

УДК 621.431.3

DOI:10.30987/2223-4608-2021-2-41-48

А.Ю. Малахов, к.т.н., **Т.Е. Лихачева**, к.т.н., **Л.Г. Петрова**, д.т.н.,
А.Е. Перекрестов, ведущий инженер, **В.А. Перекрестова**, старший преподаватель
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
125319, Москва, Ленинградский проспект, 64)
E-mail: laromadi@yandex.ru

Материаловедческие и технологические аспекты разрушений коленчатых валов ДВС*

Рассмотрены примеры разрушений коленчатых валов современных двигателей внутреннего сгорания. Проанализированы случаи выхода из строя коленчатых валов ДВС, связанные с наличием в них производственных дефектов: нарушение процесса упрочняющей поверхностной обработки шеек или её отсутствие, металлургические дефекты в микроструктуре материала, грубая механическая обработка шеек и их масляных каналов. Для определения причин разрушения коленчатых валов использован разработанный исследовательский комплекс мониторинга структурного состояния и анализа разрушений материалов деталей автомобиля в эксплуатации.

Ключевые слова: автотехническая экспертиза; упрочненная поверхность; химико-термическая обработка; азотирование; индукционная закалка токами высокой частоты (закалка ТВЧ).

A.Yu. Malahov, Can. Sc. Tech., **T.E. Likhacheva**, Can. Sc. Tech., **L.G. Petrova**, Dr. Sc. Tech.,
A.E. Perekrestov, Principal engineer, **V.A. Perekrestova**, Senior lecturer
(Moscow Motor-Road State Technical University (MADI),
64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

Material-scientific and technological aspects of ICE crankshaft disintegrations

The examples of crankshaft disintegration in modern internal combustion engines are considered. The cases of ICE crankshaft failure connected with the presence of manufacturing defects in them are analyzed: neck surface strengthening failure or its absence, metallurgic defects in material microstructure, necks and their lubrication grooves rough machining are analyzed. To determine the reasons of crankshaft disintegrations there was used a developed research complex for monitoring a structural state and analysis of motor car parts material disintegration during operation.

Keywords: motor car technical examination; strengthened surface; chemical thermal treatment; nitriding; induction hardening with high-frequency current (HFC hardening).

Введение

В настоящее время в связи с постоянно увеличивающимся автопарком автомобиль-

* Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

ный транспорт продолжает оставаться источником повышенной опасности. Эксплуатация автомобилей в сложных климатических условиях (при отрицательных температурах, резких сменах температур, воздействии агрессивных природных и техногенных сред) увеличивает нагрузку на конструкционные материалы и повышает вероятность преждевременного или внезапного выхода из строя деталей двигателя [1, 2].

Причины разрушений и отказов деталей могут быть как эксплуатационными, так и производственными, связанными с отклонениями состава материала детали или технологического процесса ее изготовления и обработки от требований нормативных документов. К основным видам повреждений материалов в экстремальных условиях эксплуатации относятся износ, в том числе, гидроабразивный и абразивный; коррозия и усталостное разрушение. Этим видам разрушений могут подвергаться как базовые детали транспортных средств, так и детали, прошедшие восстановительный ремонт, например, после ДТП [3, 4].

Поскольку основной риск повреждений в условиях износа, коррозии, контактных нагрузок приходится на поверхность стальных изделий, то для обеспечения надежной работы многие детали современных автомобилей подвергаются поверхностному упрочнению: закалке с индукционным нагревом, химико-термической обработке и другим, в том числе комбинированным способам обработки [5]. К таким деталям относятся шестерни коробов переключения передач и редукторов, кулачки распределительных валов, верхние компрессионные кольца поршней двигателя, детали топливной аппаратуры, впускные, выпускные клапаны, шаровые пальцы рулевых тяг и шейки коленчатых валов [6].

Нарушение установленного процесса изготовления и обработки детали может привести к развитию производственных дефектов и разрушению детали. Исследования причин выхода из строя деталей современных автомобилей при их эксплуатации проводит Институт независимой автотехнической экспертизы Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). За более чем 20-летний период работы в ИНАЭ-МАДИ собран обширный материал по различным технологиям, применяемым для упрочнения поверхностей деталей автомобилей, а также по возможным причинам их выхода из строя. В данной статье проанализированы конкретные примеры исследований разрушений коленчатых валов современных ДВС, связанных с наличием в них производственных дефектов.

Методика проведения исследований

Для определения причин разрушения коленчатых валов был использован исследовательский комплекс для мониторинга струк-

турного состояния и анализа разрушений материалов деталей автомобиля в эксплуатации [7, 8]. Методика исследования с применением данного комплекса использует алгоритм выявления причины разрушения на различных масштабных уровнях структуры.

При помощи макроанализа визуально оценивают внешний вид объекта, что позволяет получить информацию о наличии деформаций, признаках теплового воздействия, характере повреждений, возможной локализации приложения нагрузки и качестве поверхностной механической обработки. Фрактографическое исследование излома определяет очаг и характер разрушения. Анализ микроструктуры выявляет наличие металлургических дефектов (неметаллических включений, пор, трещин, флокенов и т.п.), а также определяет соответствие строения металла нормируемому способу термической или химико-термической обработки. Результаты металлографического анализа сопоставляются с результатами измерения твердости или микротвердости, распределенной по упрочненному слою до матрицы стали.

Для проверки соответствия материала детали нормируемой марке стали и возможных отклонений проводится анализ химического состава, контролируется количество вредных примесей. Для определения природы неметаллических включений и вторичных фаз используются дифракционные и спектральные методы анализа.

В соответствии с разработанной методикой [9], исследование разрушенных коленчатых валов проводили поэтапно:

- визуальный осмотр коленчатого вала с целью выбора поврежденного фрагмента для дальнейшего исследования и макрофрактографическое исследование для первичной оценки поверхности разрушения;
- фрактографическое исследование поверхности разрушения, в том числе детальное исследование поверхности очага разрушения с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6480LV (JEOL, Япония);
- исследование химического состава материала вала с применением оптико-эмиссионного спектрометра OBLF QSN 750 (OBLF, Германия);
- измерение твердости поверхности шеек коленчатого вала с помощью портативного динамического твердомера NOVOTEST Т-УДЗ (NOVOTEST, Россия) и сердцевины шеек с применением стационарного твердомера ТК-2М (ЗИП, Россия), а также измерение

распределения микротвердости по поверхности упрочнённого слоя до матрицы с помощью микротвердомера ПМТ-3М (ЛОМО, Россия);

– металлографические исследования структуры выбранных участков детали на микрошлифах в оптическом микроскопе Neophot-21 (Karl Zeiss, Германия) при увеличениях $\times 100 \dots 2000$ до и после травления 4-х %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Результаты исследования и их обсуждение

Коленчатый вал двигателя воспринимает усилие от шатуна и преобразует его в крутящий момент. Коленчатый вал состоит из коренных и шатунных шеек, соединенных щеками, которые выполняют функцию уравнивания всего механизма. Коренные и шатунные шейки вращаются в подшипниках скольжения, выполненных в виде разъемных тонкостенных вкладышей [10]. Коленчатые валы изготавливают из среднеуглеродистых сталей, среди которых наиболее распространенные – стали марок 45, 45X, 45Г2, 50Г, 40ХНМА, 18ХНВА и др.

Стандартная термообработка коленчатых валов заключается в закалке с высоким отпускком (улучшении) или нормализации. Улучшение формирует структуру зернистого сорбита по сечению детали, что придает стали высокую ударную вязкость. В последнее время для коленчатых валов двигателей все чаще применяется нормализация с получением структуры «сорбит + феррит». Для поверхностного упрочнения коренных и шатунных шеек проводится поверхностная закалка или химико-термическая обработка, в частности, азотирование, состоящее в диффузионном насыщении поверхности шеек азотом.

Анализ возможных причин разрушений ко-

ленчатых валов двигателей позволил систематизировать вызывающие их факторы в следующие группы:

– конструктивные недостатки, по причине которых происходят отказы валов, связанные с ошибкой при их проектировании или конструировании (некорректный выбор материала, неправильно рассчитанные допустимые геометрические размеры и т.п.);

– эксплуатационные факторы, связанные с нарушением правил эксплуатации автомобиля (перегрев двигателя, масляное голодание двигателя, превышение максимально допустимых оборотов двигателя и т.п.);

– производственные недостатки, вызванные несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления коленчатого вала, к которым относятся нарушения в термической обработке, в упрочняющей обработке шеек, в качестве материала и в поверхностной механической обработке.

Ниже представлены примеры комплексного анализа возможных производственных дефектов конкретных коленчатых валов, получивших разрушения в процессе эксплуатации.

Исследование коленчатого вала № 1.

Данный пример выхода из строя коленчатого вала иллюстрирует его преждевременное разрушение по причине отсутствия упрочняющей поверхностной обработки шеек. Наиболее часто для упрочнения шеек применяют поверхностную закалку с индукционным нагревом током высокой частоты (закалка ТВЧ), основное назначение которой – повышение твердости (до 55...62 HRC), износостойкости и предела выносливости обрабатываемого изделия.

Как видно на рис. 1, разрушение коленчатого вала №1, которое случилось вскоре после его установки на двигатель, произошло по одной из его шатунных шеек.

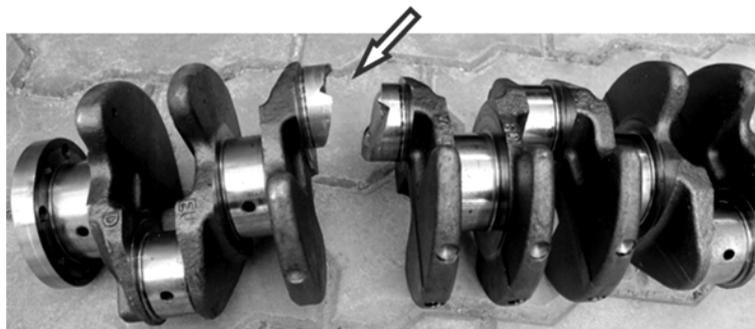


Рис. 1. Разрушение шатунной шейки коленчатого вала №1

Исследование химического состава материала, из которого изготовлен коленчатый

вал, показало его соответствие нормируемому составу среднеуглеродистой стали (табл. 1).

1. Химический состав материала шатунной шейки коленчатого вала №1, %

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
Основа	0,41	0,67	1,45	0,01	0,02	0,24	0,03	0,046	0,014	0,015	0,01	0,15

Обоснованно применена высококачественная сталь, легированная марганцем и кремнием, высокого металлургического качества с минимальным количеством вредных примесей (концентрации фосфора и серы менее 0,025 %).

Результаты измерения твердости шеек коленчатого вала и их сердцевины показали существенные отклонения от нормируемых значений (табл. 2).

2. Измерение твердости шейки коленчатого вала №1 и его сердцевины

Номер шейки	1	2	3	4	5
Коренные шейки	20 HRC	19 HRC	20 HRC	20 HRC	19 HRC
Шатунные шейки	19 HRC	20 HRC	20 HRC	19 HRC	18 HRC
Сердцевина	20 HRC				

Твердость шеек коленчатого вала №1 не отличается от твердости его сердцевины (в среднем 20 HRC), тогда как ожидаемые значения твердости упрочненных шеек после закалки ТВЧ должны быть не менее 50...55 HRC, что указывает на отсутствие поверхностного упрочнения.

Отсутствие признаков поверхностной упрочняющей обработки подтверждается также металлографическим исследованием микроструктуры поперечного шлифа шейки вала. На рис. 2 видно, что структура шейки коленчатого вала №1 (сорбит + феррит) одинаковая на поверхности и в сердцевине и не меняется по сечению.

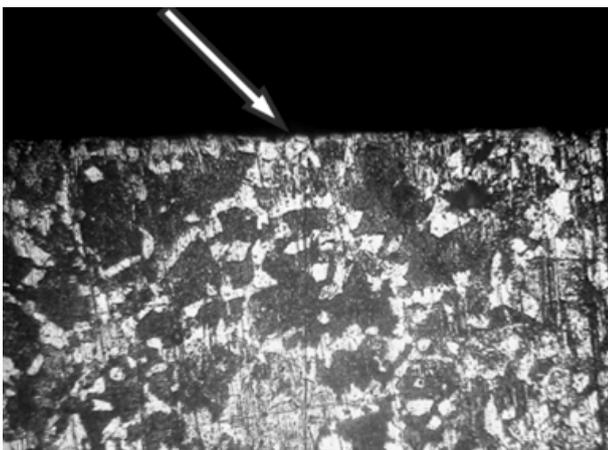


Рис. 2. Микроструктура (феррит + сорбит) материала шейки коленчатого вала №1 в его поперечном сечении; увеличение X200 (Neophot-21) (стрелкой показана поверхность шейки)

ДюрOMETрические и металлографические исследования позволили установить, что разрушение коленчатого вала №1 является следствием производственного дефекта его изготовления – шейки коленчатого вала не были подвергнуты упрочнению.

Исследование коленчатого вала № 2. Повреждения коленчатого вала №2 характеризуются продольными трещинами на шейках (рис. 3), что могло быть вызвано чрезмерными внутренними напряжениями в поверхностном слое.

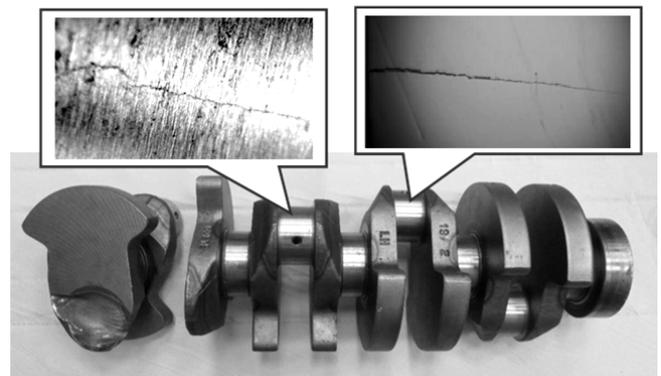


Рис. 3. Продольные трещины в стенках коленчатого вала №2

Анализ химического состава материала вала показал его соответствие высококачественной стали 45X надлежащего металлургического качества (табл. 3).

Результаты измерения твердости шеек коленчатого вала №2 и его сердцевины (табл. 4) показали, что поверхность шеек коленчатого

вала была упрочнена до значений твердости 63...65 HRC, превышающих показатели твер-

дости мартенсита среднеуглеродистой стали.

3. Химический состав материала коленчатого вала №2, %

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
Основа	0,43	0,25	0,69	0,007	0,015	1,15	0,048	0,05	0,01	0,002	0,37	0,092

4. Измерение твердости шейки коленчатого вала №2 и его сердцевины

Номер шейки	1	2	3	4	5
Коренные шейки	65 HRC	63 HRC	65 HRC	65 HRC	65 HRC
Шатунные шейки	63 HRC	65 HRC	63 HRC	63 HRC	65 HRC
Сердцевина	22 HRC				

Исследование микроструктуры стали позволило установить, что помимо закалки с индукционным нагревом током высокой частоты (закалки ТВЧ), шейки коленчатого вала подвергались также и последующему азотированию. Обычно шейки коленчатого вала подвергают упрочнению – либо закалке ТВЧ, либо химико-термической обработке. Однако в данном случае шейки коленчатого вала №2 были упрочнены комбинированным способом – закалка ТВЧ + химико-термическая обработка (азотирование).

Анализ микроструктуры шейки коленчатого вала №2 по его поперечному сечению (рис. 4), а также измерение микротвердости распределенной по сечению микрошлифа от поверхности до сердцевины шейки выявил производственный дефект в нарушении комбинированной технологии упрочнения шеек коленчатого вала.

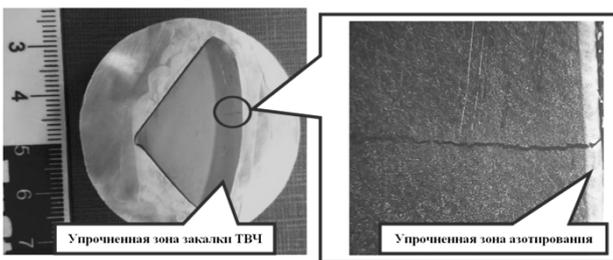


Рис. 4. Исследование микроструктуры шейки коленчатого вала №2 по его поперечному сечению, (×200), Neophot-21

Микротвердость упрочненного закалкой ТВЧ слоя под азотированным поверхностным слоем оказалась равной 58...60 HRC.

Согласно технологии комбинированного упрочнения после закалки ТВЧ шеек коленчатый вал далее должен быть подвергнут стабилизирующему отпуску при температуре 350...620 °С в течение 2...5 ч. После стабили-

зирующего отпуска твердость HRC поверхности шеек должна быть 36...48 HRC. Далее после механической финишной обработки шеек коленчатый вал подвергают химико-термической обработке (азотированию, карбонитрированию, оксикарбонитрированию и т.п.). Высокотвердый упрочненный слой, полученный после химико-термической обработки (в нашем случае после азотирования), должен лежать на более мягкой подложке упрочненного слоя после закалки ТВЧ. В нашем случае твердость подложки слоя, полученного после закалки ТВЧ, по твердости практически соразмерима с твердостью верхнего азотированного слоя. Именно это привело к возникновению чрезмерных внутренних напряжений в поверхности шеек коленчатого вала и возникновению в них усталостных трещин.

Исследование коленчатого вала № 3. Разрушение коленчатого вала №3 произошло по щеке между 2-й шатунной и 2-й коренной шейками (рис. 5).

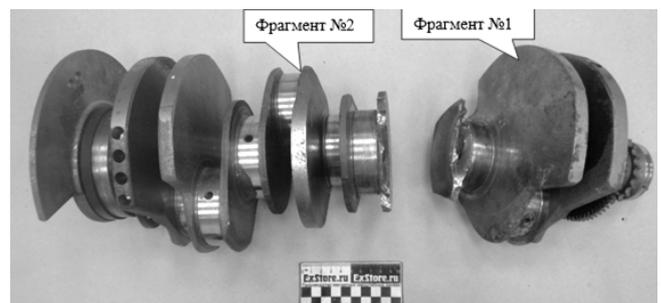


Рис. 5. Разрушенный коленчатый вал №3

Вблизи разрушенных фрагментов на шейках коленчатого вала наблюдаются следы изнашивания и наволакивания металла. Эти повреждения образовались после разрушения вала и носят вторичный характер. Они явились результатом динамического изменения геометрии подшипников скольжения по при-

чине появления дополнительной степени свободы из-за потери кинематической связи с направляющим аппаратом коленчатого вала (упорным подшипником), а также результатом нарушения целостности масляного канала.

Фрактографический анализ поверхностей излома исследуемого коленчатого вала позволил установить усталостный характер разрушения (рис. 6).



Рис. 6. Поверхность излома фрагмента коленчатого вала №3

5. Химический состав материала коленчатого вала №3, %

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
Основа	0,40	0,22	0,82	0,010	0,028	1,06	0,14	0,19	0,024	0,010	0,18	0,007

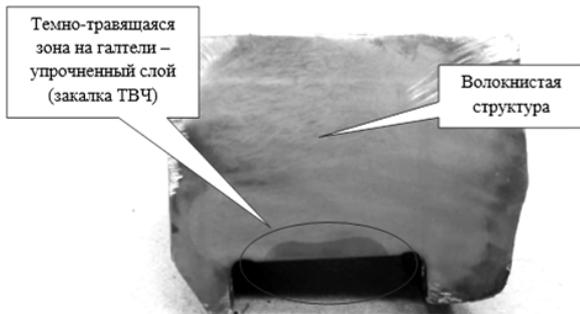


Рис. 7. Вид микрошлифа, вырезанного из 2-й шатунной шейки исследуемого коленчатого вала №3

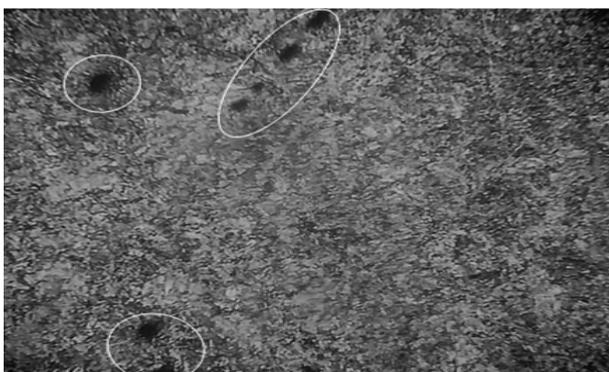


Рис. 8. Микроструктура сердцевины материала коленчатого вала №3 после травления: сорбит и неметаллические включения (×250) (Neophot-21)

При исследовании рельефа излома в очаге

«Храповый узор» (ступеньки) свидетельствуют о том, что усталостные трещины возникли в нескольких центрах и затем соединились, образуя фронт магистральной трещины.

Исследование химического состава материала, из которого изготовлен исследуемый коленчатый вал (табл. 5), показало его соответствие стали 40Х с некоторым превышением серы по норме содержания в высококачественной стали.

Исследования микроструктуры на микрошлифе, вырезанном из 2-й шатунной шейки, показали наличие темно-травящейся зоны на галтели, что характерно для слоя, упрочненного закалкой ТВЧ (рис. 7).

Микроструктура неупрочненной области волокнистая и представляет собой сорбит (феррито-цементитную смесь), в котором наблюдаются многочисленные неметаллические включения (выделены на рис. 8 кружочками).

зарождения трещин в растровом электронном микроскопе (РЭМ) были выявлены многочисленные поры (рис. 9).

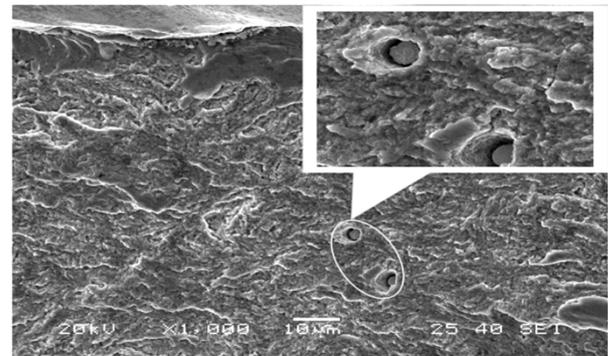


Рис. 9. Рельеф излома коленчатого вала № 3 вблизи очага зарождения трещин, увеличение x1000 РЭМ JEOL JSM-6480LV

Наличие неметаллических включений и пор в металле коленчатого вала, в том числе вблизи поверхности шейки (и особенно вблизи галтели), является причиной снижения способности вала противостоять усталостному разрушению и концентраторами для зарождения трещин.

Исследование коленчатого вала № 4. Разрушение коленчатого вала № 4 произошло по щеке между 1-й шатунной и 2-й коренной шейками (рис. 10).

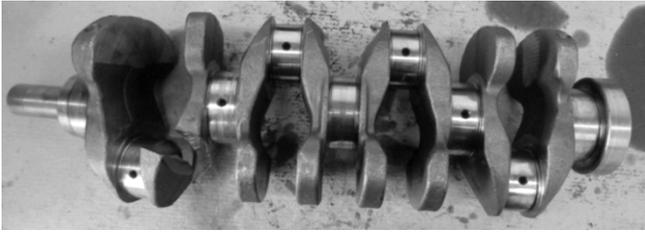


Рис. 10. Разрушенный коленчатый вал № 4

На поверхности излома (рис. 11) отчетливо видны основные три зоны, характерные для усталостного разрушения: очаг зарождения разрушения; зона стабильного развития усталостной трещины в виде дугообразных линий на поверхности излома; зона долома в виде рубцов, веерообразно расходящихся от усталостной трещины.



Рис. 11. Поверхность излома исследуемого фрагмента коленчатого вала № 4

На галтели 1-й шатунной шейки в очаге зарождения разрушения коленчатого вала установлены следы грубой механической обработки в виде глубокой царапины (рис. 12, а).

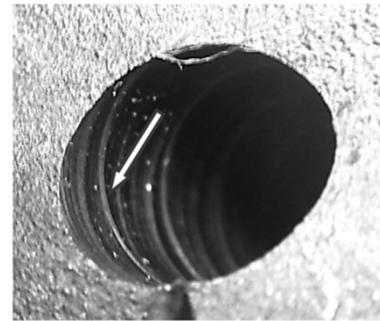
Данная царапина в наиболее нагруженном месте шатунной шейки (на галтели) недопустима и явилась концентратором напряжения для зарождения усталостной трещины и разрушения коленчатого вала №4.

Также была установлена грубая механическая обработка масляного канала 1-й шатунной шейки коленчатого вала №4 (рис. 12, б), что также недопустимо и могло привести к зарождению усталостной трещины именно из данных дефектов канала. Подобные причины уже исследовались в ИНАЭ-МАДИ на других разрушенных коленчатых валах.

В материале коленчатого вала № 4 никаких отклонений, которые могли бы привести к его разрушению, не выявлено. По химическому составу коленчатый вал изготовлен из высококачественной среднеуглеродистой стали (табл. 6).



а)



б)

Рис. 12. Грубая механическая обработка коленчатого вала № 4:

глубокая царапина на поверхности излома исследуемого фрагмента поверхности (а), масляный канал 1-й шатунной шейки (б)

6. Химический состав материала коленчатого вала № 4, %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,36	0,17	0,75	0,014	0,016	0,20
Ni	Mo	Cu	Al	V	Fe
0,044	0,21	0,10	0,034	0,041	Основа

Металлургических дефектов в микроструктуре вала не установлено. Коленчатый вал прошёл типовую термическую обработку – нормализация + закалка ТВЧ. Твёрдость сердцевины – 22...24 HRC, твердость упрочнённых закалкой ТВЧ шеек – 58...60 HRC.

Заключение

Комплексные металловедческие исследования разрушенных коленчатых валов ДВС позволили выявить характер разрушения и проанализировать наиболее распространенные производственные дефекты, являющиеся причинами их выхода из строя: отсутствие поверхностного упрочнения шеек коленчатого вала, нарушение технологии поверхностного упрочнения (закалки ТВЧ, азотирования, комбинированной технологии), ненадлежащее ка-

чество материала коленчатого вала в виде металлургических дефектов в его микроструктуре (наличие пор, неметаллических включений и т.п.), а также грубая механическая обработка шеек коленчатого вала и их масляных каналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лихачева, Т.Е. Причины и последствия поломки двигателя и сервисных работ. // Автотранспортное предприятие. – 2005. – №2. – С. 38 – 39.
2. Малахов, А.Ю., Перекрестов, А.Е., Зинченко, В.М., Карагодин, В.И., Лужнов, Ю.М. Исследование причин разрушения коленчатого вала двигателя на основе анализа напряженно-деформированного состояния упрочненной зоны. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – №3 (50). – С. 75 – 80.
3. Зорин, В.А., Баурова, Н.И. Моделирование свойств ремонтных материалов при длительном воздействии эксплуатационных факторов. // Механизация строительства. – 2012. – №1. – С. 15 – 17.
4. Лихачева, Т.Е., Дьяков, А.А., Михайлов, И.В., Косырев, А.С. Исследование качества изготовления поршневых колец фирмы «GOETZE» и причины выхода из строя двигателя автомобиля после ремонта. // Вестник МАДИ(ГТУ). – 2005. – Вып. 5. – С. 18 – 22.
5. Петрова, Л.Г., Александров, В.А. Применение комбинированного способа химико-термической обработки для поверхностного упрочнения стальных деталей гибридного автомобиля. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – №3 (38). – С. 15 – 21.
6. Тихонов, А.К. Металловедение и термическая обработка в автомобилестроении. – М.: Metallurgizdat, 2018. – 784 с.
7. Петрова, Л.Г., Лихачёва, Т.Е., Малахов, А.Ю. Исследовательский комплекс для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов и его применение при анализе разрушений стальных деталей автомобилей. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – №2 (33). – С. 11 – 17.

8. Шестопалова, Л.П., Петрова, Л.Г., Малахов, А.Ю. Научноёмкие исследования модифицированных слоев после химико-термической обработки. // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2012. – №7 (13). – С. 3 – 12.

9. Шестопалова, Л.П., Лихачева, Т.Е. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы. – М.: МАДИ, 2017. – 180 с.

10. Ховах, М.С. Автомобильные двигатели. – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.

REFERENCES

1. Likhachyova, T.E. Causes and consequences of engine failure and service works. // *Motor Transport Company*. – 2005. – No.2. – pp. 38-39.
2. Malakhov, A.Yu., Perekryostov, A.E., Zinchenko, V.M., Karagodin, V.I., Luzhnov, Yu.M. Investigation of engine crankshaft destruction based on analysis of stress-strain state of strengthened area. // *Bulletin of Moscow Auto-road State Technical University (MADI)*. – 2017. No.3(50). – pp. 75-80.
3. Zorin, V.A., Baurova, N.I. Modeling of repair material properties at continuous impact of operation factors. // *Building Construction Mechanization*. – 2012. – No.1. – pp. 15-17.
4. Likhachyova, T.E., Diyakov, A.A., Mikhailov, I.V., Kosyrev, A.S. Quality investigation in manufacturing “GOETZE” piston ring and reasons of motor car engine failure after repair. // *Bulletin MADI(STU)*. – 2005. – Issue 5. – pp. 18-22.
5. Petrova, L.G., Alexandrov, V.A. Combined chemical-thermal treatment use for steel parts surface strengthening of hybrid motor car. // *Bulletin of Moscow Auto-road State Technical University (MADI)*. – 2014. – No.3(38). – pp. 15-21.
6. Tikhonov, A.K. *Metal Science and Thermal Treatment in Automobile Industry*. – М.: Metallurgizdat, 2018. – pp. 784.
7. Petrova, L.G., Likhachyova, T.E., Malakhov, A.Yu. Investigation complex for monitoring structural state of construction materials and its use at analysis of motor car steel parts destruction. // *Bulletin of Moscow Auto-road State Technical University (MADI)*. – 2013. – No.2(33). – pp. 11-17.
8. Shestopalova, L.P., Petrova, L.G., Malakhov, A.Yu. Science intensive investigations of modified layers after chemical-thermal treatment. // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.7(13). – pp. 3-12.
9. Shestopalova, L.P., Likhachyova, T.E. *Methods of Materials and Machinery Investigations at Motor Car Technical Examination Fulfillment*. – М.: МАДИ, 2017. – pp. 180.
10. Khovakh, M.S. *Motor Car Engines*. – М.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 591.

Рецензент д.т.н.
Дмитрий Сергеевич Фатюхин

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 15.02.2021. Выход в свет 28.02.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+