

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 531.43

doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-66-76

ИЗНОС ПАР ТРЕНИЯ ШАТУННО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ АВТОМОБИЛЯ В РЕЖИМЕ МАСЛЯНОГО ГОЛОДАНИЯ

Александр Олегович Горленко^{1✉}, Анна Павловна Ващишина², Сергей Петрович Шец³,
Тимофей Игоревич Осипов⁴

^{1,2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ bugi12@bk.ru

² vashhi.anya@yandex.ru

³ shetssp@mail.ru

⁴ bcnate@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрена шатунно-поршневая группа двигателя автомобиля, в частности, коренные и шатунные шейки. Показано, что в режиме масляного голодания коренные и шатунные шейки подвергаются износу и приводят к неисправности и остановке двигателя. Установлено, что масляное голодание возникло в следствии несоответствия материала изготовления и твердости третьих шеек остальным третьем шатунном подшипнике. Показано, что причиной аварийного износа деталей третьего шатунного подшипника (вкладышей и ша-

тунной шейки) являются дефекты изготовления коленчатого вала, связанные с использованием некачественного конструкционного материала с неоднородной структурой (с неметаллическими включениями), а также несоблюдения технологии изготовления коленчатого вала (технологии поверхностного упрочнения – закалки ТВЧ).

Ключевые слова: износ, шатунно-поршневая группа, подшипник, масляное голодание, шейка, трение, нагрузка.

Ссылка для цитирования:

Горленко А.О. Износ пар трения шатунно-поршневой группы автомобиля в режиме масляного голодания / А.О. Горленко, А.П. Ващишина, С.П. Шец, Т.И. Осипов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 8. – С.66-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-66-76.

Original article

Open Access Article

WEAR OF THE CONNECTING ROD-PISTON FRICTION PAIRS OF THE CAR IN OIL STARVATION MODE

Aleksandr Olegovich Gorlenko^{1✉}, Anna Pavlovna Vashchishina², Sergey Petrovich Shets³,
Timofey Igorevich Osipov⁴

^{1,2,3,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ bugi12@bk.ru

² vashhi.anya@yandex.ru

³ shetssp@mail.ru

⁴ bcnate@mail.ru

Abstract

The paper considers the connecting rod-piston group of a car engine, in particular, the conical and connecting rod necks. It is shown that in the oil starvation mode, the crankshaft and connecting rod necks are subject to wear and lead to engine malfunction and shutdown. It is found that oil starvation occurred as a result of the discrepancy between the manufacture material and the hardness of the third necks in the third

connecting rod bearing. It is shown that the cause of the accidental wear of the parts of the third connecting rod bearing (inserts and connecting rod neck) are defects in the manufacture of the crankshaft associated with the use of poor-quality structural material with an inhomogeneous structure (with non-metallic inclusions), as well as non-compliance with the manufactur-

Reference for citing:

Gorlenko AO, Vashchinina AP, Shets SP, Osipov TI. Wear of the connecting rod-piston friction pairs of the car in oil starvation mode. *Transport Engineering*. 2025;8:66-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-66-76.

Введение

Коленчатый вал двигателя воспринимает ударные динамические нагрузки, силы трения, неуравновешенные силы и моменты, крутильные колебания и вибрации, высокие температуры, статические нагрузки от сопрягаемых деталей. Ресурс коленчатого вала характеризуется двумя показателями: усталостной прочностью и износостойкостью [1]. Один из важнейших факторов, определяющих работоспособность подшипника скольжения – это материалы, из которых изготовлены его элементы. Наилучшее сочетание материалов следующее: «твердая» рабочая поверхность шейки вала и «мягкая» рабочая поверхность вкладыша. Такое сочетание материалов снижает риск возникновения задиров, если вдруг возникнет контакт поверхностей (подобное возможно при запуске двигателя, когда масло еще не успевает поступить к подшипникам) [2, 3].

Детали, образующие подшипник скольжения должны иметь правильную геометрическую форму, при которой между ними обеспечивается определенный зазор (обычно 0,03...0,08 мм), а также гладкую поверхность [4]. Увеличение зазора влечет за собой падение давления в системе смазки и ухудшение охлаждения подшипника. Дальнейшая эксплуатация двигателя с таким подшипником приводит к лавинообразному росту зазора за счет ударных нагрузок, сопровождаемых сильным нагревом, плавлением материала вкладыша и износом шейки вала [5]. Последние, заключительные стадии этого процесса – проворачивание вкладышей и «выбрасывание» их остатков в поддон картера с неизбежным повреждением поверхности постели.

Шатунные подшипники коленчатого вала ДВС относятся к нестационарно нагруженным подшипникам скольжения и являются наиболее ответственными подвижными трибосопряжениями, которые в значительной степени определяют ресурс современных автомобильных двигателей

[6, 7]. Характер повреждения шейки коленчатого вала, нижней головки шатуна цилиндра и шатунных вкладышей свидетельствует об их работе в режиме «масляного голодания» [8].

В нормальных условиях работы подшипников скольжения масло под давлением полностью заполняет зазор между валом и вкладышем, однако под действием нагрузки вал смещается от оси подшипника ближе к одной стороне [9]. При этом за счет сужения зазора и вращения вала масло затягивается в зазор и полностью разделяет поверхности, препятствуя их непосредственному соприкосновению.

Решающее значение для процесса образования смазки оказывает подъемная сила F_r , которая пропорциональна угловой скорости вращения вала и вязкости смазочного материала, но обратно пропорционально радиальному зазору Δ :

$$F_r = C_F \mu \omega l d^3 / \Delta^2,$$

где C_F – коэффициент нагруженности подшипника (число Зоммерфельда); μ – динамическая вязкость смазки; ω – угловая скорость вращения вала; l – длина вкладыша; d – диаметр вала; Δ – радиальный зазор подшипника.

Таким образом, общая картина процесса смазки шатунного подшипника характеризуется определенными значениями вязкости смазочного материала, нагрузок, давления и подачи масла в зону трения.

При определенных условиях (большая нагрузка и/или малое давление подачи масла) произойдет контакт сопрягаемых поверхностей по микронеровностям – так называемый режим полужидкостного трения. Однако это еще не приводит к разрушению подшипника, если контакт деталей происходит кратковременно, по относительно небольшой поверхности, а температура на поверхности вкладыша невысока.

Режим «масляного голодания» в подшипниках скольжения возникает:

1. При полном прекращении подачи масла.

Если подача масла полностью прекращается, то происходит быстрый, и чрезвычайно сильный разогрев подшипника от трения и отсутствия отвода тепла. Вкладыши начинают плавиться, их рабочий слой быстро разрушается, при этом происходит перенос материала вкладыша на шейку вала. Описанный процесс обычно занимает сравнительно короткое время – несколько десятков километров пробега автомобиля. Поверхность шейки и примыкающих к ней противовесов коленчатого вала в этом случае подвергаются нагреву до очень высокой температуры (свыше 600...700 °C), с последующим медленным охлаждением после остановки двигателя. Кроме того, в смазочном отверстии шейки, а также на противовесах вала вблизи нее обычно отсутствует нагар и следы коксования масла. Одним из основных признаков полного прекращения подачи масла является значительное повреждение всех без исключения вкладышей при этом на нескольких подшипниках износ, и перегрев может быть несколько меньше, однако все равно он значителен.

2. При недостаточной подаче масла к трущимся поверхностям подшипника.

В этом случае при заданной нагрузке масляная пленка становится тоньше, ее несущая способность снижается. Помимо этого, уменьшение подачи масла в подшипник приводит к ухудшению отвода тепла и повышению температуры масла и самого подшипника, что еще больше уменьшает толщину пленки и вызывает сильный разогрев подшипника от трения непосредственно контактирующих деталей – вкладыша и шейки коленчатого вала.

Дальнейшее уменьшение подачи масла (и/или рост нагрузки на вал) вызывает расширение зон соприкосновения деталей и дальнейший разогрев их поверхностей, что приведет к интенсификации процесса микрорезания, сопровождаемого силами молекулярного сцепления и при работе подшипника будет происходить молекулярно-механическое взаимодействие поверхностей трения скольжения.

Молекулярная составляющая силы трения обусловлена адгезионным взаимодействием контактирующих поверхностей на фактически пластических и срезаемых площадках контакта и сопровождается максимальной величиной износа.

Механическая составляющая силы трения обусловлена возникновением упругих, пластических деформаций некоторых встречающихся микронеровностей и срезом наибольших по величине выступов шероховатости, находящихся на вершинах волн и макроотклонений. Вследствие такого характера взаимодействия разрушается часть выступов шероховатости, причём отдельные выступы деформируются пластично, с образованием усталостных трещин, характерных для малоциклового усталостного разрушения, а некоторые выступы деформируются упруго.

В результате такого взаимодействия контактирующие поверхности подшипника претерпевают пластические деформации и микрорезание, сопровождающиеся наволакиванием металла с одной поверхности на другую и антифрикционный слой повреждается. После этого подшипник начнет работать в режиме граничного трения, сопровождающимся плавлением рабочего слоя вкладыша. Одновременно с этим под действием внешней нагрузки расплавленный антифрикционный материал вкладыша начнет выжиматься к краям вкладыша, после чего начнется непосредственный контакт шейки вала со стальной основой вкладыша. Подшипник, получивший такие значительные повреждения, резко меняет режим работы, даже если подача масла будет восстановлена до нормального уровня. За счет значительного уменьшения толщины антифрикционного материала вкладыша резко увеличивается рабочий зазор между вкладышем и шейкой вала – с 0,05 мм до 0,2...0,5 мм и более. При таком большом зазоре масло не может заполнить все пространство в зазоре между шатунной шейкой и вкладышами и сохраняться там в течение всего времени работы. Вследствие того, что нагрузка на вал со стороны шатуна носит знакопеременный характер масляный клин в подшипнике, работающем с чрезмерно большим за-

зором, разрушается и в результате контакта шейки вала со стальной основой вкладыша

Материалы и методы

Измерение геометрических размеров элементов коленчатого вала проводились с использованием установки ПБМ–500, микрометра гладкого цифрового МКЦ 25–50; микрометра гладкого цифрового МКЦ 50–75, индикатора ИЧ–10. Химический анализ материала коленчатого вала проверялся спектральным методом, на приборе

Результаты и обсуждение

При осмотре вкладышей коренных подшипников коленчатого вала на вкладыше третьей коренной шейки в средней части обнаружены следы аварийного изнашивания в виде кольцевой риски (рис. 1).



Рис. 1. Вкладыш коренного подшипника
Fig. 1. Main bearing insert

При осмотре деталей шатунно-поршневых групп исследуемого двигателя обнаружено, что вкладыши третьего шатунного подшипника провернуло в нижней головке шатуна. Визуальным осмотром коленчатого вала исследуемого двигателя

дыша износ приобретает катастрофически быстрый характер.

SPECKTROMAX. Твердость на фрагментах шеек промерялась по поверхности и в поперечном сечении шеек на твердомере Роквелл типа ТК–2. Микроструктура образцов исследовалась на поперечных микрошлифах на металлографическом микроскопе «Axiovert 40MAT», при 100–кратном и 500–кратном увеличении.

обнаружено, что третья шатунная шейка критически изношена (рис. 2).

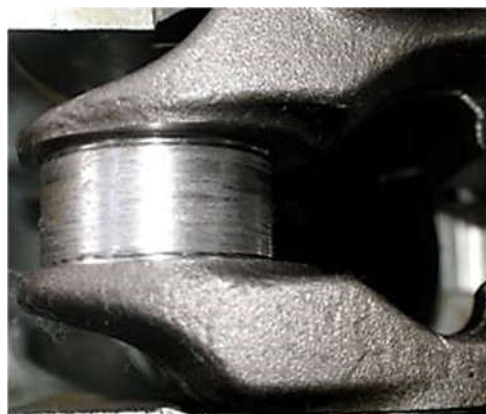


Рис. 2. Шатунная шейка
Fig. 2. Connecting rod neck

В ходе исследования были проведены измерения диаметров коренных и шатунных шеек, биения коленчатого вала. Измерения производились в соответствии со схемой измерений (рис. 3), результаты измерений приведены в табл. 1, 2.

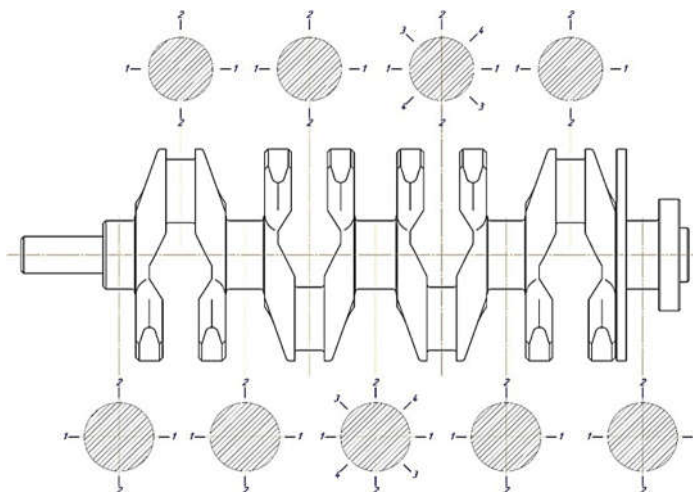


Рис. 3. Схема измерений коленчатого вала
Fig. 3. Crankshaft measurement circuit

Таблица 1

Размеры коренных шеек

Table 1

Dimensions of crankshaft necks

Сечение	1-я коренная	2-я коренная	3-я коренная	4-я коренная	5-я коренная	Допуск
Сечение 1 – 1	51,948	51,948	51,944	51,944	51,949	51,942 – 51,960
	51,947	51,947	51,942	51,945	51,944	
	–	–	51,941	–	–	
Сечение 2 – 2	51,946	51,945	51,937	51,943	51,947	
	51,943	51,945	51,937	51,943	51,946	
	–	–	51,944	–	–	
Сечение 3 – 3	–	–	51,934	–	–	
Сечение 4 – 4	–	–	51,936	–	–	

Таблица 2

Размеры шатунных шеек

Table 2

Dimensions of crankpins

Сечение	1-я шатунная	2-я шатунная	3-я шатунная	4-я шатунная	Допуск
Сечение 1 – 1	47,954	47,950	48,034	47,960	51,954 – 47,972
	–	–	48,035	–	
	–	–	48,035	–	
Сечение 2 – 2	47,951	47,954	47,869	47,959	
	–	–	47,863	–	
	–	–	47,857	–	
Сечение 3 – 3	–	–	47,935	–	
	–	–	47,925	–	
	–	–	47,825	–	
Сечение 4 – 4	–	–	47,869	–	
	–	–	47,861	–	
	–	–	47,907	–	

Биение коленчатого вала составило 0,21 мм. Таким образом, результаты осмотра обследованных деталей и узлов (сборочных единиц) двигателя автомобиля свидетельствуют об аварийном износе деталей третьего коренного подшипника и всех шатунных подшипников. При этом максимальные повреждения получили третья шатунная шейка и шатунные вкладыши третьего шатунного подшипника.

Характер повреждения третьей шейки коленчатого вала, нижней головки шатуна

третьего цилиндра и шатунных вкладышей свидетельствует о том, что в двигателе имел место так называемый режим локального «масляного голодания», при котором подача масла к поврежденному шатунному подшипнику (сопряжению «шатунные вкладыши – шатунная шейка») была недостаточной для обеспечения его нормальной работы.

Результаты химического анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав материала исследуемого коленчатого вала

Table 3

Chemical composition of the material of the crankshaft under study

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	Al, %
0,403	0,68	1,40	0,018	0,024	0,270	0,066	0,102	0,013
Mo, %	V, %	Ti, %	Nb, %	Co, %	W, %	Pb, %	B, %	Sn, %
0,022	0,120	0,013	0,0042	0,0049	<0,0010	0,012	0,0009	0,017
Zn, %	As, %	Bi, %	Ca, %	Ce, %	Zr, %	La, %	Fe, %	
<0,0020	0,011	<0,0020	0,0003	<0,0030	0,0029	<0,0010	96,6	

По химическому составу материал коленчатого вала наиболее близок к отечественной стали 40Г2 ГОСТ4543–2016 (с отклонением по кремнию).

Зарубежные аналоги стали 40Г2: США – 1141, 1340, 1541, 1541H, G11410, G13400, G15410, H13400, H15410; Япония – SMn2, SMn438, SMn438H; Китай – 40Mn2.

Необходимо отметить, что данная марка стали относится к классу конструкционных легированных сталей и используется в машиностроении для изготовления деталей – коленчатых и карданные валов, распределительных валов, осей, поршневых пальцев, полуосей, рычагов и других изделий. Результаты замеров твердости представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты замеров твердости

Table 4

Hardness measurement results

Наименование образца	Твердость HRC	
	на поверхности	в сечении
Фрагмент первой коренной шейки (образец №1)	51 – 53	29 – 30
Фрагмент второй коренной шейки (образец №2)	50 – 52	28 – 30
Фрагмент второй шатунной шейки (образец №3)	52 – 54	28 – 30
Фрагмент третьей шатунной шейки (образец №4)	37 – 39	27 – 29

Значения твердости в диапазоне HRC 50...54 свидетельствуют о наличии поверхностного упрочнения, при этом в сечении материал имеет твердость характерную для объемной термообработки данной стали.

Для исследования микроструктуры и изготовления микрошлифов из представленных образцов были вырезаны фрагменты. На микрошлифах образцов наблюда-

ются слои закалки ТВЧ. Глубина слоя закалки ТВЧ замерялась на поперечных микрошлифах и составляет около 2,80 мм для коренных шеек (в исследуемом сечении) и примерно 1,95 мм (в исследуемом сечении) – для шатунных шеек. Микроструктура слоя закалки ТВЧ первой коренной шейки – троостомартенсит (рис. 4), качество закалки – удовлетворительное.



Рис. 4. Микроструктура первой коренной шейки
Fig. 4. Microstructure of the first crankshaft neck

Микроструктура слоя закалки ТВЧ третьей коренной шейки – троостомартенсит (рис. 5). Белая стрелка на рис. 5 указывает на место расположения кольцевой риски на поверхности коренной шейки 2. Дефект в

сечении не идентифицируется, каких-либо изменений в микроструктуре также не наблюдается, что свидетельствует о незначительной глубине риски. Микроструктура равномерная. Качество закалки ТВЧ удо-

влетворительное. Микроструктура слоя закали ТВЧ второй шатунной шейки – троостит (рис. 6). Микроструктура равномерная. Микроструктура слоя закали ТВЧ

третьей шатунной шейки – троостит сорбитообразный с участками выделений феррита (рис. 7).

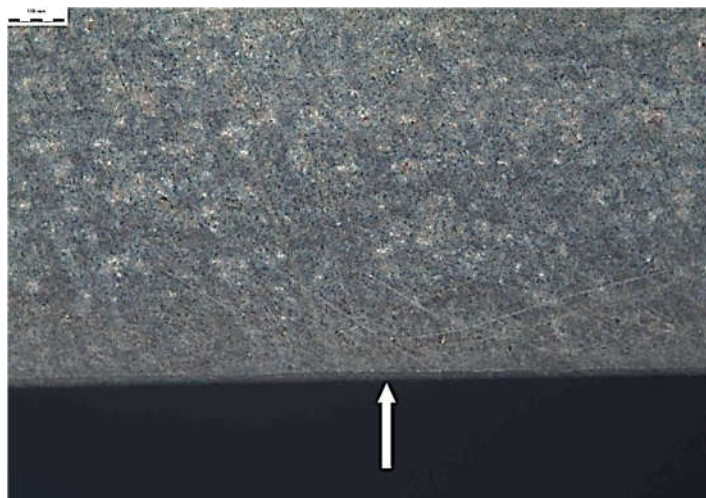


Рис. 5. Микроструктура третей коренной шейки
Fig. 5. Microstructure of the third crankshaft neck



Рис. 6. Микроструктура второй шатунной шейки
Fig. 6. Microstructure of the second crankpin



Рис. 7. Микроструктура третей шатунной шейки
Fig. 7. Microstructure of the third crankpin

Микроструктура неравномерная. Качество закалки ТВЧ не удовлетворительное и подтверждается замерами твердости по поверхности данного образца (табл. 4).

В микроструктурах закаленного ТВЧ слоя второй и третьей шатунных шеек наблюдаются неметаллические

включения (в виде вытянутых в направленииковки «прожилок» серого цвета – наиболее крупные из них показаны белыми стрелками). Неметаллические включения расположены скоплениями и одиночно, размер включений не более 0,07 мм.

Результаты

Таким образом, результаты металлургического исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Коленчатый вал исследуемого двигателя изготовлен из легированной конструкционной стали, отечественным аналогом которой является сталь 40Г2 ГОСТ 4543-2016.

2. Замеры твердости рабочих поверхностей и сердцевины шеек, а также исследование микроструктуры поперечных шлифов свидетельствует о поверхностном упрочнении – закалке токами высокой частоты (ТВЧ). Качество поверхностного упрочнения удовлетворительное, за исключением третьей шатунной шейки, где твердость на рабочей поверхности сильно занижена.

3. Сравнительный анализ поверхностной твердости, микроструктуры, конфигурации и толщины слоев закалки ТВЧ свидетельствует о том, что на третьей шатунной шейке закалка ТВЧ была произведена некачественно.

4. Неметаллические включения в материале коленчатого вала, обнаруженные при исследовании микроструктуры поперечных шлифов, вырезанных из второй и третьей шатунных шеек, свидетельствуют о структурной неоднородности материала и могли интенсифицировать процесс изнашивания пары трения «шатунная шейка – шатунные вкладыши».

5. Некачественная термообработка и структурная неоднородность материала третьей шатунной шейки, способствовали поверхностному разрушению и аварийному износу данной шатунной шейки.

Таким образом, повреждения деталей третьего шатунного подшипника (шатунных вкладышей и шатунной шей-

ки) могли быть вызваны дефектами их изготовления: несоответствием размеров, формы и расположения сопрягаемых деталей; использования некачественных конструкционных материалов, а также несоблюдения технологии их изготовления и сборки.

Известно, что при определенных условиях рабочий слой вкладыша и шатунной шейки подвергается усталостному разрушению, при котором происходит выкрашивание частиц материала с образованием на рабочих поверхностях дефектов в виде глубоких раковин.

Разрушение контактирующих поверхностей вкладыша и шейки в этом случае, вызывает их ускоренный износ, локальный перегрев в зоне непосредственного контакта деталей и образование на шейке следов внедрившегося материала вкладыша, а также темных полос перегрева. В этом случае процесс разрушения подшипника в начальный период носит довольно медленный характер, однако, далее за счет расширения зоны повреждений происходит уменьшение опорной поверхности вкладыша и для нормальной работы которого (без непосредственного контакта деталей) требуется все большее давление, подача и вязкость масла. В определенный момент нормальной подачи масла оказывается недостаточно, чтобы скомпенсировать чрезмерно возросшие удельные нагрузки, возникает режим «масляного голодания», и подшипник переходит в режим работы с непосредственным соприкосновением трущихся деталей. После этого начинается интенсивный износ вкладышей, пока зазор в подшипнике не выходит за допустимые пределы. Наступление режима «масляного голодания» в данном случае

может явиться следствием разрушения части рабочего слоя вкладыша, однако дальнейший ускоренный износ вкладышей происходит уже вследствие наступления этого режима и занимает гораздо меньшее время.

Результаты проведенного исследования не свидетельствуют об общем «масляном голодании» исследуемого

Выводы

Результаты визуального осмотра исследуемого коленчатого вала, вкладышей коренных и шатунных подшипников, измерения диаметров коренных и шатунных шеек, а также проведенного металловедческого исследования не свидетельствуют о несоответствии размеров, формы и расположения сопрягаемых деталей подшипников скольжения требованиям нормативно-технической документации, а также о дефектах сборки двигателя.

Таким образом, причиной аварийного износа деталей третьего шатунного подшипника (вкладышей и шатунной шейки) являются дефекты изготовления коленчатого вала, связанные с использованием некачественного конструкционного материала с неоднородной структурой (с неметаллическими включениями), а также несоблюдения технологии изготовления коленчатого вала (технологии поверхностного упрочнения – закалки ТВЧ).

Указанные обстоятельства позволяют установить механизм отказа исследуемого двигателя, который заключался в следующем. На начальном этапе эксплуатации автомобиля зазоры во всех коренных и шатунных подшипниках скольжения соответствовали нормативным значениям, и какое-то время все подшипники скольжения работали нормальных условиях. Однако, в связи с тем, что не было обеспечено требуемое каче-

двигателя, вызванном прекращением подачи моторного масла ко всем узлам трения скольжения. Таким образом, можно утверждать, что возникновение обнаруженных повреждений третьей коренной шейки, третьей шатунной шейки и шатунных подшипников исследуемого двигателя вызвано их работой в режиме локального «масляного голодания».

ство рабочей поверхности третьей шатунной шейки, интенсивность ее изнашивания по сравнению с другими шейками увеличилась. Изнашивание шатунной шейки привело к увеличению зазора между трущимися деталями данного шатунного подшипника, но при этом подшипник еще сохранял свою работоспособность. При дальнейшей работе двигателя зазор в третьем шатунном подшипнике достиг своего предельного значения, и процесс изнашивания пары трения приобрел аварийный характер. Аварийный износ третьего шатунного подшипника привел к падению давления масла в подшипнике и росту температуры в нем. Одновременно с этим ухудшились условия работы третьего коренного подшипника, а также первого, второго и четвертого шатунных подшипников, так как увеличились утечки масла через третий шатунный подшипник. При дальнейшей работе двигателя в этих условиях произошло проворачивание вкладышей третьего шатунного подшипника, аварийный износ третьей коренной шейки, образовались механические повреждения на рабочих поверхностях вкладышей третьего коренного подшипника в виде кольцевой риски, а также были изношены антифрикционный слой вкладышей первого, второго и четвертого шатунных подшипников, после чего произошел останов двигателя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование коленчатого вала дизельного двигателя ЯМЗ-238Д1, отказавшего в процессе эксплуатации / Е. В. Лукашова, А. П. Ващишина, М. Г. Шалыгин, Т. И. Осипов //

- Транспортное машиностроение. 2025. № 5(41). С. 32-38.
2. Шалыгин, М. Г. Исследование физико-химических и противоизносных свойств мо-

торных масел по завершении процесса эксплуатации / М. Г. Шалыгин, С. П. Ващишин, А. П. Ващишина // Транспортное машиностроение. 2024. № 3(27). С. 12-19.

3. Шец С.П. К вопросу повышения долговечности подшипников скольжения автомобильных двигателей. Актуальные проблемы трибологии.: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. г. Самара, июнь. 2007 г./ С.П. Шец. М.: Машиностроение, 2007. Т-2. С. 488-501.
4. Мадорский, Л.В. Диагностирование технического состояния машин по внешним признакам: учеб. пособие / Л.В. Мадорский. Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2003. 108 с.
5. Методика прогнозирования долговечности подшипников качения и оптимальный выбор смазочных материалов в условиях обильной смазки и масляного голодания / Н. Ф. Дмитриченко, А. А. Миланенко, А. А. Глухонец, К. Н. Миняйло // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 2. С. 114-120.

6. Шец С.П. Изнашивание нестационарно нагруженных радиальных подшипников скольжения/ С.П. Шец. Брянск.: Брянск ГТУ. №1.(13), 2007. С. 13–19.
7. Хрулев, А. Э. Методика определения причины неисправности ДВС при тяжелых эксплуатационных повреждениях / А. Э. Хрулев, Ю. В. Кочуренко // Двигатели внутреннего сгорания. 2017. № 1. С. 52-60.
8. Разговоров, К. И. Методика определения причин масляного голодания бензиновых двигателей легковых автомобилей / К. И. Разговоров // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 30. С. 77-80.
9. Шец С.П., Горленко А.О., Шалыгин М.Г. Повышение эффективности образования гидродинамической смазки в подшипниках скольжения применением магнитной жидкости // Строительные и дорожные машины. 2023. № 5. С. 27-31.

REFERENCES

1. Lukashova EV, Vashchinina AP, Shalygin MG, Osipov TI. Study of the crankshaft of YaMZ-238D1 diesel engine that failed during operation. Transport Engineering. 2025;5: 32-38.
2. Shalygin MG, Vashchinin SP, Vashchinina AP. Study of physico-chemical and anti-wear properties of motor oils at the end of operation. Transport Engineering. 2024;3: 12-19.
3. Shets SP. On the issue of increasing the durability of sliding bearings in automobile engines. Collection of Papers of International Scientific and Technical Conference, June, 2007: Actual Problems of Tribology; Moscow: Mashinostroenie; 2007.
4. Madorsky LV. Diagnosis of the technical condition of machines by external signs: textbook. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2003.
5. Dmitrichenko NF, Milanenko AA, Glukhonets AA, Minyailo KN. Method for predicting the durability of rolling bearings and the optimal choice

of lubricants in conditions of abundant lubrication and oil starvation. Friction and Wear. 2017;38(2):114-120.

6. Shets SP. Wear of unsteadily loaded radial sliding bearings. Bryansk.: Bryansk State Technical University. 2007;1(13):13-19.
7. Khrulev AE, Kochurenko YuV. Method for determining the causes of internal combustion engine malfunction in case of severe operational damage. Internal Combustion Engines. 2017;1:52-60.
8. Razgovorov KI. Method for determining the causes of oil starvation in gasoline engines of passenger cars. Novie Materiali I Tekhnologii v Mashinostroenii. 2019;30:77-80.
9. Shets SP, Gorlenko AO, Shalygin MG. Increasing the efficiency of hydrodynamic lubrication formation in sliding bearings using magnetic fluid. Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny. 2023;5:27-31.

Информация об авторах:

Горленко Александр Олегович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. 84832588212.

Ващишина Анна Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, тел. 84832588212.

Шец Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. 84832588212.

Осипов Тимофей Игоревич – аспирант кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, тел. 84832588212.

Gorlenko Aleksandr Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: 84832588212.

Vashchishina Anna Pavlovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems, Bryansk State Technical University, phone: 84832588212.

Shets Sergey Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: 84832588212.

Osipov Timofey Igorevich – Postgraduate Student of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University, phone: 84832588212.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 28.07.2025. Рецензент – Тихомиров П.В., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортно-технологических машин и сервиса» Брянского государственного инженерно-технологического университета.

The article was submitted to the editorial office on 14.07.2025; approved after review on 15.07.2025; accepted for publication on 28.07.2025. The reviewer is Tikhomirov P.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Transport and Technological Machines and Services at the Bryansk State Engineering and Technology University.