталей n колеблется в пределах 3–6. Диапазон изменения k значительно шире. Так, для стали ЭИ 69 (45X14H14B2M) k меняется от $2,0 \cdot 10^{10} (1/\text{МПа})^n/\text{ч}$ при 600°C до $1,24 \cdot 10^{-8} (1/\text{МПа})^n/\text{ч}$ при 700°C [180].

Деформация ползучести ε^c определяется по формуле

$$\varepsilon^c = Q\Omega'\theta, \quad (3.57)$$

где Q – функция напряжения; Ω' – функция времени; θ – функция температуры.

Деформации ползучести являются, как правило, необратимыми. Поэтому при расчетах на ползучесть для не одноосного напряженно-деформированного состояния используется ряд приведенных выше гипотез теории пластичности. Практические расчеты проводят с помощью, так называемых технических (простейших) теорий ползучести. Последние предполагают наличие соотношений (уравнений), описывающих процесс деформирования материала во времени, в том числе при переменных режимах

работы. Технические теории формулируются для одноосного напряженного состояния с последующим обобщением применительно к неоднородному напряженно-деформированному состоянию [3].

Для повышения прочностных характеристик при высоких температурах стали легируют никелем.

Анализ напряженно-деформированного состояния коренной опоры блока цилиндров методом конечных элементов, используя твердотельное моделирование с автоматическим построением конечно-элементной сетки, показан на рис. 3.28.

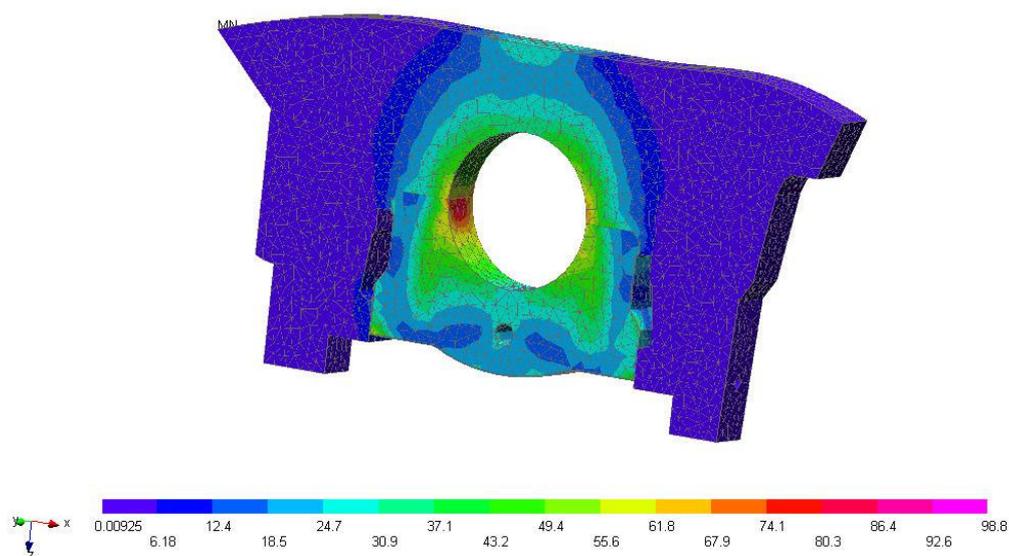


Рис. 3.28. Распределение напряжений σ_z (МПа) в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740

Из рис. 3.28 видно, что поля напряжений в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740 отличаются значительной неравномерностью распределения, наибольшие напряжения находятся в нижней части бугеля по направлениям действия равнодействующих газовых сил и составляют 55-60 МПа, в верхней части опоры напряжения от действия инерционных сил составляют 37-45 МПа [39].

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ ПО ИХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

4.1 Обоснование нормативов ресурса и предельного технического состояния элементов двигателя

Выполненные исследования в соответствии с методикой, изложенной в главе 2 по проведению моторных испытаний ресурсопределяющих деталей (шатуна, коленчатого вала, блока цилиндров, турбокомпрессора) силового агрегата позволили определить параметры изменения их технического состояния от наработки. Результаты исследуемых параметров по шатуну приведены на рис.4.1 [26].

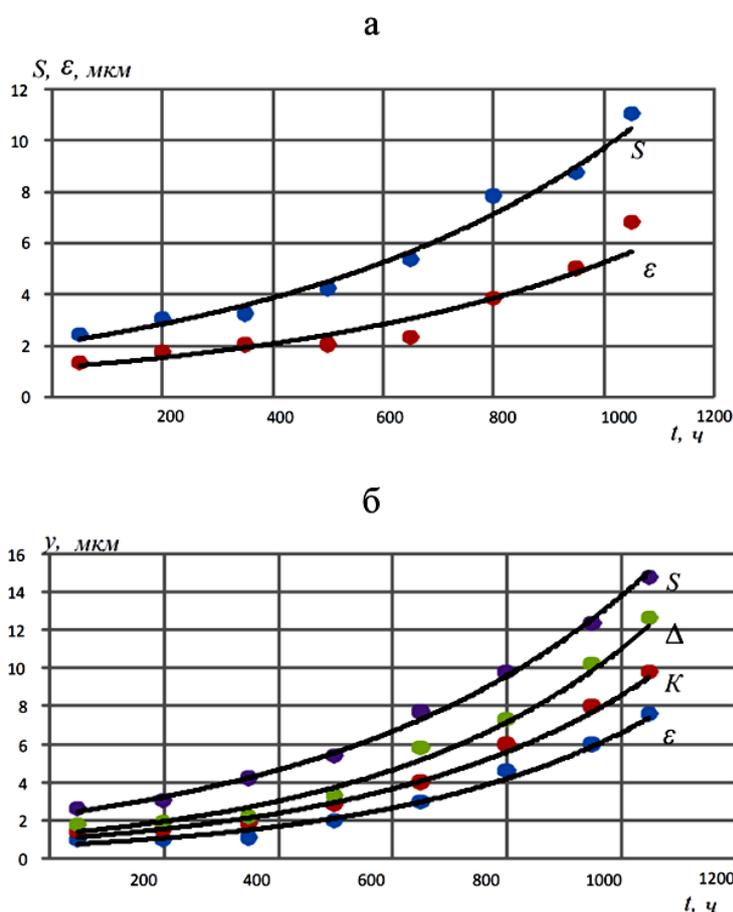


Рис. 4.1. Изменение показателей технического состояния шатуна в процессе стендовых моторных испытаний двигателей КамАЗ-740

а- диаметральный износ втулки верхней головки, S; овальность втулки верхней головки, ε; б- диаметральный износ нижней головки, S; остаточный прогиб вкладышей, Δ; корсетность нижней головки, K; овальность нижней головки, ε.

Математическая обработка этих результатов сведена в табл. 5.1 [26].

Анализ проведенных испытаний (рис. 5.1) говорит о росте корсетности пропорционально прогибу вкладышей. Параметр достоверности r^2 показывает, что экспериментальные данные с высокой теснотой связи соответствуют аналитически обоснованным экспоненциальным зависимостям (3.7), (3.13), (3,14), (3.16).

Т а б л и ц а 5.1

Параметры экспоненциальной зависимости показателей технического состояния шатуна от наработки

Показатели	Параметры		
	S_0 , мкм	b , 1/тыс.ч	r^2
Диаметральный износ втулки верхней головки, мкм	2,078	1,539	0,981
Овальность втулки верхней головки, мкм	1,111	1,544	0,926
Диаметральный износ нижней головки, мкм	2,246	1,810	0,915
Остаточный прогиб вкладышей, мкм	1,299	2,136	0,968
Корсетность нижней головки, мкм	1,033	2,117	0,978
Овальность нижней головки, мкм	0,678	2,272	0,960

Данные зависимости необходимы при обосновании ресурсов элементов силового агрегата, по которым формируется структура эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателя [5].

Структура (ЭРЦ) двигателя КамАЗ-740, при которой ПР проводят при пробеге автомобиля 120 тыс. км, а КР при пробеге автомобиля 200 тыс. км, применительно к III категории условий эксплуатации, была обоснована в работах [12-14]. При проведении предупредительного ремонта производят замену вкладышей, меняют (по визуальным дефектам – задирам, прижогам) 6% шатунов, восстанавливают – 10% [12]. При капитальном ремонте предусмотрены дефектовка шатунов и практически полное их восстановление. Исследование размеров и формы рабочих поверхностей шатунов показывает, что предельное их состояние наступает при наработке 200 тыс.км (табл. 5.2) [26].

Результаты исследований (табл. 5.2) необходимо учитывать при проведении КР двигателей семейства КамАЗ, особенно при наработке двигателя более 120 тыс. км, где уже наблюдаются изменения формы рабочих поверхностей элементов.

Собранные результаты изменения геометрических параметров (размеров и формы) рабочих поверхностей шеек коленчатых валов и вкладышей силовых агрегатов КамАЗ-Евро дали возможность определить изменения их технического состояния при наработке.

Т а б л и ц а 5.2

Предельные значения показателей технического состояния шатуна, мкм	
Показатели технического состояния шатуна	Предельное значение
Диаметральный износ (отклонение) втулки верхней головки	45
Овальность втулки верхней головки	25
Диаметральный износ (отклонение) верхней головки	25
Овальность верхней головки	12
Диаметральный износ (отклонение) нижней головки	100
Овальность нижней головки	60
Корсетность нижней головки	60

Кривые изменения размеров и формы деталей подшипников коленчатого вала частично приведены на рис. 4.2-4.5, а параметры зависимостей показателей технического состояния ПКВ – в табл. 4.3 [26].

В процессе эксплуатации, при изнашивании ресурсопределяющих элементов двигателя, происходит падение давления в системе смазки табл.5.3. С целью прогнозирования остаточного ресурса двигателя рекомендуется учитывать результаты исследуемых параметров при наработке более 50 тыс. км, так как до этого давление в системе смазки не меняется [23].

Параметр детерминации R^2 (табл.4.3), говорит о хорошей сходимости экспериментальных данных с аналитическими зависимостями. Полученные значения критерия Фишера выше табличных, исходя из этого (с доверительной вероятностью 0,95) можно говорить, что изменение исследуемых показателей (износа шеек коленчатого вала и вкладышей) при наработке значимо, а не обусловлены случайными факторами.

Анализ кривых по модификациям двигателей показывает, что интенсивность изменения показателей технического состояния подшипников коленчатых валов в процессе наработки по силовым агрегатам КамАЗ-Евро в среднем в 1,5 раза ниже, чем у КамАЗ-740. Это обуславливает необходимость повышения ресурса подшипников коленчатых валов двигателей КамАЗ-Евро и совершенствование структуры ЭРЦ двигателей [27, 14].

Параметры зависимости показателей технического состояния
подшипников коленчатого вала двигателей КамАЗ-Евро от наработки

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ коренных шеек, мкм	14,98	0,0039	0,954	2,96
Износ шатунных шеек, мкм	9,73	0,0042	0,833	3,41
Износ коренных вкладышей, мкм	24,95	0,0046	0,975	3,92
Износ шатунных вкладышей, мкм	13,40	0,0048	0,986	3,25
Овальность коренных шеек, мкм	5,62	0,0050	0,976	5,11
Овальность шатунных шеек, мкм	4,44	0,0048	0,967	3,27
Зазор в коренных подшипниках, мкм	109,03	0,0025	0,983	3,01
Зазор в шатунных подшипниках, мкм	95,77	0,0025	0,983	2,64
Прогиб шатунных вкладышей, мкм	7,93	0,0069	0,967	4,78
Корсетность нижней головки шатуна, мкм	14,52	0,0062	0,970	3,83
Давление в системе смазки, МПа:				
при 2200 мин ⁻¹ (во всём диапазоне пробега)	0,545	0,0020	0,951	2,18
(при пробеге более 50 тыс.км)	0,547	0,0022	0,976	2,97
при 600 мин ⁻¹	0,256	0,0019	0,861	3,61

R^2 – коэффициент детерминации (параметр достоверности); F_p – расчётное значение критерия Фишера; критическое (табличное) значение критерия Фишера F_p при доверительной вероятности 0,95 и объёме выборки $n = 48$ составляет 2,03, а при $n = 64$ – 1,97.

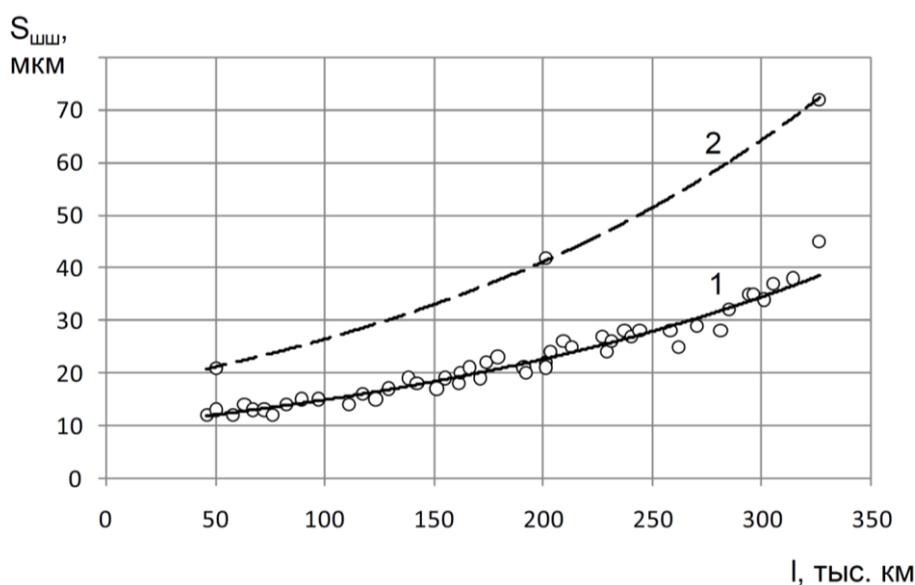


Рис. 4.2. Зависимость износа шатунных вкладышей двигателя КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

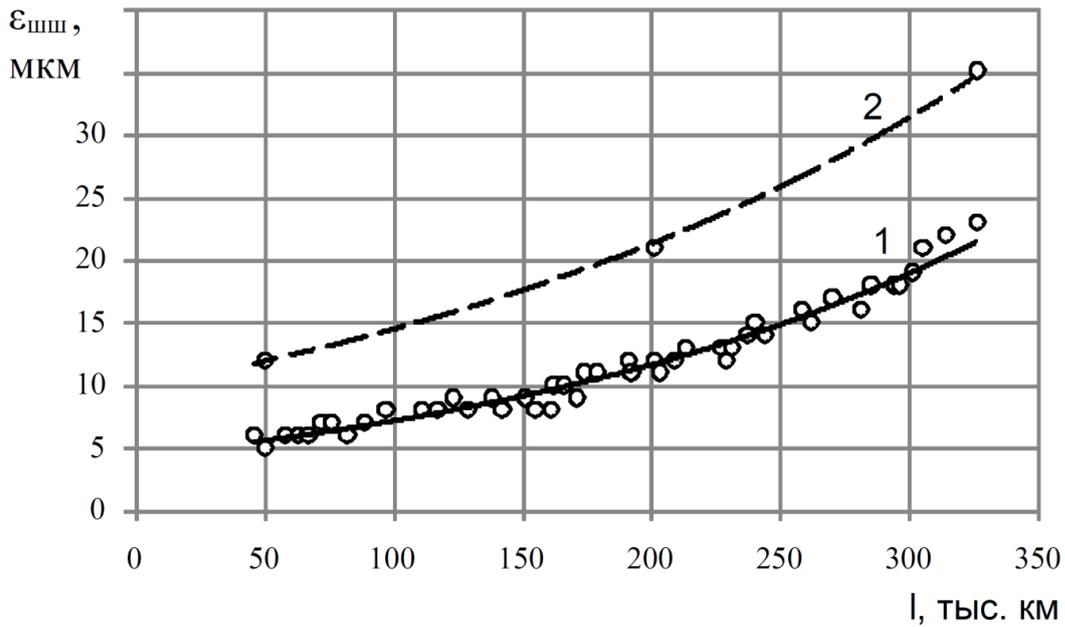


Рис. 4.3. Зависимость овальности шатунных шеек двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

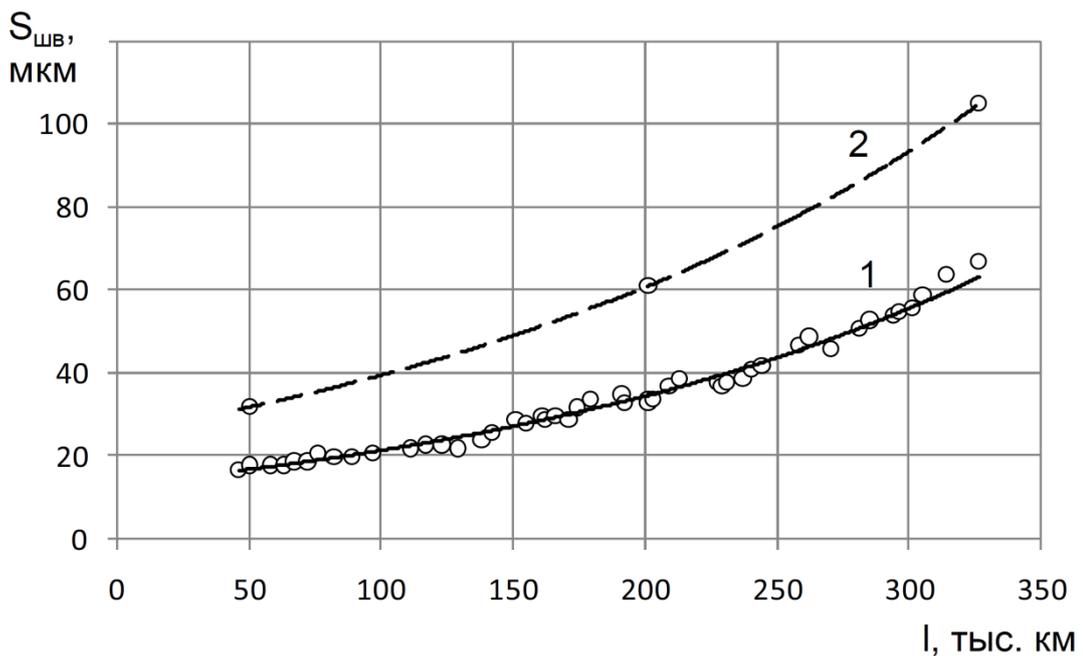


Рис. 4.4. Зависимость износа шатунных вкладышей двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

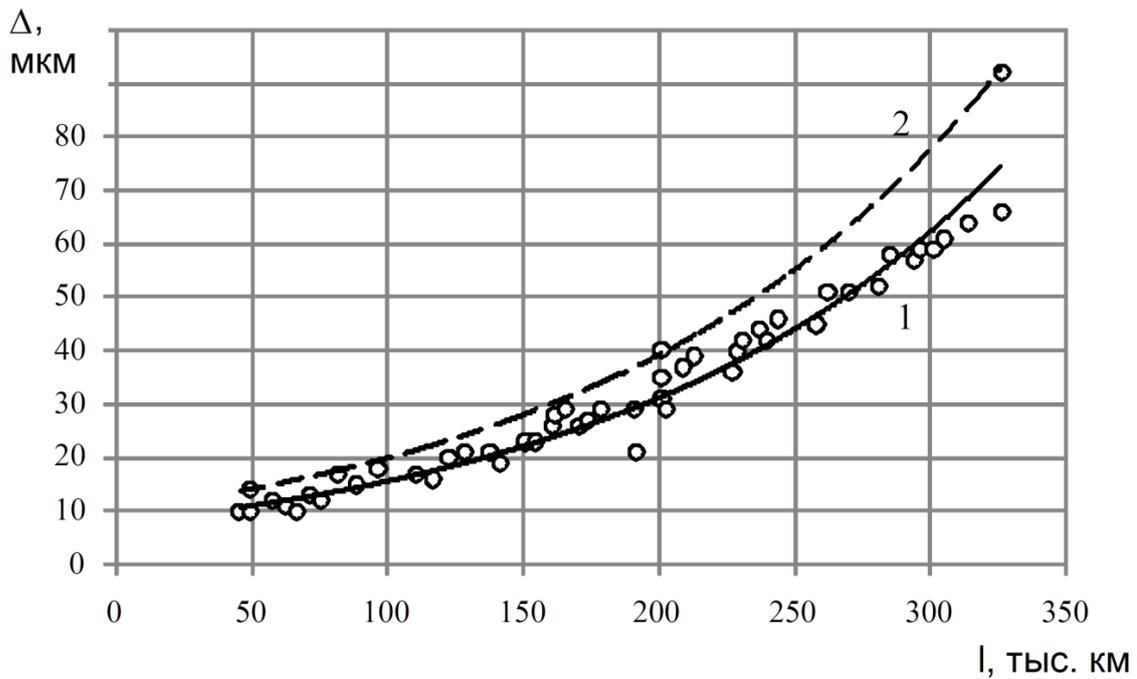


Рис. 4.5. Зависимость остаточного прогиба Δ шатунного вкладыша двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

Аналогично и по опорам блока цилиндров (рис. 4.6), параметры зависимости показателей технического состояния опор блоков цилиндров КамАЗ от наработки приведены в табл. 5.4. Из графика видно, что предельный износ более 0,02 мм наступает при наработке 150 тыс. км пробега. Из этого следует, что после 150 тыс. км пробега необходимо контролировать износ опор блока цилиндров (постели коленчатого вала), для того чтобы избежать проворачивания коренных вкладышей коленчатого вала.

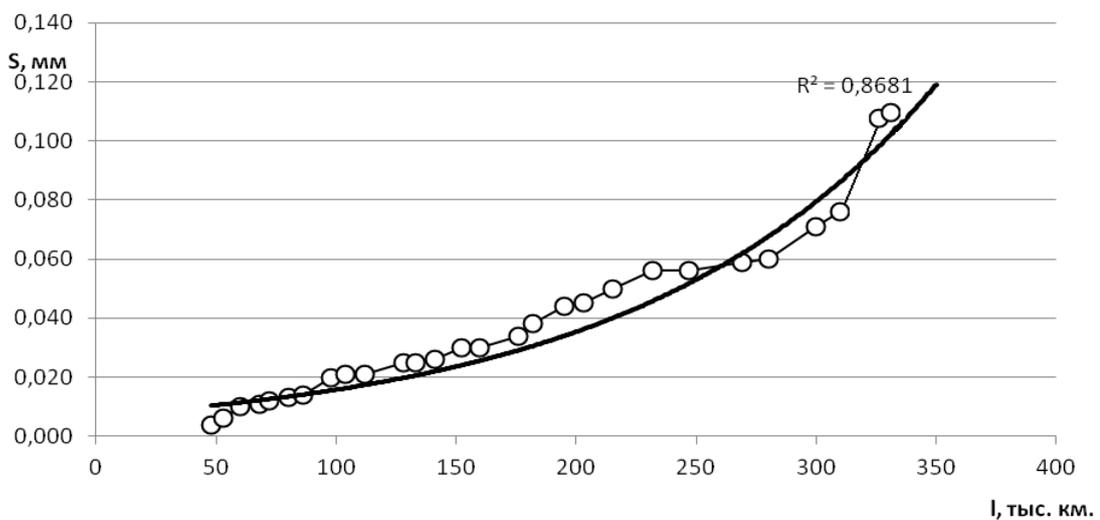


Рис. 4.6. Зависимость износа опор блока цилиндров силовых агрегатов КамАЗ от наработки

Т а б л и ц а . 5.4

Параметры зависимости показателей технического состояния опор блоков цилиндров КамАЗ от наработки

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ опор блока цилиндров, мкм	8,35	0,0058	0,868	10,24

Собранные результаты экспериментальных исследований по времени вращения ротора турбокомпрессора (выбегу), после остановки двигателя и износу элементов подшипникового узла ТКР-7С (силовых агрегатов КамАЗ-Евро – 64 шт.) определили характер изменения их технического состояния от пробега автомобиля [16].

Результаты замеров износов ротора показаны на рис. 4.7 а изменения времени выбега на рис. 5.8, параметры зависимостей даны в табл. 4.5.

Дисперсионный анализ проводили по критерию Фишера [16].

Т а б л и ц а 5.5

Параметры зависимости износа и выбега вала ротора турбокомпрессора ТКР–7С от наработки двигателя КамАЗ-Евро

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ вала ротора, мкм	8,959	0,0222	0,965	4,65
Выбег вала ротора, с	37,85	0,282	0,921	2,92

R^2 – коэффициент детерминации (параметр достоверности); F_p – расчётное значение критерия Фишера; критическое (табличное) значение критерия Фишера F_p при доверительной вероятности 0,95.

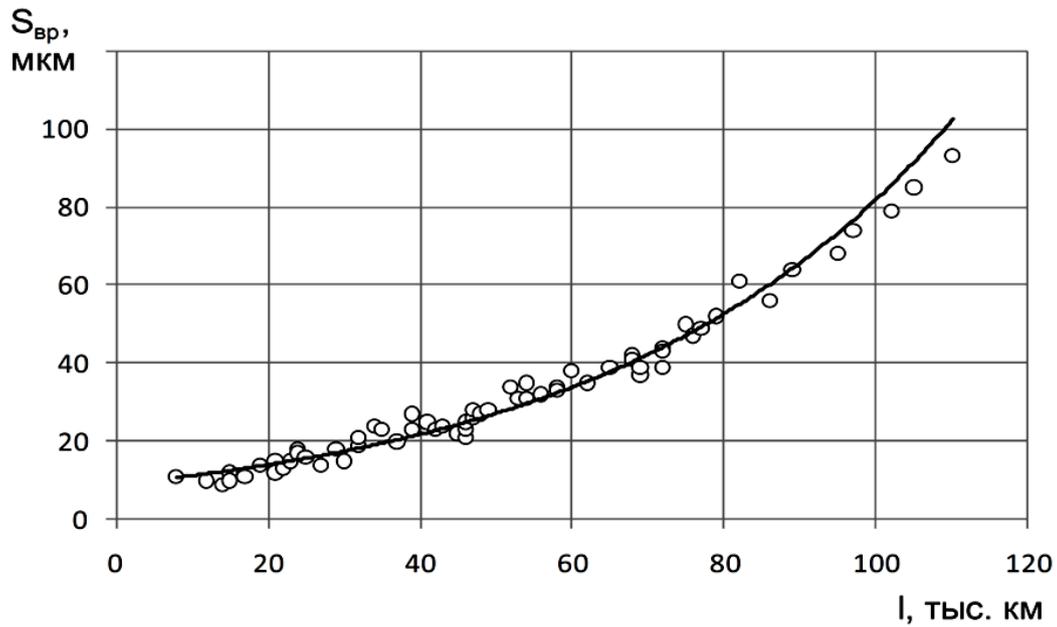


Рис. 4.6. Зависимость износа вала ротора турбокомпрессора ТКР-7е от наработки двигателя КамАЗ-Евро

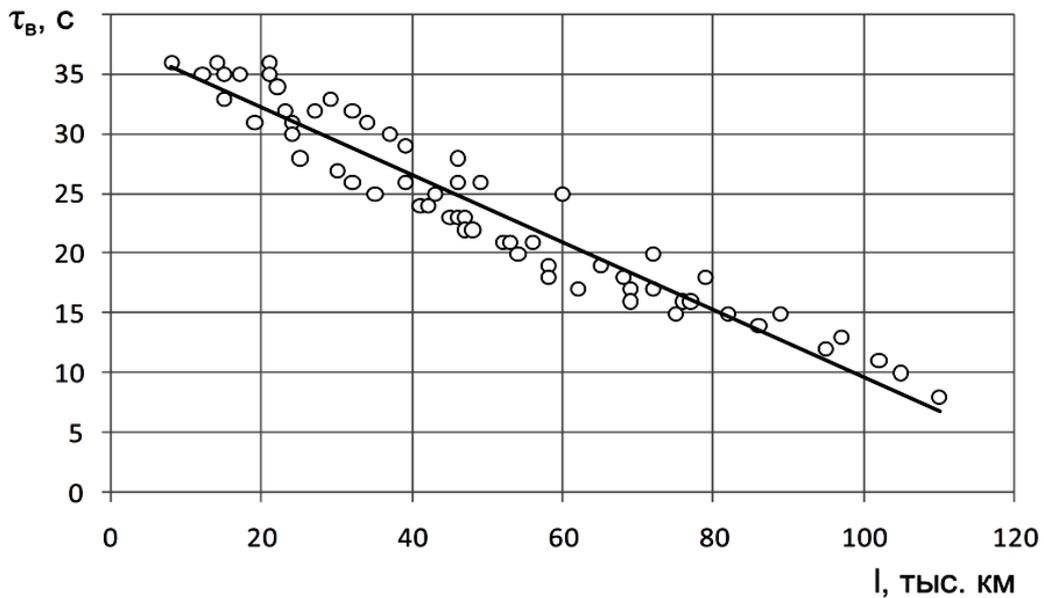


Рис. 4.7. Зависимость износа выбега вала ротора турбокомпрессора ТКР-7е от наработки двигателя КамАЗ-Евро

Результаты экспериментальных исследований имеют хорошую сходимость с аналитическими зависимостями (3.90), (3.92). Изменение параметров состояния турбокомпрессоров (табл. 4.5) от их наработки значимо, а не обусловлено случайными факторами [16, 15].

4. 3 Технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием

4.3.1 Совершенствование технологии восстановления шатунов двигателей КамАЗ

Условия работы шатуна, действующие на него нагрузки, изменения его технического состояния определяют метод его восстановления. Этапы технологического процесса восстановления шатуна представлены на рис. 4.6 [25, 26].

Выбор маршрута технологического процесса восстановления определяется дефектовочной операцией, которая проводится в соответствии с картой дефектации шатуна и ремонтным чертежом (рис. 4.7) [26].

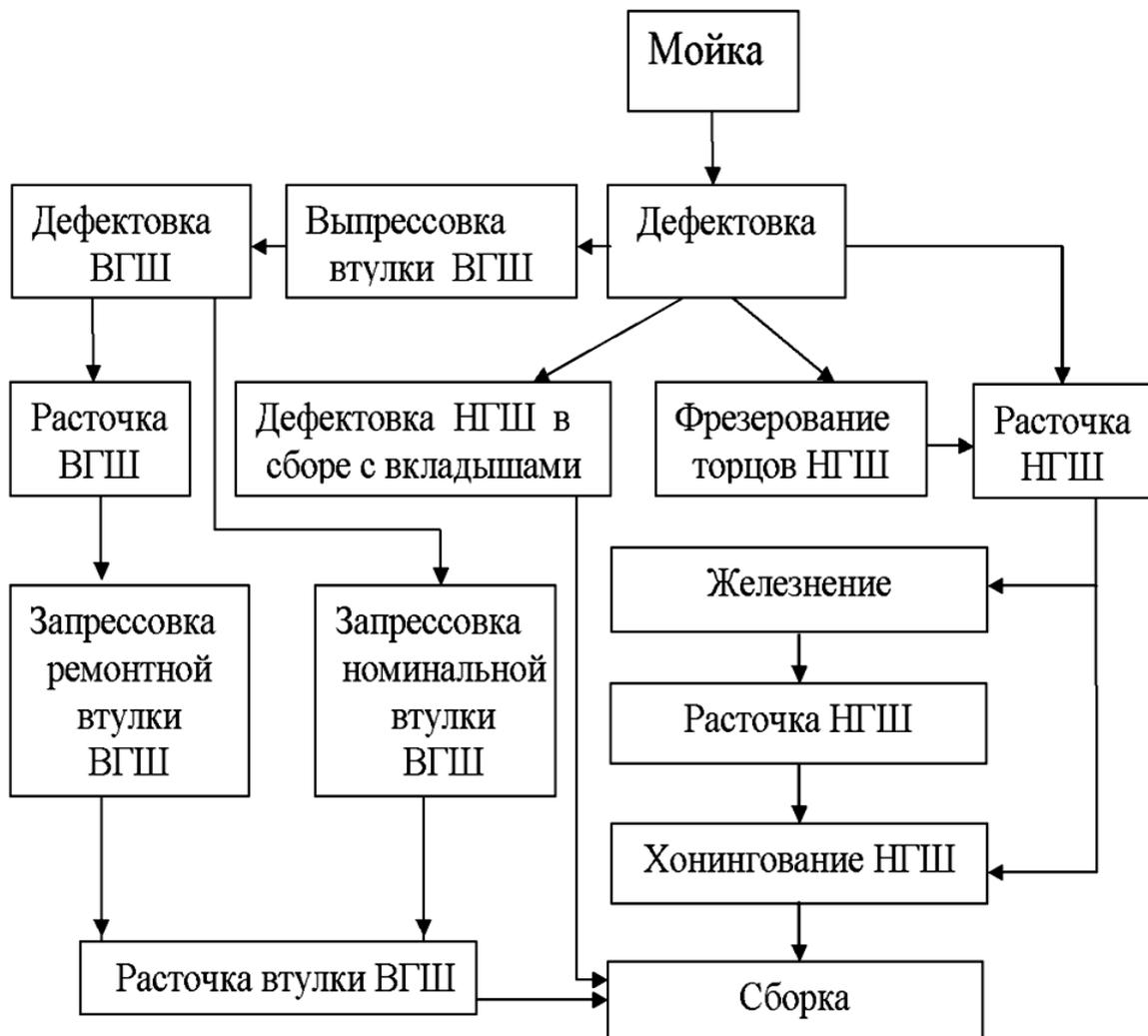


Рис. 4.8. Схема технологического процесса восстановления шатуна.

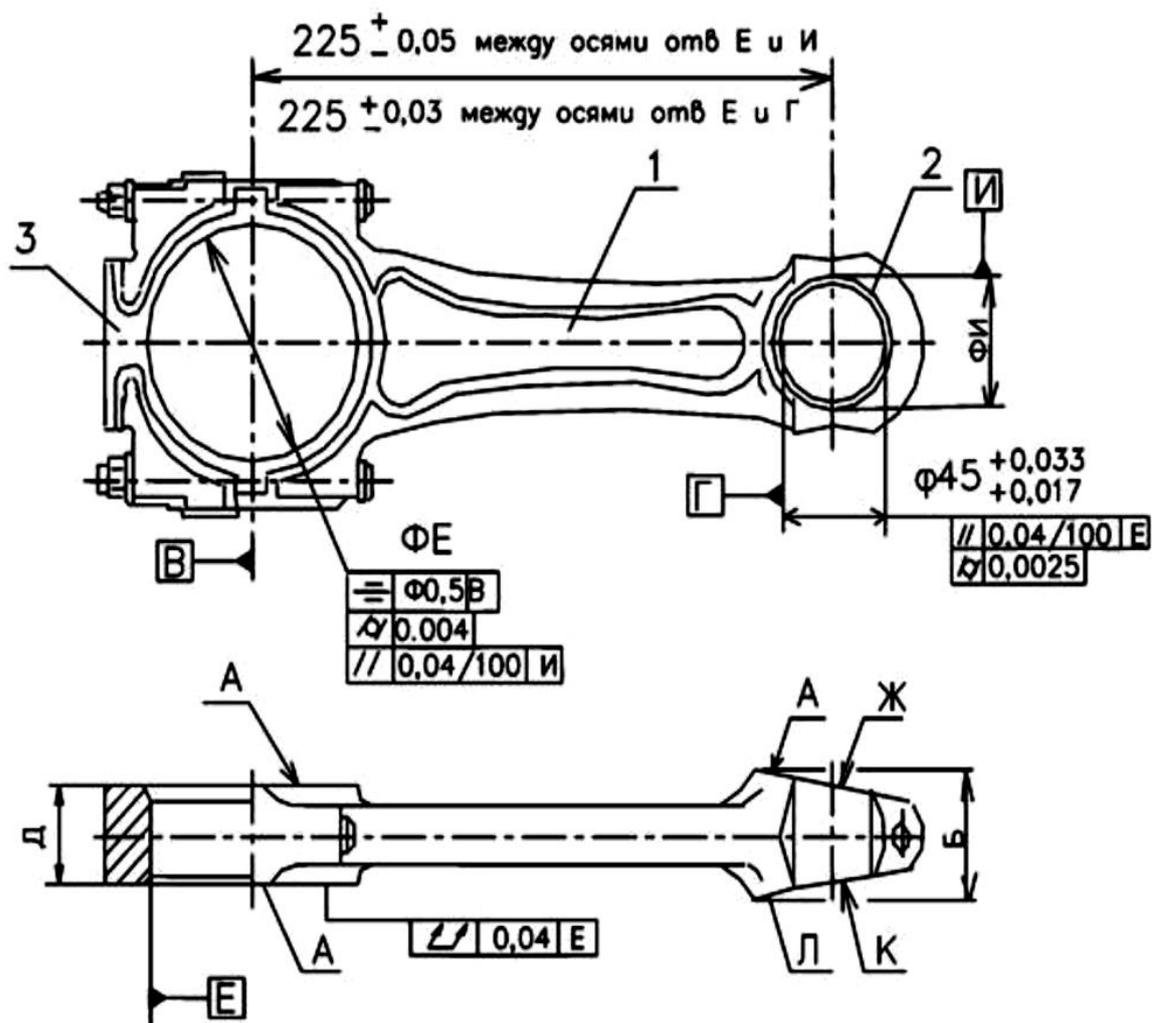


Рис. 4.9. Ремонтный чертеж шатуна в сборе: 1-корпус; 2-втулка; 3-крышка шатуна.

Из схемы технологического процесса восстановления шатуна (рис. 4.8) следуют три варианта (маршрута) восстановления верхней головки шатуна (ВГШ) и три варианта восстановления нижней головки шатуна (НГШ). Рассмотрим их подробнее [26].

Верхняя головка шатуна:

1. Втулки ВГШ в допуске (табл. 5.6): дефектовка НГШ и далее по схеме (рис. 5.18).

2. Втулка ВГШ вне допуска (табл. 5.6): выпрессовки втулки; дефектовка ВГШ; если отклонения поверхности И (рис. 5.19) менее 0,02 мм, то запрессовка втулки номинального размера и далее по схеме (рис. 5.18).

3. Втулка ВГШ вне допуска (табл. 5.6): выпрессовки втулки; дефектовка ВГШ; если отклонения поверхности И (рис. 4.9) более 0,02 мм,

то расточка ВГШ до ремонтного размера и запрессовка втулки ремонтного размера и далее по схеме (рис. 4.9).

Нижняя головка шатуна:

1. НГШ в допуске (табл.5.6): дефектовка НГШ в сборе с вкладышами и далее по схеме (рис. 5.18).

2. НГШ имеет отклонения поверхности Е (рис. 4.9.) в пределах 0,02-0,04 мм: фрезерование торцов НГШ и далее по схеме (рис. 5.18).

3. НГШ имеет отклонения поверхности Е (рис. 4.9) более 0,4 мм: расточка НГШ, железнение и далее по схеме (рис. 4.8).

Ремонт шатуна начинают с проверки изгиба и скручивания на контрольном приспособлении с индикаторной головкой часового типа (патент №68755). При непараллельности осей отверстий верхней и нижней головок шатуна свыше 0,06 на длине 100 мм при отклонении этих же осей свыше 0,12 на длине 100 мм – шатун правят.

В случае ослабления посадки втулки верхней головки шатуна по отверстию И заменяют втулку. Изношенную втулку выпрессовывают, новую втулку из бронзы БрОС-10-10 охлаждают в жидком азоте и запрессовывают так, чтобы не допустить ее выступание за поверхности Ж и К. При износе более 49,02 мм отверстие верхней головки шатуна растачивают до $\varnothing 49,5$ Н6 и запрессовывают ремонтную втулку $\varnothing 49,5$ р6, как указано выше. Другой способ: восстанавливают поверхность И железнением, затем растачивают до номинального размера.

При износе отверстия втулки верхней головки шатуна Г более допустимого размера $\varnothing 45,04$ мм втулки заменяют новыми. Отверстия новых втулок растачивают до номинального размера $\varnothing 44,98^{+0,02}$ мм и затем хонингуют, используя синтетические алмазные хонинговальные бруски 45x3x3x22 марки А М40/28М73 СТ СЭВ 204-75. Обработку выполняют до номинального размера $\varnothing 45^{+0,033}_{+0,017}$, выдерживая указанное на рис. 5.19 расстояние между осями верхней и нижней головок шатуна. Из-за проворачивания шатунных вкладышей и наличия только одного ремонтного размера 0,5 мм для снижения коэффициента сменности разработана и внедрена технология углубленного ремонта шатуна, которая введена в КД и в применение.

В случае деформации или износа отверстия нижней головки шатуна более допустимого размера Е поверхность восстанавливают железнением. После железнения шлифуют отверстия на внутришлифовальном станке, используя шлифовальный круг ПВ 70x60x20 марки 24А32ПМ36К5А (ГОСТ2424-83). Обрабатывают отверстия размером $\varnothing 85^{+0,016}_{-0,005}$ мм, а затем хонингуют до $\varnothing 85^{+0,022}$ мм брусками из синтетических алмазов марок АМ28М1 и АМ40М1 на вертикально-хонинговальном станке, используя в качестве СОЖ смесь из 70% керосина и 30 % веретенного масла. После хонингования шатуны последовательно промывают в керосине и горячей воде, продувают сжатым воздухом (сушат).

Другой способ восстановления шатуна по отверстию нижней головки – расточка на категорийный размер $\text{Ø}85,5^{+0.016}_{-0.005}$ с установкой вкладышей ремонтного размера.

Третий способ – фрезерование плоскости разъема шатуна и крышки на 0,25 мм. Обработку выполняют в приспособлении с гидрозажимом (рис. 4.10).

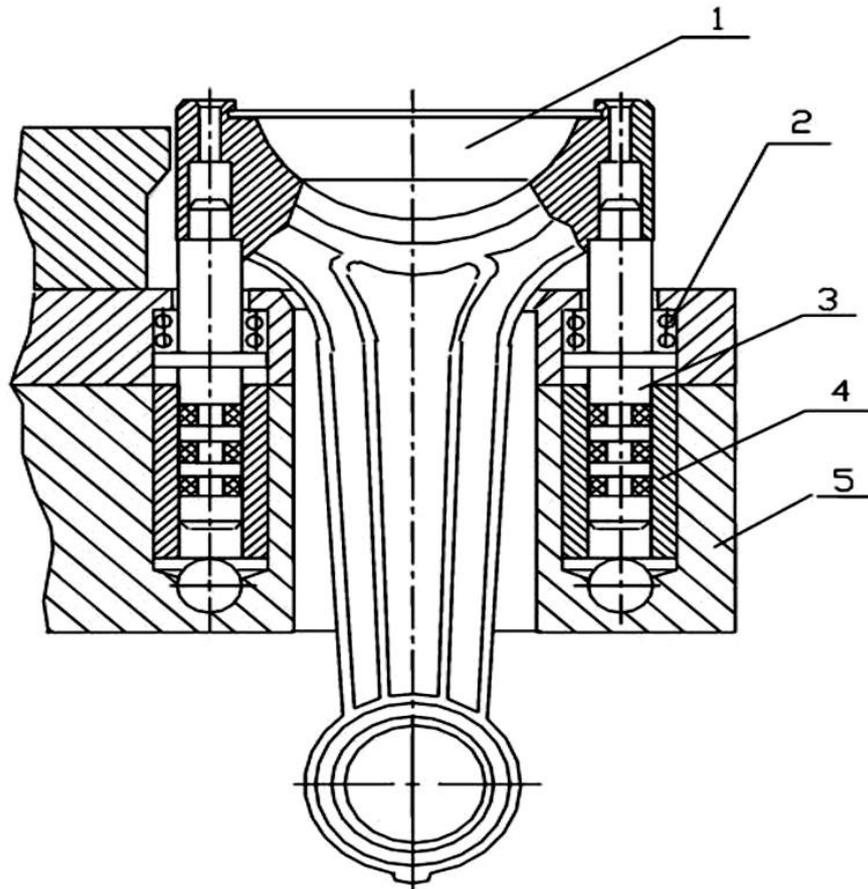


Рис. 4.10. Приспособление с гидрозажимом для фрезерования плоскостей разъема 1-сектор; 2-пружина; 3-плунжир; 4 втулка; 5- корпус.

После обработки шатун собирают, растачивают и хонингуют отверстие нижней головки шатуна до номинального размера. Недостаток этой технологии – изменение межосевого расстояния между отверстиями Е и И. Кроме того, на участках поверхности отверстия нижней головки, прилегающих к плоскости разъема, при расточке остаются черновины.

Технологический процесс электролитического железнения позволяет формировать покрытия на восстанавливаемых поверхностях деталей высокой твердости и износостойкости. Наиболее приемлемыми являются два варианта технологического процесса твердого железнения (рис. 5.21) [26].

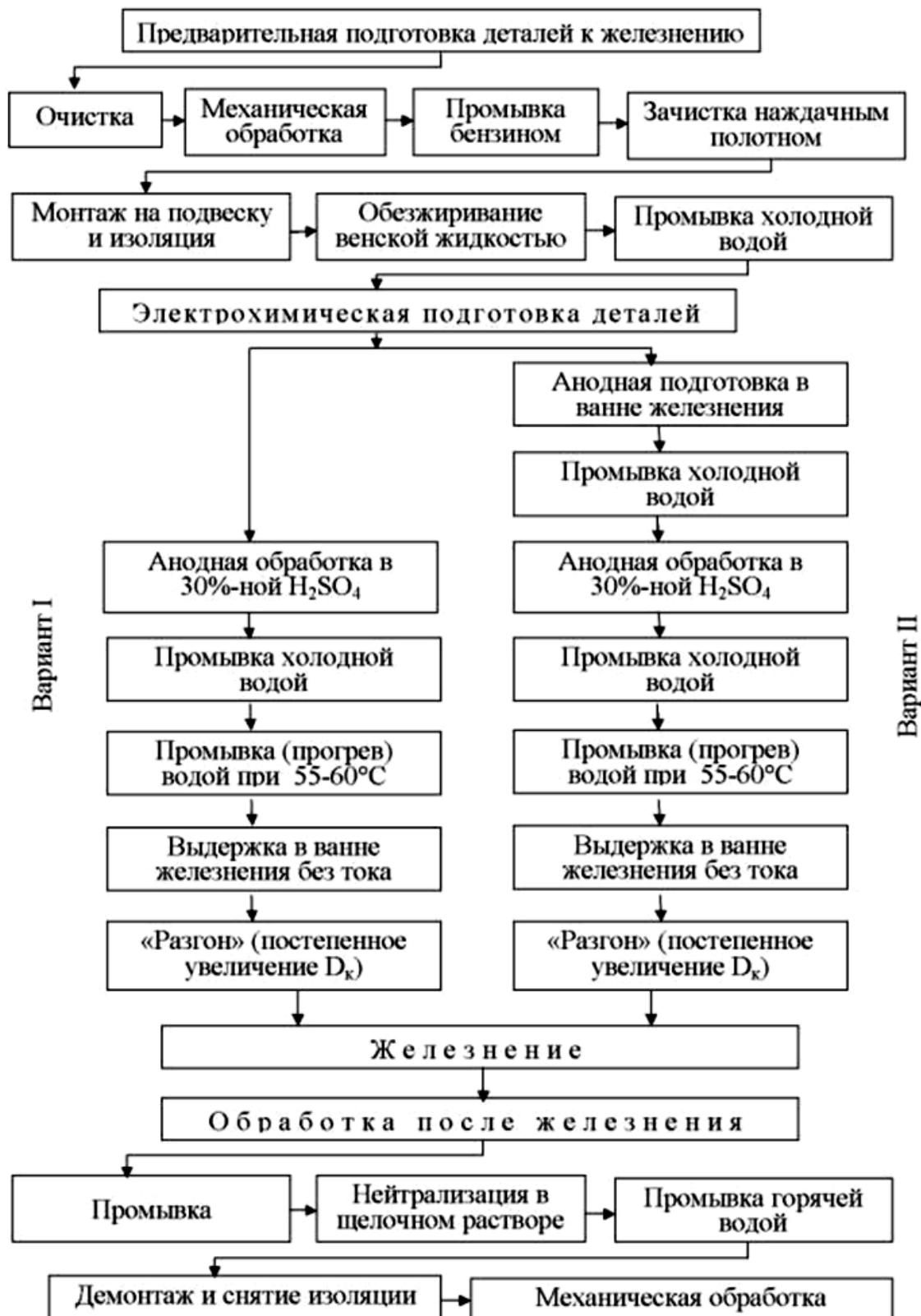


Рис. 4.11. Схема технологического процесса железнения.

Вариант 1. Предварительная подготовка; очистка от грязи и масла, механическая обработка наращиваемых поверхностей, промывка

бензином, изоляция участков, не подлежащих наращиванию, монтаж деталей в подвесные приспособления, обезжиривание венской известью, промывка холодной проточной водой.

Электрохимическая подготовка; анодная обработка в 30%-м растворе серной кислоты, промывка холодной водой, промывка (прогрев) горячей водой при 55-60°C, выдержка деталей в ванне железнения без тока, постепенное повышение плотности тока.

Железнение и окончательная обработка; железнение, промывка горячей водой, нейтрализация в щелочном растворе, промывка горячей водой, демонтаж деталей с подвесных приспособлений и снятие изоляции, окончательная механическая обработка.

Вариант 2. Вторая схема отличается от первой характером и порядком операций электрохимической подготовки деталей перед железнением, которая включает следующие операции: травление деталей в 10%-м растворе HCl, промывка холодной водой; анодная обработка в 30%-м растворе H₂SO₄; промывка (прогрев) водой при 55-60°C; выдержка деталей в ванне железнения без тока; постепенное повышение плотности тока.

Основным показателем качества наносимого покрытия, определяющим работоспособность восстановленной детали, является прочность сцепления покрытия с основой. Чтобы обеспечить хорошую адгезию, необходимо при подготовке деталей к железнению выполнить следующие требования: удалить с покрываемых поверхностей все загрязнения; снять поверхностный дефектный слой металла деталей; сохранить подготовленные поверхности в активном состоянии до начала осаждения на них металла.

Первое требование выполняется в стадии предварительной подготовки, когда с деталей удаляются следы износа и все загрязнения: ржавчина, масляная и окисная пленки и т.д.

Процесс железнения в горячих растворах хлористого железа характеризуется рядом особенностей: высокой химической активностью кислого горячего раствора хлористого железа; высокой температурой электролита; сильным испарением электролита; загрязнением электролита продуктами его окисления и анодным шламом; непрерывным уменьшением кислотности электролита; выделением вредных для здоровья обслуживающего персонала и для металлических частей оборудования участка испарений.

Этими особенностями процесса и вызваны особые требования к конструкции элементов установки. Стенки ванны должны обладать хорошей химической стойкостью при температурах до 70-90° С. Ванна должна иметь: нагревательное и вентиляционное устройства; устройство для поддержания уровня и кислотности электролита; непрерывное или периодически действующее фильтровальное устройство; систему штанг для завешивания деталей и анодов в ванне. Таким образом, установка для железнения должна содержать следующие конструктивные элементы: ванну железнения, устройство для подвешивания анодов и деталей,

устройство для нагрева электролита, устройство для фильтрации электролита, бак-отстойник, вентиляционное устройство для отвода испарений с зеркала ванны, распределительный щит и аппаратуру для автоматического регулирования режима работы установки.

Подвешивание деталей в ваннах при химической и электрохимической обработке производится с помощью специальных подвесных приспособлений. Хорошая конструкция приспособлений, применяемых для подвешивания деталей в ванну, является важнейшей предпосылкой для достижения высокой производительности процесса и качества электролитического покрытия [44, 45].

Подвесные приспособления при осуществлении технологического процесса на участке железнения должны обеспечивать: надежный контакт детали с токоподводящими штангами ванны и удобство при переносе деталей. Детали на подвеске должны быть расположены так, чтобы было обеспечено беспрепятственное удаление пузырьков водорода, выделяющегося при электролизе [50]. Для этой цели покрываемые поверхности должны располагаться вертикально или наклонно, так как при горизонтальной завеске пузырьки водорода могут скапливаться на нижней стороне поверхности и стать причиной появления пористых участков.

Завешиваемые в ванну детали не должны экранировать друг друга, так как при этом увеличивается неравномерность покрытия.

По количеству деталей, одновременно монтируемых в приспособлениях, различают одноместные и групповые (многоместные) приспособления.

Одноместные приспособления используются для подвески деталей, поступающих в ремонт небольшими партиями, а также деталей, имеющих большой вес.

Групповые приспособления используют для небольших по весу деталей при серийном поступлении их на участок [44]. Внедрение групповых подвесок на производстве обеспечивает значительное повышение производительности труда и даёт большой экономический эффект [45]. Как показала практика железнения различных деталей, при тщательном уходе за контактными поверхностями приспособлений детали, снятые после железнения с одной подвески, характеризуются хорошей однородностью по толщине и качеству покрытий [43, 44, 49].

На поверхностях подвесок, не изолированных от действия электрического тока, железо осаждается с образованием дендритов, что затрудняет получение расчетной толщины железа на покрываемых деталях и вызывает непроизводительные потери электроэнергии и снижение производительности процесса [24, 36, 40, 44,]. Для устранения указанного недостатка поверхности подвесок, погружаемых в электролит, защищают изоляционными материалами.

Для железнения шатунов практичнее использовать групповые (многочестные) приспособления. В СГТУ на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» сконструировано подвесное приспособление для подвешивания трех шатунов. Анод 3 выполнен в виде конуса для более равномерного осаждения металла, которому препятствуют выделяющиеся в процессе электролиза пузырьки газа водорода (рис. 5.22) [26].

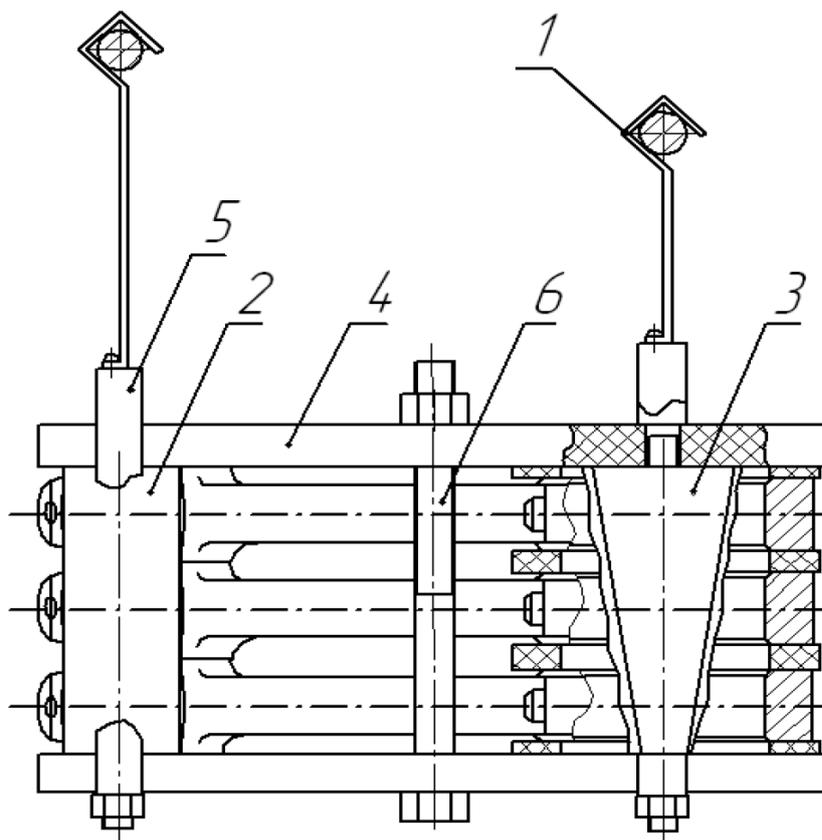


Рис.4.12. Подвесное приспособление для шатунов КамАЗ-740:
1 – крючок; 2 – катод; 3 – анод; 4 – изолирующие пластины; 5 – рамка; 6 – болт

Таким образом, предложенный технологический процесс восстановления шатуна обеспечивает стабильность формы шатунных вкладышей после ремонта [26].

4.3.2 Совершенствование технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием

Совместный разряд ионов металла и водорода, протекающий при электролизе металлопокрытий, как уже отмечалось ранее, приводит к изменениям структуры и свойств покрытий. Определенную роль в этом играет водород, адсорбирующийся в процессе электролиза на катоде [1, 15,

32, 32]. Неравномерность газонаполнения выделяющимся водородом и растворенным в электролите кислородом, в межэлектродном пространстве, влияет на равномерность распределения толщины наносимого покрытия по длине и диаметру детали и способствует рассеиванию физико-механических свойств покрытия, определяющих его работоспособность [56].

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования (разд. 4) показали, что значительную роль при формировании равномерных металлопокрытий играет процесс десорбции водорода с поверхности покрытий [13-16]. На их основе разработан принципиально новый способ формирования покрытия в контролируемой разреженной атмосфере над зеркалом гальванической ванны. Эксперименты, поставленные в этих условиях, подтвердили теоретические предпосылки о значительном сокращении количества поглощаемого водорода и, как следствие, – получение более равномерных и гладких покрытий с оптимальной величиной припуска на механическую обработку и однородностью физико-механических свойств [21, 24, 49, 50, 56].

4.3.3 Совершенствование технологии восстановления опор блока цилиндров

Проблема восстановления работоспособности базовых деталей, к которой и относится блок цилиндров двигателей внутреннего сгорания (рис. 4.13), актуальна как у легковых автомобилей, так и у грузовых автомобилей и автобусов, особенно зарубежного производства. Маршрут технологического процесса восстановления определяется дефектовочной операцией.

Данные по изменению технического состояния коренных опор блока цилиндров в процессе эксплуатации являются обоснованием основных этапов технологического процесса восстановления.

Существующие способы устранения дефектов опор блоков цилиндров:

- растачивание опор с последующим хонингованием под ремонтный размер;
- фрезерование торцов крышек опор, занижение оси опор на 0,02-0,03 мм и растачивание опор с последующим хонингованием;
- при износе опор более 0,3-0,5 мм необходимо наносить на изношенные поверхности металлопокрытие с последующей механической обработкой.

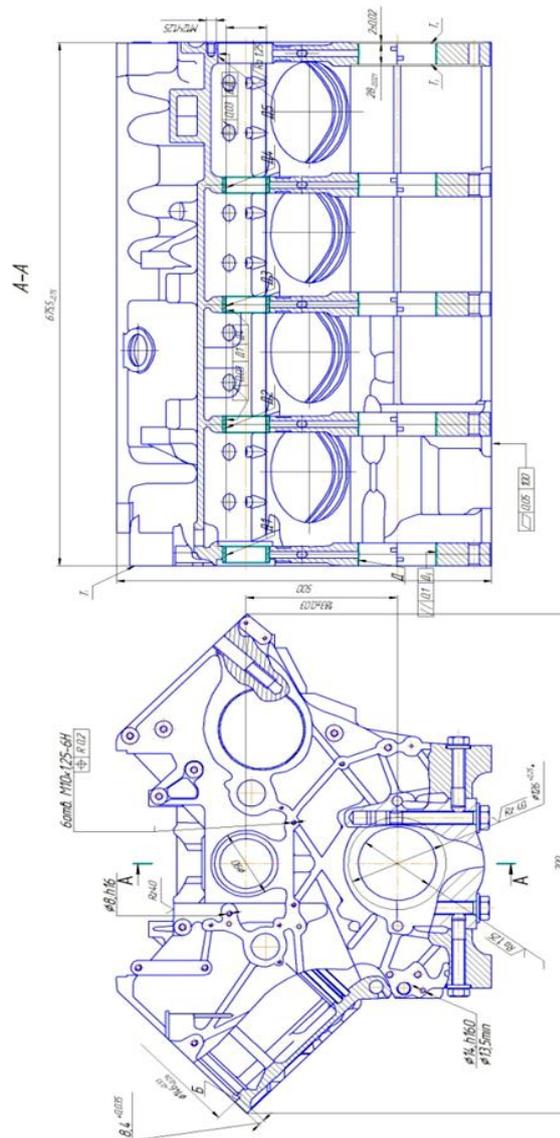


Рис. 4.13. Блок цилиндров двигателя КамАЗ-740

При восстановлении деталей машин электролитическим покрытием за основу взят технологический процесс железнения с двойной анодной обработкой деталей перед нанесением покрытия, имеющий широкие технологические возможности. В то же время, анализ предыдущих исследований позволяет сделать вывод, что существующий технологический процесс имеет структурное несовершенство. Оно проявляется в неравномерном распределении силовых полей по восстанавливаемой поверхности, что приводит к рассеиванию микротвердости покрытий, внутренних напряжений, толщины покрытия (припуска на механическую обработку), по длине восстанавливаемой поверхности и уменьшению технологической надежности по прочности сцепления наносимого покрытия с основой. С целью получения прочносцепляющихся электролитических покрытий железа с бестрещиноватой, однородной структурой, с равномерным распределением осадков по всей длине восстанавливаемой поверхности

деталей предложено проводить электролиз с созданием разрежения над зеркалом электролита (патент №2082835) [22, 40, 28].

Покрyтия электролитического железа, полученные в условиях разрежения над зеркалом электролита, позволяют обеспечить стабильность и надежность проектируемых показателей, в покрyтиях отсутствует слоистость, в них нет трещин, что свидетельствует о более монолитном покрyтии (рис. 4.28, 4.29).

Использование данного технического решения при восстановлении постелей блоков цилиндров позволило улучшить физико-механические свойства наносимого электролитического покрyтия и повысить долговечность двигателей.

Схема технологического процесса вневанного железнения опор блоков цилиндров двигателей КамАЗ представлена на рис. 4.14.

Для восстановления опор блоков цилиндров наращиванием на изношенные поверхности электролитического железного покрyтия разработана установка вневанного железнения (рис. 5.25) [5]. Внешний вид электролитической ячейки при осаждении электролитического железа на опоры блока цилиндров представлен на рис. 5.26.



Рис. 4.14. Схема технологического процесса вневанного железнения опор блока цилиндров двигателя КамАЗ

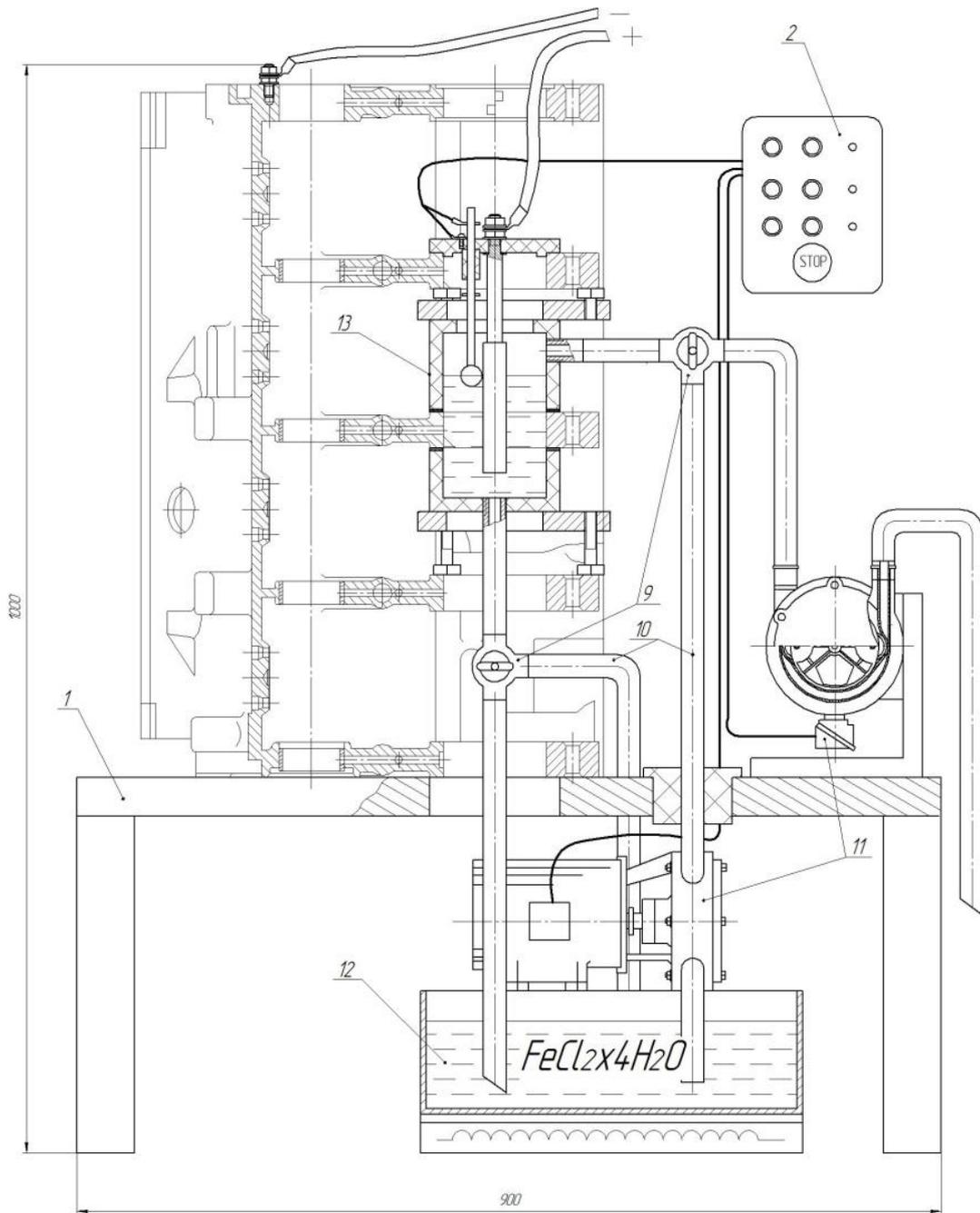


Рис. 4.15. Установка для вневанного железнения коренных опор блока цилиндров двигателя КамАЗ– 740:

- 1 – стол; 2 – блок управления; 3 –анодная крышка; 4 – датчик положения уровня электролита; 5 – анодная штанга; 6 – верхняя втулка; 7 – нижняя втулка; 8 – кольцо прижимное; 9 – трехходовой кран; 10 – трубопровод; 11 – перистальтический насос; 12 – ванна электролитическая с подогревом; 13 – электролитическая ячейка



Рис. 4.16. Внешний вид электролитической ячейки при осаждении электролитического железа на опоры блока цилиндров

Технологический процесс нанесения электролитических железных покрытий состоит из: предварительной подготовки, электрохимической обработки, электролитического нанесения покрытия и окончательной обработки. Предварительная подготовка восстанавливаемой опоры включает в себя: очистку поверхности от масла, ржавчины и других загрязнений, механическую обработку до удаления следов износа и дефектного поверхностного слоя, изоляцию отверстий маслоподводящих каналов с помощью резиновых пробок. Далее производят монтаж вневанного приспособления (электролитическую ячейку) на восстанавливаемой опоре, с помощью которой будет наноситься покрытие.

Устанавливают электролитическую ячейку 13 (рис. 4.16) с помощью двух металлических колец 8, с поджимными винтами. К корпусу обрабатываемого блока цилиндров двигателя подведен «-», к анодной штанге 5 «+».

Электрохимическая обработка включает в себя анодное травление в 10%-м растворе соляной кислоты (HCl) и анодную очистку в 30%-м растворе серной кислоты (H₂SO₄).

Процесс нанесения покрытия проводят в электролите, содержащем: 580-600 г/л хлористого железа; хлористый никель 15-25 г/л; 1,8-2 г/л соляной кислоты при следующих режимах: плотность тока – 15 А/дм² и температура электролита – 70-80 °С.

Внешний вид покрытия электролитического железа, осажденного на опоры блока цилиндров, представлен на рис. 4.17.



Рис. 4.17. Внешний вид покрытия электролитического железа, осажденного на опоры блока цилиндров

После нанесения покрытия необходимо провести ряд окончательных операций:

- промывка;
- нейтрализация в щелочном растворе;
- промывка горячей водой;
- демонтаж вневанного приспособления;
- механическая обработка восстанавливаемой коренной опоры.

Промывка коренной опоры блока происходит в горячей воде при температуре 60 °С. Нейтрализация проводится в 10%-ном растворе каустической соды. После демонтажа вневанного оборудования продукт коренную опору сжатым воздухом.

Последняя операция заключается в механической обработке восстанавливаемой коренной опоры двигателя, в номинальный размер.

Таким образом, контроль размеров и формы ресурсопределяющих поверхностей деталей и восстановление их по потребности, снизит затраты на обеспечение работоспособности силовых агрегатов автомобиля за счет предупреждения отказов и своевременного их устранения на основе прогнозирования технического состояния и закономерностей формирования свойств поверхностей ресурсопределяющих деталей при восстановлении.

4.4 Технология создания плакирующего медного покрытия на поверхностях трения

Техническое решение снижения трения в подшипниках скольжения на переходных режимах осуществляется осаждением электролитического медного покрытия на трущуюся поверхность тел вращения либо в стационарных ваннах электрохимического осаждения, либо, если деталь больших размеров и сложной формы, вневанными электролитическим осаждением меди – натиранием. Наличие пластичных поверхностных слоев способствует более равномерному распределению давления, снижению поверхностных температур, предотвращается пластическая деформация глубинных слоев металла, что устраняет схватывание, а также уменьшается износ вследствие передеформирования и контактной усталости рабочих поверхностей вкладышей. Медь заполняет микровпадины, уменьшая шероховатость трущихся поверхностей и, следовательно, приводит к снижению коэффициента трения в сопряжении.

Процесс нанесения медного покрытия на шейки коленчатого вала после восстановления представлен в табл. 5.10.

Т а б л и ц а 5.10

Технологический процесс нанесения электролитического медного покрытия на шейки коленчатого вала двигателя КамАЗ

Номер	Наименование операции	Цель технологической операции
1	Моечная	Тщательная очистка коленчатого вала
2	Слесарная	Установка коленчатого вала на опоры приспособления, присоединения к приводу вращения
3	Моечная	Обезжиривание покрываемых поверхностей
4	Слесарная	Подключение приспособления с анодом к обрабатываемой поверхности шейки
5	Меднение	Нанесение покрытия $D_k = 1,5-2 \text{ А/дм}^2$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.
6	Моечная	Промывка обрабатываемых поверхностей горячей водой с продувкой масляных каналов
7	Слесарная	Демонтаж коленчатого вала с опоры приспособления
8	Контрольная	Контроль основных геометрических параметров коленчатого вала (диаметры коренных и шатунных шеек)

Состав электролита меднения:

- медь (в пересчете на металл) – 20-25 г/л;
- железисто-синеродистый калий – $K_4Fe(CN)_6$ – 180-220 г/л;
- сегнетова соль – $KNaC_4H_4O_6$ – 90-110 г/л (ГОСТ 5845-79);
- кали едкое – 8-9 г/л (ГОСТ 9285-78);
- карбоксиметилцеллюлоза – 0,5-2 г/л.

Режим осаждения:

- рабочая температура – 18-25⁰С;
- плотность тока -1,5-2 А/дм² ;
- выход металла по току – 80%.

Предлагаемый способ снижения трения в подшипниках скольжения (шейках коленчатых валов) осуществляется следующим образом (рис. 4.18).

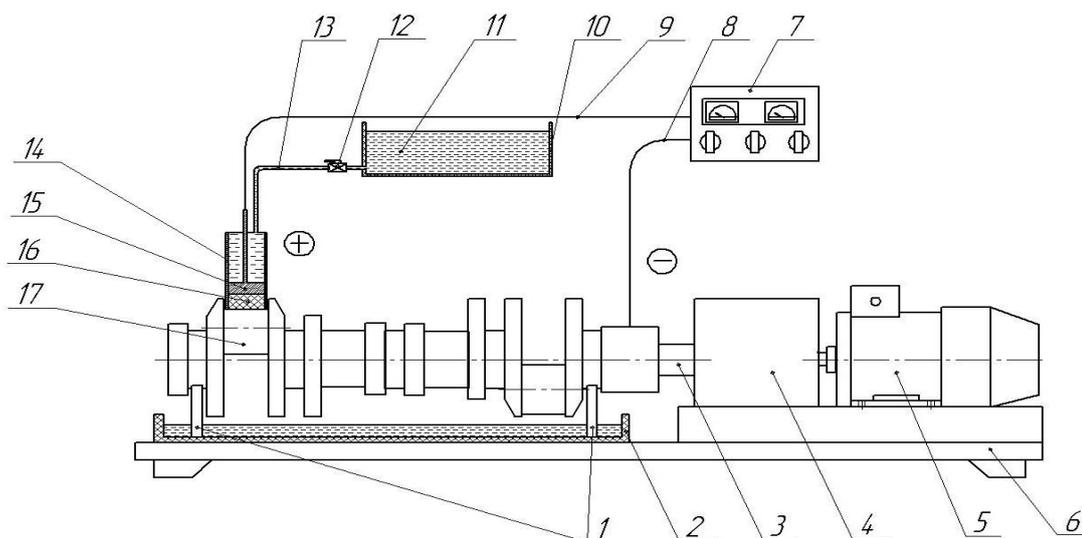


Рис. 4.18. Установка вневанного нанесения медного электролитического покрытия на шейки коленчатых валов:

- 1 – опоры; 2 – поддон для сбора электролита; 3 – карданная передача;
- 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – станина; 7 – панель управления;
- 8 – токоподводящие провода к катоду; 9 – токоподводящие провода к аноду;
- 10 – ванна с электролитом; 11 – электролит меднения; 12 – кран; 13 – трубка подвода электролита;
- 14 – вневанное приспособление (ячейка) меднения с электролитом; 15 – медный анод; 16 – губка; 17 – коленчатый вал

Коленчатый вал 17 укладывается на опоры установки 1 и подсоединяется к приводному валу. К шейке коленчатого вала монтируется приспособление для натирания 7 (диэлектрическая трубка с медным анодом и электролитом). Электродвигатель 5 через редуктор 4 и приводной вал 3 приводит коленчатый вал во вращение. К аноду (медной пластине) и катоду (коленчатому валу) подается напряжение. Таким образом, на поверхность шейки коленчатого вала 17 наносится слой меди толщиной 2-3 мкм, с высокими адгезионными свойствами. Такая толщина медного покрытия соответствует размерам микронеровностей или перекрывает их (рис. 4.19).

Данный слой в дальнейшем играет роль твердой смазки, препятствующей задирам и схватыванию сопряжения при режимах полужидкостной смазки в процессе эксплуатации.

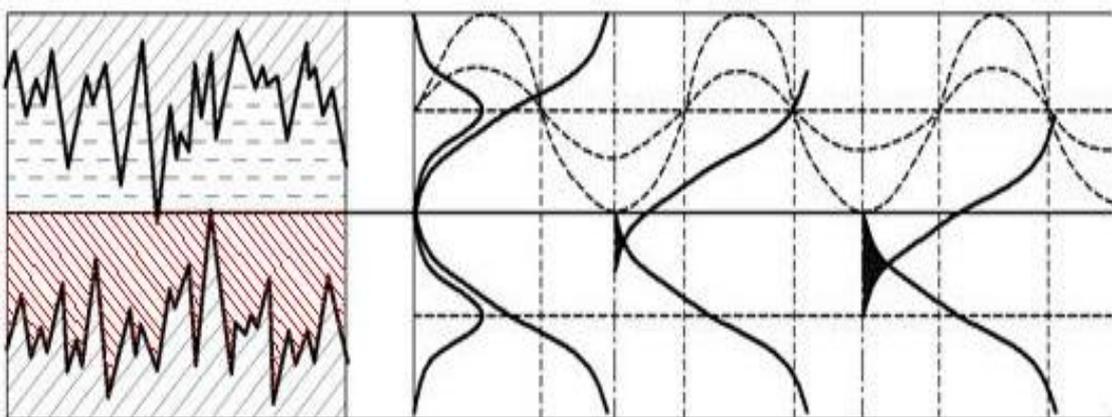


Рис. 4.19. Схема заполнения микронеровностей медным плакирующим покрытием и взаимодействие микронеровностей поверхности трения при постоянном и переменном режимах

Другим примером создания медного плакирующего покрытия на поверхностях трения является нанесение покрытия в стационарных ваннах. Схема электроосаждения медного покрытия на поверхность вала ротора турбокомпрессора представлена на рис. 4.20.

Вал ротора 1 завешивается в ванну 2 электрохимического осаждения, заполненную электролитом 3. Аноды 4 представляют собой медные пластины, завешенные в ванне.

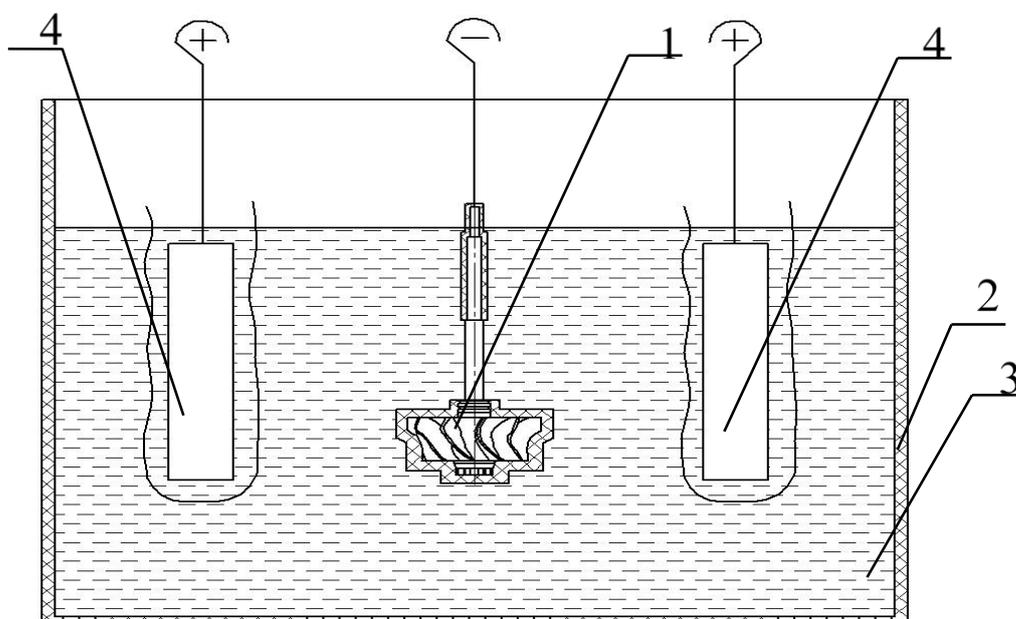


Рис. 4.20. Электролитическое осаждение меди в стационарных ваннах электрохимического осаждения

Производят электролитическое осаждение меди толщиной 2-3 мкм, после чего деталь промывают и направляют на сборку. Нанесенный слой меди представляет собой антифрикционный материал, препятствующий схватыванию деталей и образованию задиров.

При использовании данного способа:

- 1) исключается схватывание поверхностей трения;
- 2) снижается коэффициент трения;
- 3) уменьшается шероховатость трущихся поверхностей;
- 4) снижается износ подшипников скольжения.

Таким образом, предложены технологические процессы восстановления ресурсопределяющих деталей, основанные на закономерности формирования свойств поверхностных слоев, что позволяет существенно повысить их вторичный ресурс.

5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования позволили разработать практические рекомендации, повышающие долговечность двигателей автомобилей КамАЗ.

Основу рекомендаций составляют конструктивно-технологические и эксплуатационно-ремонтные решения, эффективность которых показывают результаты эксплуатационных исследований.

5.1 Эффективность совершенствования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей

Существующая структура эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателей неспособна обеспечить требуемой долговечности форсированных двигателей, так как основывается на устранении внезапных отказов и капитальных ремонтов двигателей.

При такой структуре удельные затраты растут после второго капитального ремонта (КР), то есть он не обеспечивает нормативного вторичного ресурса и оптимальным с экономической точки зрения при этом следует считать ресурс двигателей 270 тыс. км (рис. 6.1) [51].

Результаты аналитических и экспериментальных исследований определяют возможность повышения долговечности форсированных

двигателей через систему планово текущих ремонтов (ПТР), предупредительных (ПР) и капитальных ремонтов рис. 6.1, что позволяет снизить затраты на поддержание их работоспособности за счет совершенствования методов оценки и восстановления технического состояния основных элементов двигателей, сокращения числа аварийных отказов, что повышает эффективность эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей.

При рациональной структуре ЭРЦ двигателей минимум удельных затрат наступает перед вторым капитальным ремонтом. Таким образом, общая структура эксплуатационно-ремонтного цикла форсированных двигателей включает: первый плановый текущий ремонт через -75 тыс. км; первый предупредительный ремонт через - 135 тыс. км; второй плановый текущий ремонт через -195 тыс. км; капитальный ремонт через - 250 тыс. км; третий плановый текущий ремонт через - 310 тыс. км; второй предупредительный ремонт через - 360 тыс. км; четвертый плановый текущий ремонт через - 410 тыс. км; списание - 460 тыс. км (рис.6.1) [47, 51].

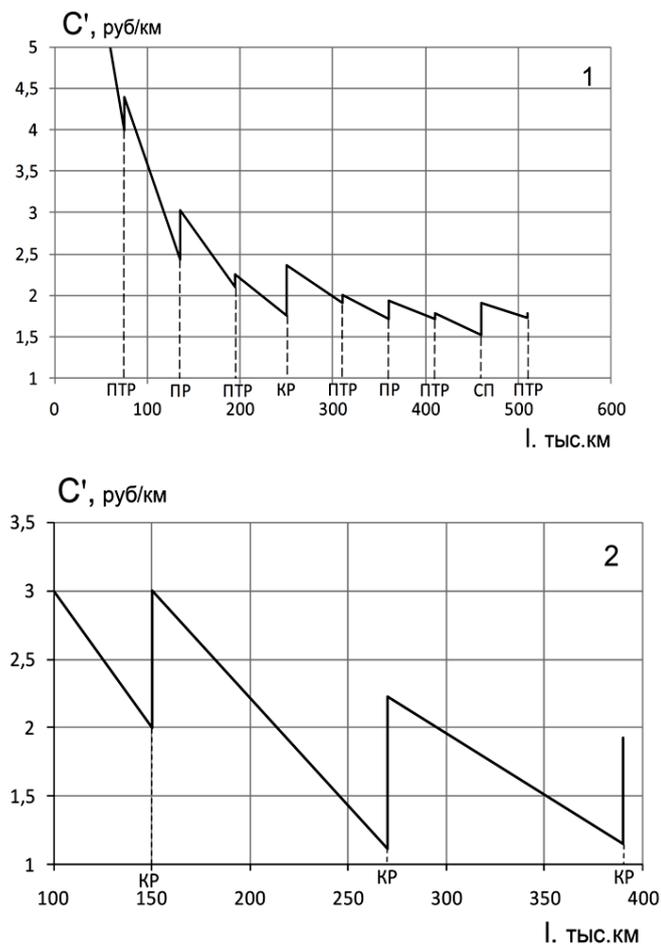


Рис. 5.1. Изменение удельных затрат на обеспечение работоспособности и двигателей КамАЗ-Евро. В процессе эксплуатации: 1-при предполагаемой структуре ЭРЦ; 2-при существующей структуре ЭРЦ

ПТР- плановый текущий ремонт, ПР- принудительный ремонт, КР-капитальный ремонт, СП-списание.

При предупредительном ремонте производят работы по замене вкладышей коленчатого вала, поршневых колец, ремонту или замене турбокомпрессоров. Предлагаемая схема технологического процесса ремонта двигателя КамАЗ-Евро представлена на рис.5.2.



Рис. 5.2. Схема ремонта двигателя КамАЗ-Евро

Совершенствование структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей, вводя в систему планово-текущий ремонт и предупредительный ремонт его ресурсопределяющих элементов, позволяет повысить ресурс силового агрегата. Введение данных видов ремонтов обусловлено технической и экономической целесообразностью, поскольку заменой или ремонтом дешевых деталей обеспечивается работоспособность дорогих, уменьшается число аварийных отказов, что снижает удельные затраты на обеспечение работоспособности и количество капитальных ремонтов силового агрегата. При этом снижается трудоемкость и время ремонта силового агрегата [47, 51].

Наработка до предупредительного ремонта определяется экономически по критерию минимальных суммарных удельных затрат с учетом кинетики предотказного состояния и вероятностного характера возникновения отказов и основана на предельных значениях показателей технического состояния основных элементов двигателей.

5.2 Результаты внедрения рекомендаций и технологических процессов в производство

Результаты диссертационной работы прошли производственные испытания в ОАО «КАМАЗ» г. Набережные Челны и были реализованы в 6 организациях ООО «Саратовский Автоцентр КАМАЗ», ОАО «Балаковский ПАК» г.Балаково, ООО «Авторемонт – Т», ОАО «Межгородтранс»

г. Саратов, ЗАО «Ремдизель» г. Набережные Челны и используются в технологических процессах текущих и капитальных ремонтов силовых агрегатов автомобилей этих предприятий. Результаты работы используются при восстановлении и упрочнении автомобильных деталей и других механизмов научно-технологическим центром НТЦ «Механик – Т» г. Саратов. Результаты работы используются в рамках производственной деятельности предприятия по ремонту и техническому обслуживанию гидравлических систем и оборудования автомобилей, сельскохозяйственной и другой техники в ОАО «Гидросервис».

Материалы работы используются в лекционных курсах, дипломном и курсовом проектировании студентов Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., а также могут быть полезны для инженеров и работников, специализирующихся в области технического обслуживания, ремонта автомобилей, восстановления автомобильных деталей и другой техники. Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

5.3 Технико-экономическая оценка эффективности исследования

Для оценки эффективности предложенной технологии восстановления элементов двигателя (шатунa, блока цилиндров, коленчатых валов), были проведены эксплуатационные исследования по методике, изложенной в главе 2. Результаты обработки приведены на рис.6.3 и в табл. 6.2., табл.6.3, табл. 6.4 [26].

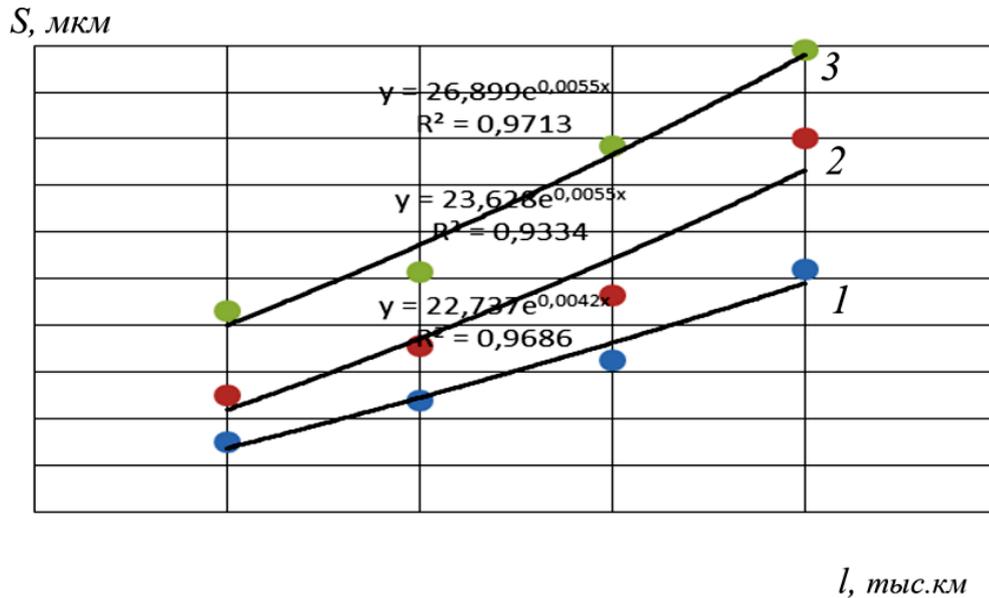


Рис. 5.3. Зависимость прогиба шатунных вкладышей от наработки двигателей КамАЗ-740.

1-новые вкладыши двигателя; 2-после восстановления шатунов по предложенной технологии; 3-после КР с заменой вкладышей без ремонта шатунов.

Т а б л и ц а 6.2

Коэффициенты зависимости диагностического параметра (прогиб) шатунных вкладышей от наработки двигателей КамАЗ [26]

Группы двигателей	Параметры		
	y_0 , мкм	$b, 1/\text{тыс.км}$	R^2
1. Неремонтированные (новые) двигатели	22,73	0,004	0,968
2. После восстановления шатунов по предлагаемой технологии	23,62	0,005	0,933
3. После КР с заменой вкладышей без ремонта шатунов	26,89	0,005	0,971

Т а б л и ц а 6.3

Параметры распределения межремонтного ресурса
крупногабаритных коленчатых валов

Наименование валов	Средние значения, L (тыс. км)	стандартное отклонение, σ (тыс. км)	Коэффициент вариации	Относительный вторичный ресурс (L2/L1)
Новые	195,2	106,2	0,544	-
Восстановленные	157,4	84,54	0,537	0,806

Т а б л и ц а 6.4

Параметры распределения ресурса опор блоков цилиндров

Показатели технического состояния постели блока цилиндров, мкм	Параметры		Критерии	
	Y_0	b	R^2	F_p
Новые	8,35	0,0058	0,911	10,24
Восстановленные	8,27	0,0052	0,92	10,25

Анализ данных показывает, что восстановление ресурсоопределяющих элементов силового агрегата (шатунных и опорных блоков цилиндров) по предложенной технологии (электролитическим железнением), позволяет повысить эксплуатационный ресурс двигателей в среднем на 15%.

Основным направлением повышения долговечности восстановленных коленчатых валов является создание на шейках валов плакирующего медного покрытия, играющего роль твердой смазки, что позволяет снизить вероятность задиров и обеспечить их ремонтпригодности в течение всего эксплуатационно-ремонтного цикла.

Эффективность предложенного метода повышения долговечности восстановленных коленчатых валов исследовалось по эксплуатационным испытаниям 80-ти новым и 80-ти восстановленным по предложенной технологии коленчатым валам. Результаты исследований представлены на рис. 5.4, 5.5 и табл. 6.3.

С учетом вышеизложенного, использование предложенного технологического процесса восстановления (рис.5.29) показывает, что стоимость восстановленного коленчатого вала будет в значительно ниже стоимости нового вала, а качество – сопоставимо.

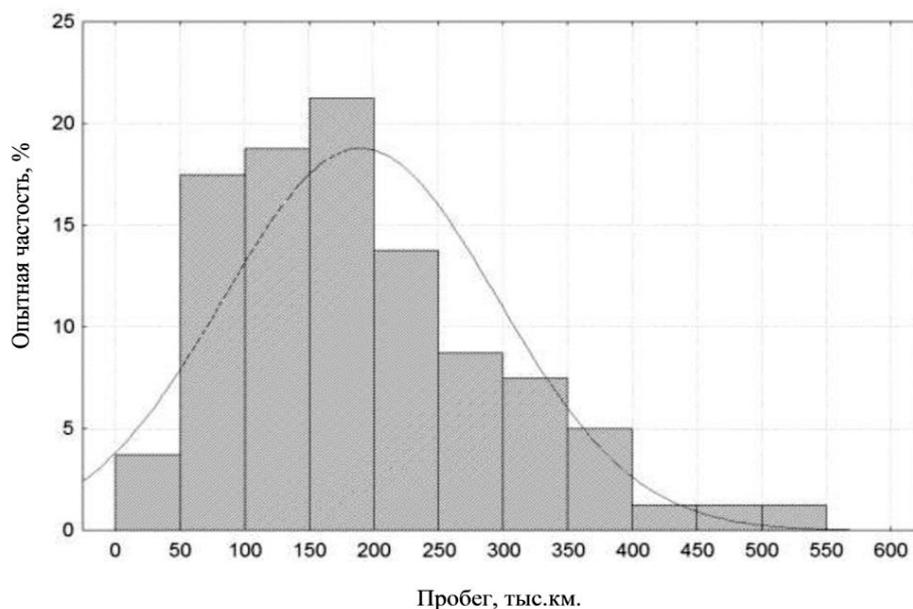


Рис. 5.4. Параметры распределения для новых двигателей.

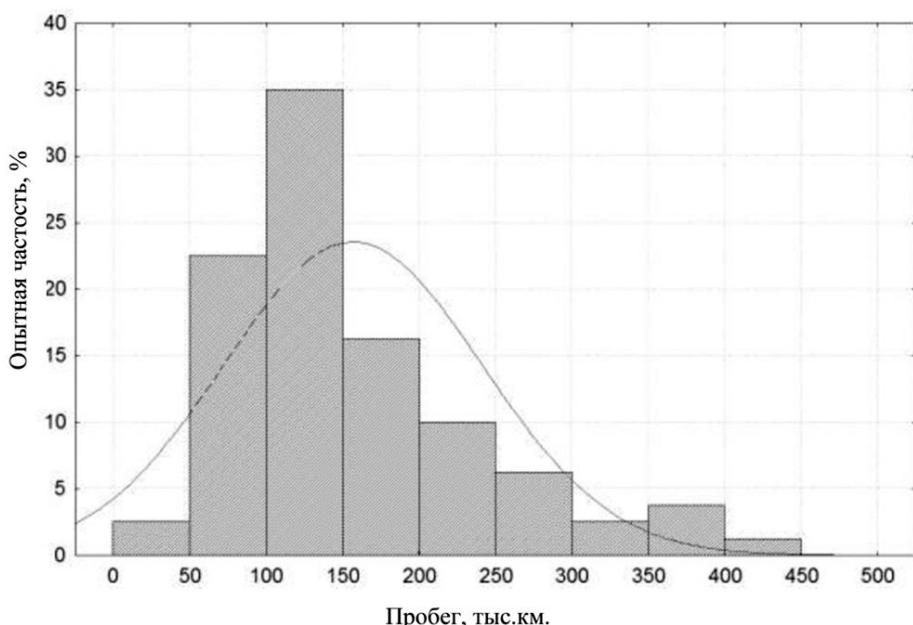


Рис. 5.5. параметры распределения для восстановленных валов.

Усовершенствование системы смазки турбокомпрессора позволило существенно повысить его надежность, а также надежность всего двигателя. В процессе эксплуатационных испытаний подконтрольных турбокомпрессоров с модернизированной системой смазки на 01.07.12 г. получены хорошие результаты по их работоспособности, пробег автомобилей составил 200000 км, доля отказов ТКР уменьшилась по сравнению с 2008 г. на 27%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решена актуальная научно-практическая проблема, состоящая в повышении долговечности автомобильных двигателей и снижении затрат на обеспечение их работоспособности за счет предупреждения отказов и своевременного их устранения на основе прогнозирования технического состояния и управляемого формирования свойств поверхностей ресурсопределяющих деталей при восстановлении.

По принятой планово-предупредительной системе текущий ремонт выполняется при наступлении отказа. Поэтому текущий ремонт нормируется в удельных единицах т.е. на тыс. км пробега. Это учитывает реальный уровень технической эксплуатации, а не изменение технического состояния элементов автомобиля

2. Сформулированы научные основы, методология повышения долговечности автомобильных двигателей, использование которых позволяет повысить эффективность эксплуатации автомобильного транспорта, что подтверждает значимость полученных результатов для экономики страны.

3. Обоснован комплекс экспоненциальных зависимостей (3.7), (3.14), (3.46), (3.47) показателей технического состояния силового агрегата от наработки, позволяющих прогнозировать их остаточный ресурс, а также закономерности формирования свойств поверхностного слоя деталей при восстановлении на основе их напряженно-деформированного состояния, которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса восстановления.

4. Усовершенствованы технологии восстановления элементов двигателей:

– электролитическим осаждением железоникелевых покрытий в условиях контролируемого разрежения над зеркалом электролита, позволяющим получать равномерные осадки покрытия с меньшим припуском на механическую обработку и однородными физико-механическими свойствами;

– наплавочным металлопокрытием под слоем флюса с последующим созданием плакирующего медного покрытия на шейках коленчатых валов, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задиры шеек при критических условиях смазки. Данное покрытие рекомендуется наносить не только при восстановлении коленчатых валов, но и при замене вкладышей или при перешлифовке шеек коленчатых валов под ремонтный размер, при текущем и капитальном ремонте двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдонькин, Ф.Н. Методика определения оптимальной наработки двигателя до предупредительного ремонта [Текст] / Ф.Н. Авдонькин, А.С. Денисов, Р.Е. Колосов // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 1. – С. 7-8.
2. Авдонькин, Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1993. – 352 с.
3. Авдонькин, Ф.Н. Повышение срока службы автомобильных двигателей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – Саратов: Приволжск. кн. изд-во, 1969. – 278 с.
4. Авдонькин, Ф.Н. Прогнозирование изменения технического состояния подшипников коленчатого вала [Текст] / Ф.Н. Авдонькин, А.С. Денисов // Автомобильная промышленность. – 1975. – №7. – С. 4-5.
5. Авдонькин, Ф.Н. Текущий ремонт автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1978. – 269 с.
6. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.
7. Азаматов, Р.А. Восстановление деталей силового агрегата КамАЗ-740.11-240 (Euro-1) [Текст] / Р.А. Азаматов, А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, П.Г. Курдин . – Набережные Челны: КамАЗтехобслуживание, 2007. – 307 с.
8. Анализ дефектов двигателей КамАЗ-740 при капитальном ремонте [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня рождения профессора А.Г. Рыбалко. – Саратов: СГАУ, 2006. – Т.3. -С. 19-25.
9. Анализ физико-механических свойств металла коленчатых валов, восстановленных нанесением наплавленных металлопокрытий [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №4. – С. 45-48.
10. Аналитические исследования выбега турбокомпрессора ДВС [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С.104-108.
11. Асоян, А.Р. Анализ деформаций и теплонапряженности корпуса турбокомпрессора двигателей КАМАЗ-ЕВРО [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, Н.В. Орлов // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. – 2011. – №3. – С. 21-24.
12. Асоян, А.Р. Анализ изменения технического состояния ресурсопределяющих элементов дизелей КАМАЗ в процессе эксплуатации [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Известия ВолгГТУ. – 2011. – №8. – С. 32-35.
13. Асоян, А.Р. Анализ напряженного состояния и геометрической формы верхней и нижней головок шатунов двигателя КамАЗ-Евро [Текст]

/ А.Р. Асоян // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – № 1. – С. 3-8.

14. Асоян, А.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния коренных опор блока цилиндров двигателя КамАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Суханкин // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 38-41.

15. Асоян, А.Р. Анализ работоспособности подшипникового узла турбокомпрессора в зависимости от технического состояния и режима работы [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – №2. – С. 34-36.

16. Асоян, А.Р. Обеспечение работоспособности турбокомпрессоров автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.Р. Асоян, А.А. Коркин. – Саратов: СГТУ, 2012. – 176 с.

17. Асоян, А.Р. Анализ технического состояния турбокомпрессоров и методы их ремонта [Текст] / А.Р. Асоян // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и других машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2005. – С.155 – 158.

18. Асоян, А.Р. Анализ факторов, влияющих на работоспособность подшипникового узла турбокомпрессора [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 44-49.

19. Асоян, А.Р. Аналитическая зависимость интенсивности изнашивания от зазора в подшипниках коленчатого вала [Текст] / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.П. Захаров // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 4-9.

20. Асоян, А.Р. Аналитические исследования выбега турбокомпрессора ДВС [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 104-108.

21. Асоян, А.Р. Влияние условий электролиза на микроструктуру электролитического железа [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, В.П. Шиловский // Восстановление и упрочнение деталей машин при ремонте: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1993. – С. 64 – 67.

22. Асоян, А.Р. Влияние разрежения над зеркалом электролита на внутреннее напряжение осадков электролитического железа [Текст] / А.Р. Асоян // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2000. – С. 99 – 102.

23. Асоян, А.Р. Влияние условий электролиза на геометрические характеристики железных покрытий [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, В.Е. Карпенков // Технологическое формирование деталей при восстановлении и упрочнении: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 4 – 11.

24. Асоян, А.Р. Влияние элементов режима железнения на точность заготовок, формообразуемых при восстановлении изношенных деталей [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Восстановление и управление качеством ремонта деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 85 – 96.

25. Асоян, А.Р. Восстановление нижних головок шатунов двигателей семейства КАМАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.М. Юдин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2007. – С. 134 – 138.

26. Асоян, А.Р. Восстановление шатунов автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.М. Юдин. – Саратов: СГТУ, 2008. – 100 с.

27. Асоян, А.Р. Изменение технического состояния основных элементов дизелей КамАЗ-ЕВРО в процессе эксплуатации / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 16-24.

28. Асоян, А.Р. Исследование адгезионной связи электролитических покрытий железа со сплавом 42 ХМФ-Ш [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, А.М. Пашенных // Повышение эффективности восстановительной и упрочняющей технологии при ремонте машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1994. – С. 29 – 32.

29. Асоян, А.Р. Исследование зависимости шероховатости поверхности деталей с гальванопокрытиями, обработанными способом тангенциального резания от некоторых технологических факторов [Текст] / А.Р. Асоян, А.Н. Виноградов, Г.А. Боровиков // Повышение эффективности восстановительной и упрочняющей технологии при ремонте машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1994. – С. 49 – 60.

30. Асоян, А.Р. Повышение долговечности турбокомпрессоров форсированных двигателей [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, Н.В. Орлов // Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 49-51.

31. Асоян, А.Р. Контроль макрогеометрических отклонений шатуна при ремонте, для повышения ресурса двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011-№1(52) – С. 55-61.

32. Асоян, А.Р. Моделирование температуры подшипникового узла турбокомпрессора после остановки автомобильного двигателя/ А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин [Текст] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 1. – С. 16-20.

33. В.П. Захаров // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 24-33.

34. Асоян, А.Р. Эксплуатационные испытания восстановленных больших насосов гидромеханических передач автобусов [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Повышение эффективности проектирования, испытания и эксплуатации двигателей автомобилей, вездеходов, специальных строительных и дорожных машин: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С. 7 – 8.

35. Асоян, А.Р. Электролитическое железнение в восстановительной и упрочняющей технологиях [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 1994. – С. 33 – 35.

36. Асоян, А.Р. Исследование влияния состояния ремонтного фонда на точность размеров и формы формообразуемой электролитическим железным покрытием заготовки [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1998. – С. 80-87.

37. Асоян, А.Р. Исследование процесса анодного растворения легированного железоуглеродистого сплава [Текст] / А.Р. Асоян, А.М. Пашенных // Восстановление и упрочнение деталей машин при ремонте: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1993– С. 75 -79.

38. Асоян, А.Р. Повышение качества заготовок, формируемых электролитическим железным покрытием [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Р. Асоян. – Саратов, 1999. – 157 с.

39. Асоян, А.Р. Повышение эксплуатационной надежности силовых агрегатов автомобилей совершенствованием эксплуатационно-ремонтных циклов и технологий восстановления ресурсопределяющих деталей [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2012. – С. 379-381.

40. Балтенас, Р. Моторные масла. Производство. Свойства. Классификация. Применение [Текст] / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. – М., СПб.: Альфа-Лаб., 2000. – 272 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.1 Анализ дефектов основных элементов деталей двигателя КамАЗ-740.....	5
1.1.1 Анализ дефектов коленчатого вала	5
1.1.2 Анализ дефектов блоков цилиндров	13
1.1.3 Анализ дефектов шатунов	16
1.2 Обоснование необходимости совершенствования структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ.....	19
2.1 Программа и общая методика исследования	24
2.2 Методика аналитического исследования.....	26
2.3 Методика измерения деталей.....	28
2.4 Методика определения трибологических характеристик.....	30
2.5 Методика стендовых моторных исследований	32
2.6 Методика эксплуатационных исследований	33
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	33
3.1 Анализ условий развития процессов изнашивания основных элементов двигателя	34
3.1.1 Изменение технического состояния шатуна	34
3.1.2 Изнашивание верхней и нижней головок шатуна в процессе эксплуатации.....	36
3.1.3 Анализ напряженно-деформированного состояния шатуна в процессе эксплуатации	40
3.2 Изменение технического состояния коленчатого вала	45
3.3 Изменение технического состояния опор блока цилиндров	58
4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ ПО ИХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ.....	64
4.1 Обоснование нормативов ресурса и предельного технического состояния элементов двигателя.....	64
4.3 Технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием.....	72
4.3.1 Совершенствование технологии восстановления шатунов двигателей КамАЗ	72
4.3.2 Совершенствование технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием	79
4.3.3 Совершенствование технологии восстановления опор блока цилиндров.....	80
4.4 Технология создания плакирующего медного покрытия на поверхностях трения	86

5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	89
5.1 Эффективность совершенствования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей	89
5.2 Результаты внедрения рекомендаций и технологических процессов в производство	92
5.3 Техничко-экономическая оценка эффективности исследования.....	93
Основные результаты и выводы.....	96

Тема выпускной квалификационной работы

«Совершенствование технологических процессов
восстановления основных элементов двигателей по их
техническому состоянию»

Выполнил: магистр Автомобильного-дорожного института
кафедры Эксплуатации автомобильного транспорта
Гурьянов роман Евгеньевич
Научный руководитель: доцент к.т.н.
Захаров Юрий Альбертович



Цель работы -повышение долговечности автомобильных двигателей и снижение затрат на обеспечение их работоспособности, путем совершенствования технологических процессов восстановления основных деталей двигателей по их техническому состоянию.

Задачи:

- 1. Обобщить и развить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки.**
- 2. Разработать методологию и измерительный комплекс для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей основных деталей двигателей, вследствие их напряженно-деформированного состояния.**
- 3. Экспериментально проверить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки в эксплуатационных условиях и получить их параметры для установления предельного состояния.**
- 4. Сформировать технологические основы восстановления деталей двигателей по их техническому состоянию, с разработкой оборудования и оснастки.**

1. Обобщить и развить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки.



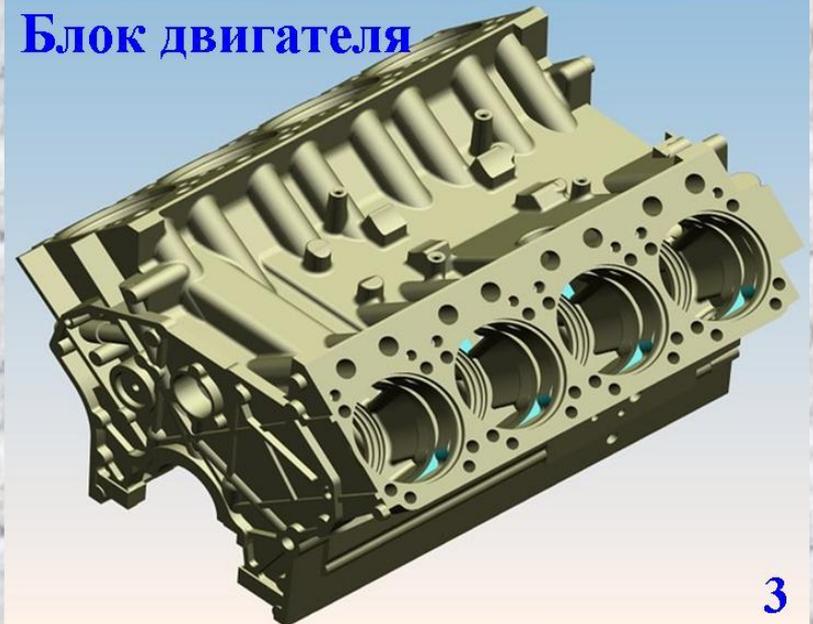
Коленчатый вал



Шатуны

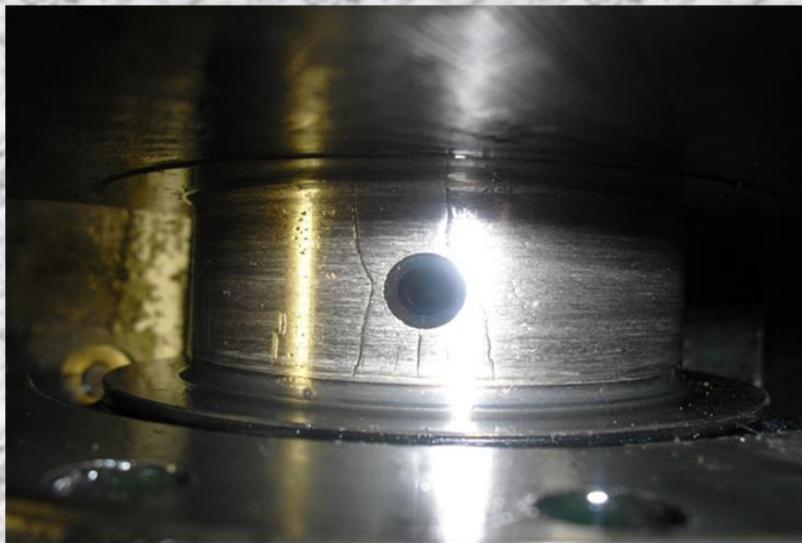


Турбокомпрессор



Блок двигателя

1. Обобщить и развить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки.



Задиры и трещины на шейке вала

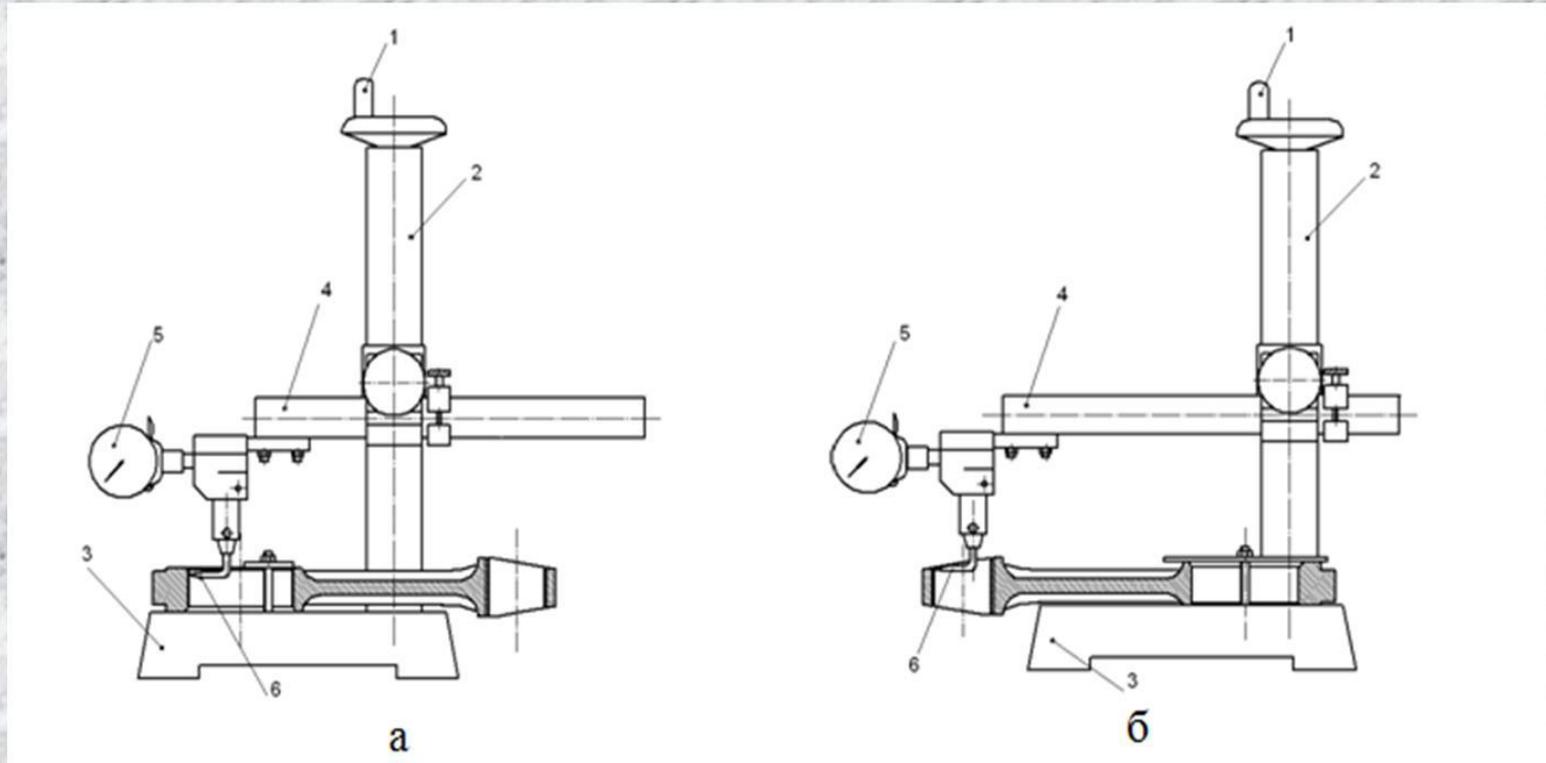


Усталостные разрушения по верхней головке шатуна и цековке под головку блока



Износ постели блока в результате перегрева сопряжения

2. Разработать методологию и измерительный комплекс для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей основных деталей двигателей, вследствие их напряженно-деформированного состояния.



а– отклонение образующей поверхности от прямолинейности

б– определение деформации стержня шатуна

2. Разработать методологию и измерительный комплекс для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей основных деталей двигателей, вследствие их напряженно-деформированного состояния.



Прибор для измерения соосности постелей блока двигателя

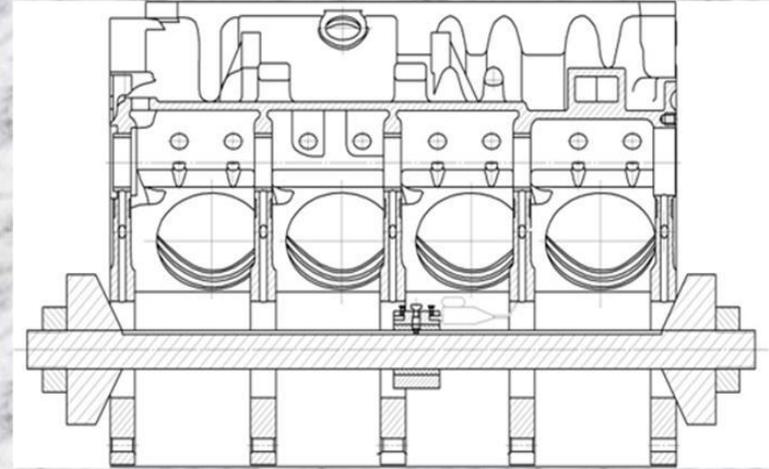
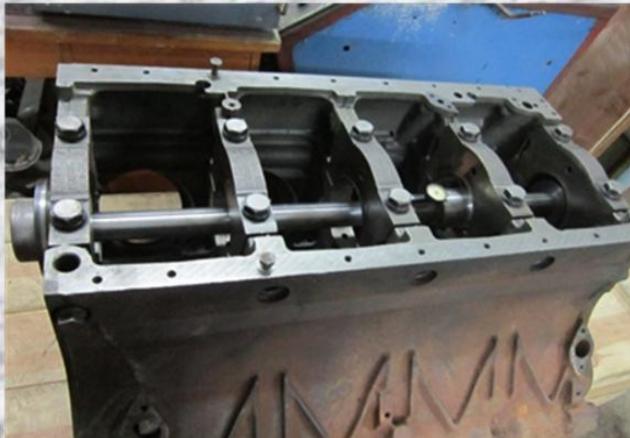
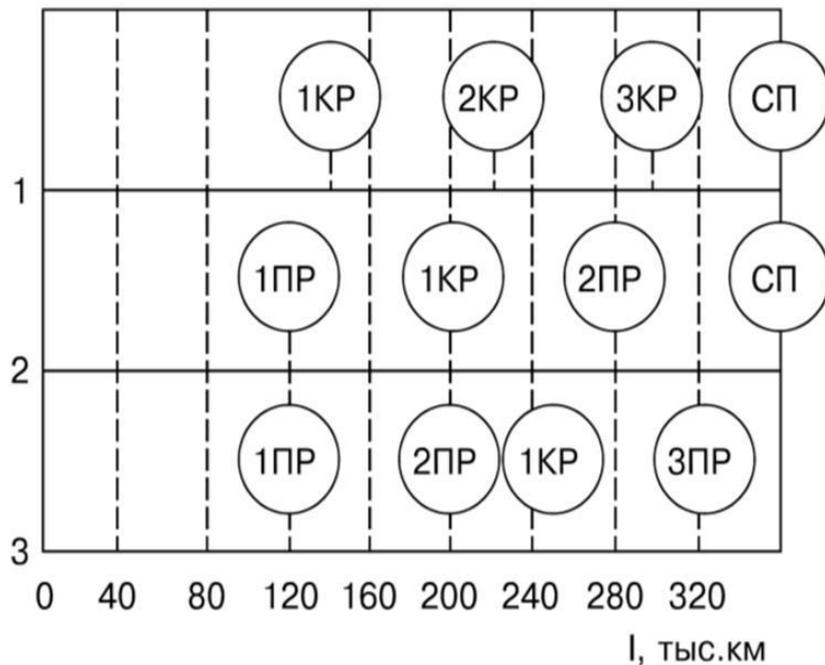


Схема измерения соосности постелей блока двигателя КамАЗ 740



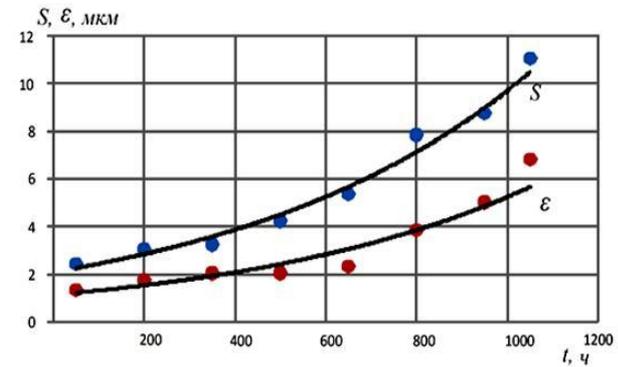
Базирование приспособления в опорах блока

3. Экспериментально проверить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки в эксплуатационных условиях и получить их параметры для установления предельного состояния.

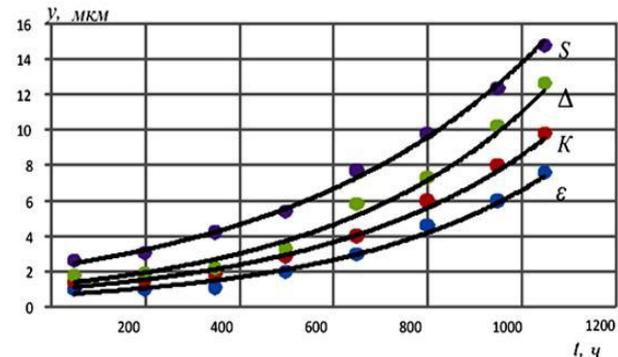


Структура эксплуатационно-ремонтного цикла для дизелей ЯМЗ

а



б



Изменение показателей технического состояния шатуна в процессе стендовых моторных испытаний двигателей КамАЗ-740

4. Сформировать технологические основы восстановления деталей двигателей по их техническому состоянию, с разработкой оборудования и оснастки.

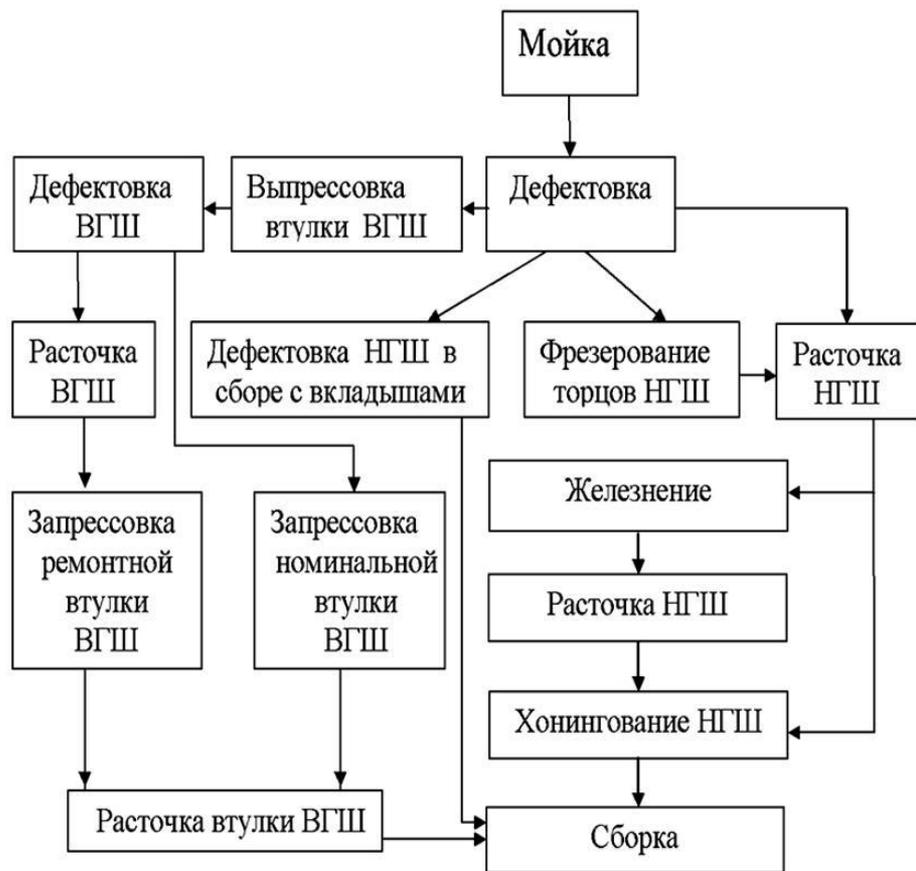


Схема технологического процесса восстановления шатуна.



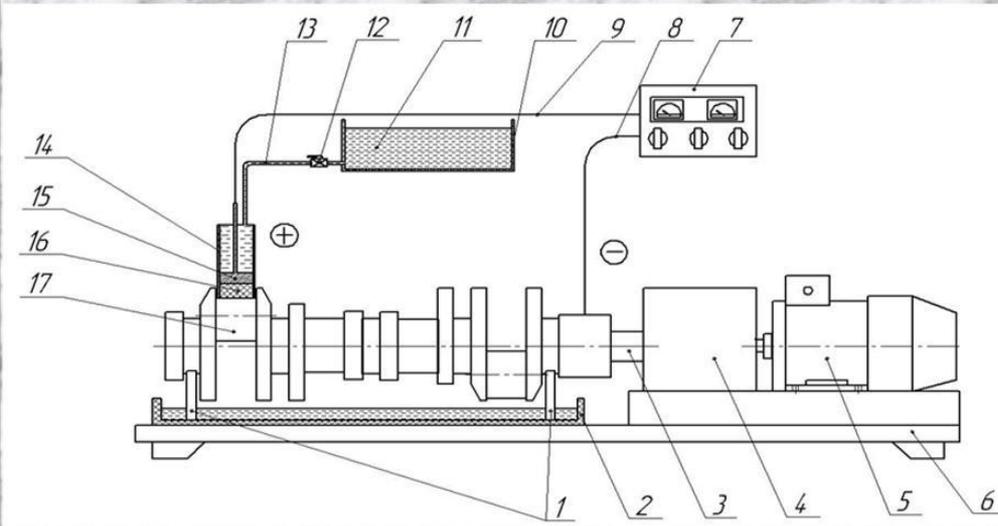
Внешний вид электролитической ячейки при осаждении электролитического железа на опоры блока цилиндров

4. Сформировать технологические основы восстановления деталей двигателей по их техническому состоянию, с разработкой оборудования и оснастки.



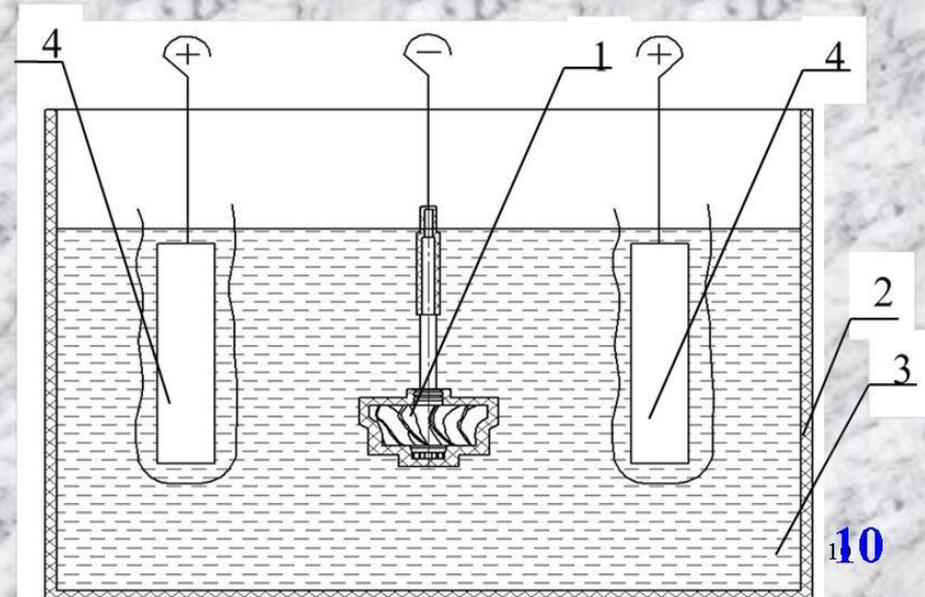
Внешний вид покрытия электролитического железа, осажденного на коленчатого вала

4. Сформировать технологические основы восстановления деталей двигателей по их техническому состоянию, с разработкой оборудования и оснастки.



Установка вневанного нанесения медного электролитического покрытия на шейках коленчатых валов

Электролитическое осаждение меди в стационарных ваннах электрохимического осаждения



Вывод

Решена актуальная научно-практическая проблема, состоящая в повышении долговечности автомобильных двигателей. По принятой планово-предупредительной системе текущий ремонт выполняется при наступлении отказа. Поэтому текущий ремонт нормируется в удельных единицах т.е. на тыс. км пробега. Это учитывает реальный уровень технической эксплуатации, а не изменение технического состояния элементов автомобиля.

Разработанные методы и измерительные устройства для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей ресурсопределяющих деталей позволяют повысить качество дефектовки и сборки деталей.

Усовершенствованы технологические процессы восстановления ресурсопределяющих деталей на основе дефектовки по макрогеометрическим показателям. Основное внимание при восстановлении уделяется устранению макрогеометрических отклонений с использованием процесса электролитического железнения и созданию на трущихся сопряжениях плакирующего медного покрытия, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задирь шеек при критических условиях смазки.

доклад окончен
Спасибо за внимание

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

на выпускную квалификационную работу студента по выполнению задач
Государственной итоговой аттестации

Гурьянова Романа Евгеньевича

Фамилия, имя, отчество студента

тема выпускной квалификационной работы: «Совершенствование технологических процессов восстановления основных элементов двигателей по их техническому состоянию»

квалификация (бакалавр, магистр, специалист)

магистр

нужное указать

направление подготовки: 23.04.03 - Эксплуатация транспортных и транспортно-технологических машин и комплексов

Сформированность компетенций у выпускника по итогам выполнения аттестационных заданий (заданий на выпускную квалификационную работу)
(представлена в Приложении А к отзыву научного руководителя)

Объем заимствований из общедоступных источников считать допустимым/недопустимым (указать) – считать допустимым

Соответствие выпускной квалификационной работы требованиям¹

Наименование требования	Заключение о соответствии требованиям (отметить «соответствует», «соответствует не в полной мере», или «не соответствует»)
1. Актуальность темы	<i>соответствует</i>
2. Соответствие содержания теме	<i>соответствует</i>
3. Полнота, глубина, обоснованность решения поставленных вопросов	<i>соответствует</i>
4. Новизна	<i>соответствует</i>
5. Правильность расчетных материалов	<i>соответствует</i>
6. Возможности внедрения и опубликования работы	<i>соответствует</i>
7. Практическая значимость	<i>соответствует</i>
8. Оценка личного вклада автора	<i>соответствует</i>

Недостатки работы: Присутствуют погрешности оформления, не снижающие ценность выпускной квалификационной работы.

¹ Список требований к выпускным квалификационным работам, их содержательные характеристики и критерии оценки соответствия устанавливаются методическими комиссиями факультетов (институтов) и приводятся в Основных образовательных программах.

Общее заключение о соответствии выпускной квалификационной работы требованиям:
ВКР установленным в ООП требованиям соответствует / частично соответствует/
не соответствует (нужное подчеркнуть)

Актуальность работы подтверждается актуальностью выбранной темы, поставленных задач в работе и технических решений.

Научная новизна работы заключается в совершенствовании технологии формирования электролитического осаждения железа и осаждении меди на изношенных поверхностях деталей машин.

Обобщенная оценка содержательной части выпускной квалификационной работы:

ВКР носит законченный характер, содержит в достаточном объеме справочный, иллюстрационный, расчетный и табличный материал. Стил изложения доступный для понимания, широко используются специализированные термины и понятия, применены общепринятые, не вызывающие сомнения, методики.

Графический материал представлен слайдами презентации с необходимыми схемами, диаграммами и другой иллюстративной информацией облегчающей восприятие и понимание сути работы.

Рекомендуемая оценка выпускной квалификационной работы отлично.

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта»
ФГБОУ ВО ПГУАС, Захаров Юрий Альбертович

_____ **ЛЮ.А. Захаров/**

«20» июня 2017г.

Сформированность компетенций у выпускника по итогам выполнения аттестационных заданий (заданий на выпускную квалификационную работу)

Задания	Компетенция	Обобщенная оценка сформированности компетенции ²
1. Обоснование актуальности темы ВКР и анализ существующих конструкций	Способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1)	<i>Высокий</i>
2. Самостоятельная работа над вопросами ВКР, проведение предварительных изысканий и исследований с целью формирования темы и направления ВКР.	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3)	<i>Продвинутый</i>
3. Формулировка приоритетных целей и задач исследования ВКР. Выявление перспективной технологии восстановления деталей машин.	Способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки (ОПК-1)	<i>Продвинутый</i>
4. Применение дробного многофакторного планирования эксперимента, формирования плана и поверхностей отклика, выполнение математической обработки полученных результатов исследований.	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы (ОПК-2)	<i>Высокий</i>
5. Применение технологии ремонта и восстановления изношенных поверхностей деталей машин в процессе обслуживания и ремонта автомобилей.	Способность использовать на практике знание системы технического обслуживания и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и технологического оборудования (ПК-5)	<i>Высокий</i>
6. Разработан технологический процесс восстановления поверхностей деталей машин, электролитическим осаждением железа и осаждением медного электролитического покрытия.	Готовность использовать передовой отраслевой, межотраслевой и зарубежный опыт при разработке производственных программ по технической эксплуатации, ремонту и сервисному обслуживанию транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта (ПК-6)	<i>Высокий</i>
7. Рассчитаны рабочие режимы осаждения электролитического железа и медного электролитического покрытия изношенных поверхностей по предлагаемой технологии.	Способность к проведению технологических расчетов транспортного предприятия с целью определения потребности в производ-	<i>Высокий</i>

² Интегральная оценка сформированности компетенции определяется с учетом полноты знаний, наличия умений (навыков), владения опытом, проявления личностной готовности к проф. самосовершенствованию.

	ственно-технической базе, персонале, материалах, запасных частях и других производственных ресурсах (ПК-7)	
8. Проведение контроля качества сформированного медного слоя, определение физико-механических свойств покрытия.	Способность к организации и проведению контроля качества технического обслуживания, ремонта и сервисного обслуживания транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта (ПК-8)	Высокий
9. Восстановление ресурса изношенных деталей машин и работоспособности ТпТМО в целом. Совершенствование процесса восстановления деталей электролитического железа и медного электролитического покрытия.	Способность к управлению техническим состоянием транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта, обеспечивающим эффективность их работы на всех этапах эксплуатации (ПК-9)	Высокий
10. Исследование физико-механических, свойств медного покрытия Проведение необходимых инженерных расчетов конструкции.	Готовность к использованию знаний о материалах, используемых в конструкции и при эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения, и их свойств (ПК-14)	Высокий
11. Применение теории изнашивания деталей машин, принципов и зависимостей коррозии поверхностей с целью совершенствования процесса восстановления изношенных поверхностей.	Готовность к использованию знаний о механизмах изнашивания, коррозии и потери прочности агрегатов, конструктивных элементов и деталей транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения (ПК-15)	Высокий
12. Разработка программы и методик проведения исследований и испытаний, организация и проведение экспериментов по изучению физико-химических процессов при формировании металлопокрытий при восстановлении деталей электролитическим железом и медным покрытием.	Способность разрабатывать методики, планы и программы проведения научных исследований и работ, готовить задания для исполнителей, организовывать проведение экспериментов и испытаний, анализировать и обобщать их результаты (ПК-17)	Высокий
13. Аннотация ВКР. Введение ВКР. Проведение анализа современного состояния исследуемого вопроса, существующих конструкций и методик электролитического железа и нанесения медного электролитического покрытия., на-	Способность вести сбор, анализ и систематизацию информации по теме исследования, готовить научно-технические отчеты,	Высокий

<i>ментный и литературный поиск.</i>	обзоры публикаций по теме исследования (ПК-18)	
14. Применение нормативной документации, содержащей требования к ресурсу и характеристикам восстановленных деталей машин, проведение патентного и литературного поиска необходимой информации.	Способность пользоваться основными нормативными документами отрасли, проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов техники и технологии, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации программ для электронно-вычислительных машин и баз данных на основе использования основных понятий в области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патентообладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации (ПК-21)	<i>Высокий</i>
15. Обоснование выбора рационального способа восстановления изношенных поверхностей деталей ТИТМО.	Готовность использовать знания о методах принятия решений о рациональных формах поддержания и восстановления работоспособности транспортных и технологических машин и оборудования (ПК-23)	<i>Высокий</i>
16. Обработка результатов многофакторных экспериментов на ПЭВМ, получение уравнений регрессии и оптимальных полей отклика.	Готовность применять аналитические и численные методы решения поставленных организационно-управленческих задач, способностью использовать языки и системы программирования для решения этих задач на основе технико-экономического анализа (ПК-25)	<i>Высокий</i>
17. Литературный анализ существующих технологий ремонта и восстановления деталей машин. Перспективные технологии восстановления.	Готовность к использованию знания конструкции и элементной базы транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и применяемого при технической эксплуатации и сервисном обслуживании оборудования (ПК-30)	<i>Высокий</i>
18. Совершенствование наиболее перспективной технологии восстановления изношенных поверхностей деталей машин осаждением элек-	Готовность к использованию знания рабочих процессов, принципов и осо-	<i>Высокий</i>

<p><i>тролитическим железом и нанесением медного электролитического покрытия.</i></p>	<p>бенностей работы транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и применяемого при технической эксплуатации и сервисном обслуживании оборудования (ПК-31)</p>	
<p><i>19. Осуществление контроля качества формируемого медного слоя на изношенных поверхностях деталей ТuТТМО.</i></p>	<p>ПК-35 готовностью к использованию знания методов контроля соблюдения технических условий на техническое обслуживание, ремонт, сборку, испытание транспортных и технологических машин и оборудования</p>	<p><i>Высокий</i></p>
<p><i>20. Разработка методики восстановления изношенных поверхностей деталей ТuТТМО осаждением электролитическим железом и нанесением медного электролитического покрытия.</i></p>	<p>ПК-36 готовностью к использованию знания технологий текущего ремонта и технического обслуживания с использованием новых материалов и средств диагностики</p>	<p><i>Высокий</i></p>
<p><i>21. Изучение существующих методик ремонта и восстановления деталей ТuТТМО, проведение анализа и планирование путей совершенствования.</i></p>	<p>ПК-38 готовностью к использованию знания технических условий и правил рациональной эксплуатации транспортной техники, причин и последствий прекращения ее работоспособности.</p>	<p><i>Высокий</i></p>

Уровень сформированности компетенций: *высокий*

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

Гурьянова Романа Евгеньевича

Фамилия, имя, отчество студента

тема выпускной квалификационной работы: «Совершенствование технологических процессов восстановления основных элементов двигателя по их техническому состоянию»

квалификация (магистр, специалист)

магистр

нужно указать

направление подготовки: 23.04.03 –Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Сформированность компетенций у выпускника по итогам выполнения аттестационных заданий (заданий на выпускную квалификационную работу) (представлена в Приложении Б к отзыву рецензента)

Соответствие выпускной квалификационной работы требованиям

Наименование требования	Заключение о соответствии требованиям (отметить «соответствует», «соответствует не в полной мере», или «не соответствует»)
1. Актуальность темы	соответствует
2. Соответствие содержания работы заявленной теме	соответствует
3. Полнота проработки вопросов	соответствует
4. Новизна	соответствует
5. Наличие оригинальных разработок	соответствует
6. Качество анализа	соответствует
7. Практическая значимость и применимость результатов на практике	соответствует

Достоинства содержательной части выпускной квалификационной работы:

Работа изложена доступным языком, с применением общепринятых технических терминов и определений. Последовательность изложения материала позволяет системно рассмотреть изучаемый вопрос. Структура РПЗ соответствует предъявляемым требованиям.

Тема ВКР актуальна, так как восстановление ресурса деталей машин и работоспособности ТИТМО в целом на предприятиях является первоочередной производственной задачей.

Применение общепринятых методик, технологий, зависимостей и ПЭВМ позволяет не сомневаться в результатах исследований.

Практические рекомендации производству носят конкретный характер и возможны к практической реализации.

Проведенная модернизация осаждения электролитического железа и создание лакирующего медного покрытия на поверхности деталей машин позволит повысить производительность осаждения и обеспечит надлежащее качество формируемых осадков.

Ошибки и недостатки содержательной части выпускной квалификационной работы:

В работе недостаточно освещены мероприятия по обеспечению безопасности жизнедеятельности при работе с предлагаемой конструкцией, а также желательно привести экономическое подтверждение обоснованности предложенных мероприятий.

Кроме того, желательно указать номенклатуру деталей TiТТМО, которые возможно восстанавливать предлагаемым способом.

В оформлении РПЗ ВКР имеются незначительные погрешности, не снижающие ценности проведенной работы.

Общее заключение о соответствии выпускной квалификационной работы требованиям ВКР установленным в ООП требованиям соответствует / частично соответствует / не соответствует (нужное подчеркнуть)

Обобщенная оценка содержательной части выпускной квалификационной работы:

Актуальность работы и полученных результатов не вызывает сомнений.

Научная новизна работы заключается в совершенствовании технологии формирования лакирующего медного покрытия на изношенных поверхностях деталей машин.

Работа носит завершенный характер, содержит в достаточном объеме всю необходимую информацию.

Информация изложена грамотно, доступно для понимания, с использованием специализированных понятий и определений, применены общепринятые, не вызывающие сомнения, методики.

Графический материал представлен слайдами презентации с необходимыми схемами, диаграммами и другой иллюстративной информацией облегчающей восприятие и понимание сути работы.

Рекомендуемая оценка выпускной квалификационной работы отлично.

Рецензент: главный инженер ООО «Автолоцман»
*Полное наименование должности и основного места работы,
ученая степень, ученое звание*

_____ \Нехорошев М.В.\

«20» июня 2017г

Сформированность компетенций у выпускника по итогам выполнения аттестационных заданий (заданий на выпускную квалификационную работу)

Задания	Компетенция	Обобщенная оценка сформированности компетенции ¹
1. Обоснование актуальности темы ВКР и анализ существующих конструкций	Способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1)	<i>высокий</i>
2. Самостоятельная работа над вопросами ВКР, проведение предварительных изысканий и исследований с целью формирования темы и направления ВКР.	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3)	<i>продвинутый</i>
3. Формулировка приоритетных целей и задач исследования ВКР. Выявление перспективной технологии восстановления деталей машин.	Способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки (ОПК-1)	<i>продвинутый</i>
4. Применение дробного многофакторного планирования эксперимента, формирования плана и поверхностей отклика, выполнение математической обработки полученных результатов исследований.	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы (ОПК-2)	<i>высокий</i>
5. Применение технологии ремонта и восстановления изношенных поверхностей деталей машин в процессе обслуживания и ремонта автомобилей.	Способность использовать на практике знание системы технического обслуживания и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и технологического оборудования (ПК-5)	<i>высокий</i>
6. Разработан технологический процесс восстановления поверхностей деталей машин, гальваническим железнением, с созданием разряджения над поверхностью зеркала электролита.	Готовность использовать передовой отраслевой, межотраслевой и зарубежный опыт при разработке производственных программ по технической эксплуатации, ремонту и сервисному обслуживанию транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта (ПК-6)	<i>высокий</i>
7. Рассчитаны рабочие режимы гальванического железнения изношенных поверхностей по предлагаемой технологии.	Способность к проведению технологических расчетов транспортного предприятия с целью определения потребности в производственно-технической базе, персонале, материалах, запасных	<i>высокий</i>

¹ Интегральная оценка сформированности компетенции определяется с учетом полноты знаний, наличия умений (навыков), владения опытом, проявления личностной готовности к проф. самосовершенствованию.

	частях и других производственных ресурсах (ПК-7)	
8. Проведение контроля качества сформированного гальванического слоя железа, определение физико-механических свойств покрытия и прочности сцепления гальванаослая с основой.	Способность к организации и проведению контроля качества технического обслуживания, ремонта и сервисного обслуживания транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта (ПК-8)	высокий
9. Восстановление ресурса изношенных деталей машин и работоспособности ТУТМО в целом. Совершенствование процесса восстановления деталей гальваническим железнением.	Способность к управлению техническим состоянием транспортных и транспортно-технологических машин, технологического и вспомогательного оборудования для их технического обслуживания и ремонта, обеспечивающим эффективность их работы на всех этапах эксплуатации (ПК-9)	высокий
10. Разработка практических рекомендаций производству в виде оптимальных режимов гальванического осаждения железа на изношенные поверхности.	Способность разрабатывать методические и нормативные материалы, а также предложения и мероприятия по внедрению в практику разработанных проектов и программ совершенствования функционирования производства и модернизации транспортных предприятий (ПК-10)	высокий
11. Исследование физико-механических свойств гальванопокрытий. Проведение необходимых инженерных расчетов конструкции.	Готовность к использованию знаний о материалах, используемых в конструкции и при эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения, и их свойств (ПК-14)	высокий
12. Применение теории изнашивания деталей машин, принципов и зависимостей корродирования поверхностей с целью совершенствования процесса восстановления изношенных поверхностей.	Готовность к использованию знаний о механизмах изнашивания, коррозии и потери прочности агрегатов, конструктивных элементов и деталей транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения (ПК-15)	высокий
13. Разработка программы и методик проведения исследований и испытаний, организация и проведение экспериментов по изучению физико-химических процессов при формировании металлопокрытий при восстановлении деталей гальваническим железнением.	Способность разрабатывать методики, планы и программы проведения научных исследований и разработок, готовить задания для исполнителей, организовывать проведение экспериментов и испытаний, анализировать и обобщать их результаты (ПК-17)	высокий

<p><i>14. Аннотация ВКР. Введение ВКР. Проведение анализа современного состояния исследуемого вопроса, существующих конструкций и методик гальванического железнения, патентный и литературный поиск.</i></p>	<p>Способность вести сбор, анализ и систематизацию информации по теме исследования, готовить научно-технические отчеты, обзоры публикаций по теме исследования (ПК-18)</p>	<p><i>высокий</i></p>
<p><i>15. Применение нормативной документации, содержащей требования к ресурсу и характеристикам восстановленных деталей машин, проведение патентного и литературного поиска необходимой информации.</i></p>	<p>Способность пользоваться основными нормативными документами отрасли, проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов техники и технологии, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации программ для электронно-вычислительных машин и баз данных на основе использования основных понятий в области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патентообладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации (ПК-21)</p>	<p><i>высокий</i></p>
<p><i>16. Обоснование выбора рационального способа восстановления изношенных поверхностей деталей TuТТМО.</i></p>	<p>Готовность использовать знания о методах принятия решений о рациональных формах поддержания и восстановления работоспособности транспортных и технологических машин и оборудования (ПК-23)</p>	<p><i>высокий</i></p>
<p><i>17. Обработка результатов многофакторных экспериментов на ПЭВМ, получение уравнений регрессии и оптимальных полей отклика.</i></p>	<p>Готовность применять аналитические и численные методы решения поставленных организационно-управленческих задач, способностью использовать языки и системы программирования для решения этих задач на основе технико-экономического анализа (ПК-25)</p>	<p><i>высокий</i></p>
<p><i>18. Литературный анализ существующих технологий ремонта и восстановления деталей машин. Перспективные технологии восстановления.</i></p>	<p>Готовность к использованию знания конструкции и элементной базы транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и применяемого при технической эксплуатации и сервисном обслуживании оборудования (ПК-30)</p>	<p><i>продвинутый</i></p>
<p><i>19. Совершенствование наиболее перспективной технологии восстановления изношенных поверх-</i></p>	<p>Готовность к использованию знания рабочих про-</p>	<p><i>продвинутый</i></p>

ностей деталей машин гальваническим железнением.	цессов, принципов и особенностей работы транспортных и транспортно-технологических машин отрасли и применяемого при технической эксплуатации и сервисном обслуживании оборудования (ПК-31)	
20. Осуществление контроля качества формируемого гальванического слоя железа на изношенных поверхностях деталей ТiТТМО.	ПК-35 готовностью к использованию знания методов контроля соблюдения технических условий на техническое обслуживание, ремонт, сборку, испытание транспортных и технологических машин и оборудования	высокий
21. Разработка методики восстановления изношенных поверхностей деталей ТiТТМО гальваническим железнением.	ПК-36 готовностью к использованию знания технологий текущего ремонта и технического обслуживания с использованием новых материалов и средств диагностики	высокий
22. Изучение существующих методик ремонта и восстановления деталей ТiТТМО, проведение анализа и планирование путей совершенствования.	ПК-38 готовностью к использованию знания технических условий и правил рациональной эксплуатации транспортной техники, причин и последствий прекращения ее работоспособности.	высокий

Уровень сформированности компетенций: высокий

