

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 539.62+621.81

doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-32-38

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ-238Д1, ОТКАЗАВШЕГО В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Елена Витальевна Лукашова^{1✉}, Анна Павловна Ващишина², Михаил Геннадьевич Шалыгин³, Тимофей Игоревич Осипов⁴

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

¹ leno4kachepikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2236-728X>

² vashhi.anya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1930-3912>

³ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

⁴ bcinate@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9777-6695>

Аннотация

Представлен анализ механических и микроструктурных свойств фрагмента коленчатого вала дизельного двигателя ЯМЗ-238Д1. Исследование проводилось для коренной шейки коленчатого вала, так как данного рода узлы больше всего изнашивается входе эксплуатации двигателя. В работе использовались материаловедческие методы, включая оптическую электронную микроскопию, для изучения микроструктуры материала, а также замеры твердости рабочих поверхностей. В результате было получено, что средняя твердость на рабочей поверхности третьей коренной шейки – 55...57 HRC; в сердцевине третьей коренной шейки

– 178...185 НВ. Результаты оптической электронной микроскопии показали наличие упрочненного слоя толщиной около 4,5...4,7 мм с мартенситной структурой с плавным переходом в феррито-перлитную микроструктуру сердцевины. Установлено, что дефектов металлургического характера в материале образца не имеется и качество поверхностного упрочнения удовлетворительное. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения технологических процессов и повышения надежности двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: двигатель, коленчатый вал, коренная шейка, исследование, износ.

Ссылка для цитирования:

Лукашова Е.В. 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. – С. 32-38. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-32-38.

Original article

Open Access Article

STUDY OF THE CRANKSHAFT OF YAMZ-238D1 DIESEL ENGINE THAT FAILED DURING OPERATION

Elena Vitalyevna Lukashova^{1✉}, Anna Pavlovna Vashchishina², Mikhail Gennadyevich Shalygin³, Timofey Igorevich Osipov⁴

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

¹ leno4kachepikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2236-728X>

² vashhi.anya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1930-3912>

³ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

⁴ bcinate@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9777-6695>

Abstract

Mechanical and microstructural properties of the crankshaft fragment of YaMZ-238D1 diesel engine are analyzed. The root neck of the crankshaft was studied, since this type of assembly wears out the most

during engine operation. The work used materials science methods, including optical electron microscopy to study the microstructure of the material, as well as measurements of the hardness of the working surfaces.

As a result, it was found that the average hardness on the working surface of the third root neck is 55...57 HRC; in the core of the third root neck – 178...185 HB. The results of optical electron microscopy showed the presence of a hardened layer about 4.5...4.7 mm thick with a martensitic structure with a smooth transition to the ferrite-pearlite microstructure of the core. It is

Reference for citing:

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. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-32-38.

Введение

Коленчатый вал является одним из ключевых компонентов любого поршневого двигателя внутреннего сгорания, включая дизельные двигатели, такие как ЯМЗ-238Д1. Он преобразует линейное движение поршней во вращательное, обеспечивая работу двигателя. Коленчатый вал состоит из стержня и двух или более плеч, соединённых между собой. Он поддерживается подшипниками, которые позволяют ему свободно вращаться. В процессе работы двигателя коленчатый вал испытывает значительные механические нагрузки, включая крутящий момент, изгибающие и осевые силы. Эти нагрузки могут привести к различным неисправностям. К одним из основных неисправностей относится износ коренных шеек коленчатого вала. Этот процесс может быть вызван недостатком смазки, использованием некачественного масла, а также загрязнением масляной системы [1, 2]. Износ приводит к увеличению зазоров между валом и подшипниками, что ухудшает работу двигателя и может привести к его серьёзной поломке [3, 4].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран коленчатый вал дизельного двигателя ЯМЗ-238Д1 №G0600874.

При визуальном обследовании коленчатого вала, демонтированного с исследуемого двигателя, пробывшего в эксплуатации около одного года, установлено:

– на уплотняющей шейке носка коленчатого вала имеются механическое повреждение в виде следа естественного изнашивания рабочей поверхности уплотняющей шейки носка коленчатого вала в месте контакта с ней уплотняющей кромки

found out that there are no metallurgical defects in the sample material and the quality of surface hardening is satisfactory. The results of the study can be used to improve technological processes and increase the reliability of internal combustion engines.

Keywords: engine, crankshaft, root neck, research, wear.

Для увеличения срока службы необходимо снизить износ коренных шеек, тем самым повысив качество и долговечность коленчатого вала. Во многом решение данной задачи зависит от применения материалов для их изготовления, а также от механической обработки данных узлов. Материалы, из которых изготавливаются коленчатые валы, должны обладать сочетанием прочности, устойчивости к усталости и стойкости к коррозии. В связи с чем актуальной является задача в изучении материала коленчатого вала, находящегося в жестких эксплуатационных условиях, (высокие механические нагрузки и контакт с агрессивной средой) при работе дизельного двигателя ЯМЗ-238Д1 [5].

В данной статье представлены результаты исследования фрагмента коленчатого вала, бывшего в эксплуатации и вышедшего из строя, а также на основе механических и физико-химических свойств вала установлены причины его отказа [6].

переднего сальника коленчатого вала в виде кольцеобразной канавки (бороздки);

– коленчатый вал подвергался ремонтным воздействиям: очистке внутренних полостей в шатунных шейках, предназначенных для дополнительной центробежной очистки моторного масла, о чем свидетельствуют следы установки новых заглушек этих полостей и их повторной фиксации (кернения) для предотвращения их самопроизвольного выпрессовывания под давлением масла; дополнительной фиксации винтов крепления противовесов

к щекам кривошипов коленчатого вала электродуговой сваркой.

Металлографические исследования проведены на кафедре «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета. Металлография фрагмента коленчатого вала проводилась в следующей последовательности:

1. Проведено измерение твердости на рабочей поверхности третьей коренной шейки и в сердцевине второй шатунной шейки в фрагменте коленчатого вала, переданного для дальнейших лабораторных исследований.

2. Подготовлен дополнительный образец из поперечного среза третьей коренной шейки для проведения его металловедческого исследования.

3. Проведено металловедческое исследование дополнительного образца из поперечного среза третьей коренной шейки.

Металлографическое исследование производилось на цифровом микроскопе Axivert-40MAT, при увеличениях $\times 100$ и $\times 1000$, указанных в ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры». Химический состав материала шейки коленчатого вала исследуемого двигателя определялся спектральным методом на приборе Искролайн. Данный прибор предназначен для проведения быстрого и точного спектрального анализа металлов и сплавов с различными основами, такими как железо (Fe), алюминий (Al), медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb), олово (Sn), сурьма (Sb), никель (Ni), титан (Ti), кобальт (Co), магний (Mg). Он обеспечивает доступ ко всем спектральным линиям в диапазоне от

167 до 460 нм, включая линии фосфора, серы и углерода, с разрешением от 0,02 до 0,03 нм. Спектрометр Искролайн 100 позволяет проводить анализ состава металлов и сплавов, включая в каждый режим работы собственную методику измерения и первичную подготовку образцов. Принцип работы спектрометра основан на методе эмиссионного анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе.

Твердость на рабочей поверхности третьей коренной шейки в исследуемом фрагменте коленчатого вала замерялась на рабочей поверхности и в сердцевине поперечного сечения третьей коренной шейки.

Замеры производились портативным твердомером ТКМ–459С, который предназначен для измерения твердости материалов по шкале Роквелла, что позволяет быстро и точно оценивать механические свойства различных металлов и сплавов. Он имеет компактные размеры и легкий вес, что делает его удобным для использования в полевых условиях и на производственных площадках.

Для проведения металлографического исследования были проведены необходимые мероприятия по подготовке дополнительного образца для исследования: из фрагмента коленчатого вала, переданного для исследования, была вырезана третья коренная шейка, после чего из нее был вырезан еще один фрагмент (рис. 1).

Далее при подготовке образца для металловедческого исследования фрагмент, вырезанный из третьей коренной шейки, был дополнительно разрезан на две части (рис. 1б).



Рис. 1. Вырезанные фрагменты коленчатого вала:

а – третья коренная шейка; б – фрагмент, вырезанный из третьей коренной шейки

Fig. 1. Cut-out fragments of the crankshaft:

a – the third root neck; b – a fragment cut from the third root neck

Для проведения металлографического исследования был подготовлен микрошлиф. Для этого в продольном сечении исследуемого фрагмента коренной шейки проводилось шлифование и полирование необходимой для исследования площади.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных измерений установлено, что средняя твердость составила: на рабочей поверхности третьей коренной шейки – 55...57 HRC; в сердцевине третьей коренной шейки – 178...185 НВ.

В процессе металловедческого исследования образца, вырезанного из третьей коренной шейки проводился его визуальный осмотр, металлографическое исследование и определялся химический состав материала.

При визуальном осмотре микрошлифа, на наружной поверхности коренной шейки выявлен упрочненный, представляющий собой слой закалки токами высо-

Затем в соответствии с ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры» для выявления микроструктуры осуществлено ее травление в 4 %-ом спиртовом растворе HNO_3 .

кой частоты (ТВЧ), толщиной примерно 5,0 мм (визуально). Данный слой распространяется на большую часть рабочей поверхности шейки по ее длине, при этом толщина слоя плавно снижается до 0 мм к краям шейки. Дальнейшее металлографическое исследование производилось на цифровом микроскопе *Axiovert-40MAT*, при увеличениях $\times 100$ и $\times 1000$.

Для подтверждения закалки поверхностного слоя третьей коренной шейки ТВЧ исследовалась микроструктура упрочненного слоя при увеличении $\times 1000$ (рис. 2).

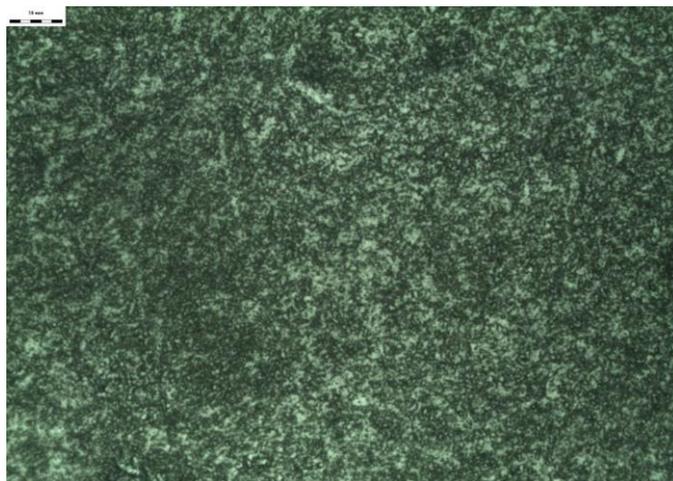


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя при увеличении $\times 1000$
Fig. 2. Microstructure of the hardened layer magnified $\times 1000$

Микроструктура упрочненного слоя равномерная, однородная – мелкоигльчатый мартенсит, что видно из рис. 2. Толщина слоя составляет около 4,5...4,7 мм.

Микроструктура переходного слоя при увеличении $\times 100$ показана на рис. 3.

Плавный переход от мелкоигльчатого мартенсита к феррито-перлитной структуре сердцевины коренной шейки, представлен на рис. 3.

Микроструктура сердцевины коренной шейки при увеличении $\times 1000$ показана

на рис. 4. Микроструктура сердцевины феррито-перлитная соответствует микроструктуре доэвтектоидной стали в нормализованном состоянии, что видно из рис. 4.

При этом химический состав материала третьей коренной шейки определялся на ее наружной поверхности и в сердцевине. Результаты анализа химического состава материала третьей коренной шейки в указанных местах отбора проб приведены в таблице.



Рис. 3. Микроструктура переходного слоя при увеличении $\times 100$
 Fig. 3. Microstructure of the transition layer magnified $\times 100$

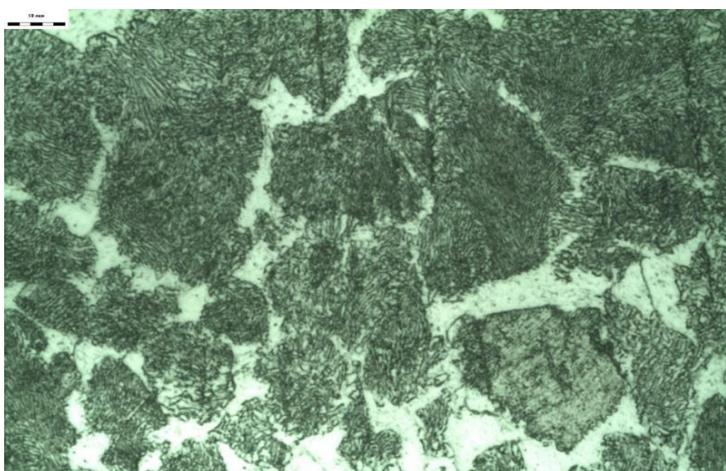


Рис. 4. Микроструктура сердцевины коренной шейки при увеличении $\times 1000$
 Fig. 4. Microstructure of the core of the root neck magnified $\times 1000$

Таблица

Химический состав материала шейки коленчатого вала исследуемого двигателя ЯМЗ

Table

Chemical composition of the crankshaft neck material of YAMZ engine under study

Место анализа	Содержание химических элементов							
	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %
Наружная поверхность	0,48	0,189	0,75	0,018	0,021	0,032	0,069	0,081
Сердцевина	0,47	0,21	0,77	0,013	0,010	0,033	0,061	0,031
Сталь 50 ГОСТ 1050–2013	0,47 – 0,55	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	$\leq 0,035$	$\leq 0,040$	$\leq 0,25$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$
Сталь 50Г ГОСТ 1050–2013	0,48 – 0,56	0,17 – 0,37	0,70 – 1,00	$\leq 0,030$	$\leq 0,035$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$

Результаты проведенного анализа, свидетельствуют о следующем:

– химический состава материала образца, вырезанного из третьей коренной шейки коленчатого вала исследуемого двигателя, соответствует химическому со-

ставу сталей 50 или 50Г ГОСТ1050–2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия».

– химические составы материала на наружной поверхности образца, вырезанного из третьей коренной шейки коленчатого

Результаты и выводы

Таким образом, обобщая результаты проведенного металловедческого исследования образца, вырезанного из третьей коренной шейки коленчатого вала исследуемого двигателя ЯМЗ-238Д1 можно утверждать, что:

1) коленчатый вал исследуемого двигателя изготовлен из нелегированной специальной стали 50 или 50Г ГОСТ 1050–2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей»;

2) средняя твердость на рабочей поверхности третьей коренной шейки – 55...57 HRC; в сердцевине третьей коренной шейки – 178...185 HB;

3) на наружной поверхности третьей коренной шейки имеется упрочненный слой толщиной около 4,5...4,7 мм с мартенситной структурой с плавным переходом в феррито-перлитную микроструктуру сердцевины;

4) дефекты металлургического характера в материале образца не выявлены;

5) замеры твердости рабочих поверхностей и сердцевины третьей коренной

того вала исследуемого двигателя третьей коренной шейки и в ее сердцевине идентичны.

шейки, а также исследование микроструктуры поперечного шлифа свидетельствует о поверхностном упрочнении – закалке токами высокой частоты (ТВЧ). Качество поверхностного упрочнения удовлетворительное;

б) коленчатый вал исследуемого двигателя восстановлению методом наплавки коренных шеек не подвергался, т. к. в микроструктуре образца из третьей коренной шейки признаки в виде зон полной и неполной перекристаллизации, зон термического влияния, стрельчатой микроструктуры и столбчатых форм кристаллов, характерные для наплавки не выявлены.

Материаловедческое исследование фрагмента коленчатого вала подтвердило прочность и жесткость применяемого материала. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации процессов производства и улучшения эксплуатационных характеристик коленчатых валов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных методов термической обработки на механические свойства материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федонин О.Н., Шалыгин М.Г. Повышение коррозионной стойкости и износостойкости изделий транспортного и химического машиностроения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 8. С. 3-10.
2. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Шалыгин М.Г. Качество изделий на стадии проектирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 2(87). С. 11-18.
3. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие / Б.Л. Охотников. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.

4. Техническая эксплуатация, диагностирование и ремонт двигателей внутреннего сгорания: учебник / А.В. Александров, С.В. Алексахин, И.А. Долгов и др. 2-е изд. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2025. – 456 с.
5. Ремонт автомобилей и двигателей: учебник / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин. 2-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 496 с.
6. Диагностика современных автомобилей: учебное пособие / Н.А. Кузьмин, А.Д. Кустиков. М.: ИНФРА-М, 2023. – 229 с.

REFERENCES

1. Fedonin ON, Shalygin MG. Corrosion and wear resistance increase of of transport and chemical engineering products. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020;8:3-10.
2. Tikhomirov VP, Izmerov MA, Shalygin MG. Product quality at design stage. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2020;2(87):11-18.

3. Okhotnikov BL. Operation of internal combustion engines: textbook. Yekaterinburg: Ural University Publishing House; 2014.
4. Aleksandrov AV, Aleksakhin SV, Dolgov IA. Technical operation, diagnostics and repair of internal combustion engines: textbook. 2nd ed. Moscow: RIOR: INFRA-M; 2025.

5. Karagodin VI, Mitrokhin NN. Repair of cars and engines: textbook. 2nd ed. Moscow: Academy; 2003.

6. Kuzmin NA, Kustikov AD. Diagnostics of modern cars: textbook. Moscow: INFRA-M; 2023.

Информация об авторах:

Лукашова Елена Витальевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета.

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

Lukashova Elena Vitalievna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University.

Vashchishina Anna Pavlovna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University.

Шалыгин Михаил Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Турбиностроение и трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета.

Осипов Тимофей Игоревич – магистрант Брянского государственного технического университета.

Shalygin Mikhail Gennadyevich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University.

Osipov Timofey Igorevich – Master's degree student at Bryansk State Technical University.

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 08.04.2025; одобрена после рецензирования 09.04.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Горленко А.О., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 08.04.2025; approved after review on 09.04.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Gorlenko A.O., Doctor of Technical Sciences, Professor of Bryansk State Technical University.