

Методика исследования и определения причин тяжелых эксплуатационных повреждений ДВС

Хрулев А.Э. (Бюро моторной экспертизы СМЦ "АБ-Инжиниринг", Россия)

Постановка задачи

Большие усилия и средства, вкладываемые в научные исследования, проектно-конструкторские работы и производство ДВС, нередко не соответствуют сложности проблем, возникающих в эксплуатации ДВС. В результате наблюдается определенный разрыв между производителем и эксплуатантом транспортных средств, когда производитель не всегда имеет достоверную информацию о неисправностях, возникающих при эксплуатации его продукции. Одним из факторов, препятствующих получению такой информации, является отсутствие методик, с помощью которых можно было бы определять причины неисправностей с необходимой степенью достоверности. Особенно это касается тяжелых повреждений, когда большое количество разрушенных деталей и деформация обломков препятствует выявлению причинно-следственных связей.

Цель работы

Разработка методики для определения причин неисправностей ДВС в эксплуатации при тяжелых повреждениях.

Особенности повреждений ДВС и их исследований

К тяжелым повреждениям можно условно отнести такие, в которых происходит нарушение связей между возвратно-поступательно и вращательно движущимися деталями, в том числе, при разрушении поршней, шатунов и клапанов, что сопровождается пробоем стенок блока цилиндров, деформацией стенок головки цилиндра и обычно приводит к неремонтопригодности двигателя.

Все первичные разрушения деталей ДВС, очевидно, носят усталостный характер и связаны, главным образом, с нештатным (нерасчетным, не предусмотренным конструкцией) ростом нагрузок на деталь в результате некоего ее начального повреждения [1]. Вторичное разрушение деталей, сопряженных и/или взаимодействующих с первично разрушенной, напротив, носит мгновенный, ударный и хрупкий характер и вызвано превышением предела временной прочности материала деталей в результате их вторичного взаимодействия с образовавшимися обломками.

Многолетняя практика расследования различных видов неисправностей ДВС [5,7,9] показывает, что наиболее распространенными

тяжелыми повреждениями ДВС и их причинами являются (рис.1): 1) деформация и последующее разрушение стержня шатуна в результате попадания жидкости в полость цилиндра (т.н. гидроудар), 2) разрушение шатунного подшипника и нижней головки шатуна вследствие масляного голодания, 3) разрушение клапана преимущественно из-за ошибок сборки.



Рис.1. Последствия тяжелых повреждений ДВС при гидроударе (слева), масляном голодании (в центре) и обрыве клапана (справа).

Одной из главных проблем в случае возникновения неисправностей и повреждений ДВС в эксплуатации и необходимости установления их причины является отсутствие методик исследования, что связано с трудностями объективного характера - например, сложностью или даже невозможностью, в отличие от научных исследований процессов и конструирования ДВС, формализовать процессы, а при их моделировании выявлять закономерности, пригодные для составления универсальных методик [1]. Трудности вносят и особенности конструкции ДВС различных типов, что требует сбора статистических данных по характеру и особенностям неисправностей и разрушений для конкретных марок и моделей ДВС. Тем не менее, для тяжелых повреждений может быть предложена простая методика, по которой причина неисправности определяется достаточно точно. Для чего необходимо рассмотреть признаки каждого вида повреждений более подробно.

Тяжелые повреждения ДВС при попадании жидкости в цилиндр

В подавляющем большинстве известных случаев в цилиндр попадает вода, прошедшая через систему впуска в результате проезда транспортным средством глубоких луж, падения в водоемы, затопления и проч. [5]. Однако возможно попадание в цилиндр и других жидкостей - топлива из неисправных форсунок и агрегатов топливной системы, масла из неисправных агрегатов систем турбонаддува или при длительном нахождении транспортного средства в нештатном перевернутом положении. Прочие случаи, например, попадание в цилиндр охлаждающей жидкости, встречаются крайне редко и связаны, главным образом, с натеканием ее в цилиндр при нарушении технологии ремонтных работ.

Жидкость, попавшая в цилиндр, естественным образом занимает объем сжимаемого воздуха. На такте сжатия это приводит к резкому возрастанию давления в цилиндре и нагрузок на шатунно-поршневую группу. При большом по сравнению с объемом камеры сгорания количестве попавшей в цилиндр жидкости и продолжении вращения коленвала по инерции происходит осевое сжатие шатуна вдоль стержня с потерей им устойчивости, а также деформация юбки поршня от чрезмерных нагрузок. Данное явление получило название "гидроудар", и, хотя такое название не вполне отражает суть происходящих процессов, ниже именно оно будет использовано для краткости.

В зависимости от степени деформации шатуна после гидроудара возможны различные варианты дальнейшего развития событий. Так, при сильной деформации коленчатый вал будет заклинен вследствие упора поршня, расположенного на укороченном шатуне, в противовесы при подходе к ВМТ, или, реже - при упоре сильно деформированного стержня шатуна в нижний край цилиндра. При средней (условно) деформации шатуна двигатель сохранит работоспособность, но вследствие уменьшения степени сжатия и компрессии нарушится баланс мощностей по цилиндрам (возникнет неравномерность работ двигателя и потеря мощности), а также появится стук. И только при слабой деформации никаких явных признаков повреждения может не проявиться вообще.

Общим для средней и слабой деформации шатуна является появление при дальнейшей эксплуатации нештатных изгибающих нагрузок на деформированный стержень шатуна, при наличии которых стержень практически неизбежно разрушится от усталости через определенное время эксплуатации (рис.2).



Рис.2. Шатун, деформированный при гидроударе (слева), неизбежно разрушится по стержню через определенное число циклов (справа).

Современные системы самодиагностики некоторых транспортных средств позволяют зафиксировать и идентифицировать момент начального

повреждения данного типа (например, по самопроизвольной остановке ДВС при гидроударе, скачкообразному изменению параметров и т.д.), откуда даже можно получить точное время до усталостного разрушения. Однако использовать эти данные для создания каких-то количественных закономерностей невозможно из-за влияния особенностей конструкции конкретных ДВС, режимов работы после повреждения, особенностей записи и хранения информации в большинстве систем самодиагностики (в том числе, стирание информации после снятия питания) и, как следствие, значительных трудностей в сборе необходимой статистики.

В результате чаще всего эксперт-исследователь сталкивается только с конечным результатом гидроудара, а именно, с большим количеством обломков шатуна, поршня и блока цилиндров [1,5,6]. При этом решить прямую задачу, а именно, только по характеру разрушения (излома) отдельных деталей определить причину, по которой они превратились в обломки, невозможно.

Для правильного определения причины необходимо решать обратную задачу, а именно - установить признаки, которые появились на деталях вследствие начального повреждения еще в то время, когда они сохраняли работоспособность. Тогда, если знать и обнаружить все такие признаки, можно установить не только факт, но и причину гидроудара. Например, несмотря на то, что шатун мог превратиться во множество обломков, величину деформации шатуна, которую он имел до разрушения, всегда можно легко измерить. Совершенно очевидно, что у поршня, "осевшего" из-за осевого сжатия шатуна, верхнее поршневое кольцо не доходит до своего штатного положения в ВМТ, в результате чего пояс нагара в верхней части цилиндра при сгорании топлива расширяется вниз на величину осевого сжатия стержня шатуна (рис.3).



Рис.3. Главный признак гидроудара - расширение пояса нагара в верхней части цилиндра (слева), и один из подтверждающих признаков - стертый нагар над отверстием поршневого пальца (справа), свидетельствующий о деформации шатуна и работе поршня

с перекосом в цилиндре.

При исследовании пояса нагара практически всегда можно установить, что начальное положение верхнего кольца в ВМТ было штатным, однако затем изменилось. Такое изменение и является главным признаком гидроудара [5].

Есть и другие признаки гидроудара, которые можно условно разделить на подтверждающие (главный признак) и уточняющие (тип жидкости, попавшей в цилиндр). Подтверждающими признаками являются те, которые, также как и главный признак, говорят о деформации шатуна и работе ДВС с деформированным шатуном. К таким признакам относятся, в том числе, диагональный износ юбки поршня, деформация юбки, след стертого нагара над отверстием поршневого пальца на поршне и на ответной поршню верхней части цилиндра, износ края торцов поршневого пальца и ответный износ стопорного кольца от ударов пальца, разбивание канавки стопорного кольца, повреждение нижнего края юбки и бобышек поршня при задевании им противовесов в НМТ, диагональный износ шатунных подшипников и некоторые другие.

Однако ни один из указанных признаков не устанавливает тип жидкости, попавшей в цилиндр - для этого нужны уточняющие признаки. Так, при попадании в двигатель воды (водяной гидроудар) уточняющими признаками будут коробление гофров воздушного фильтра, следы намочения на картоне фильтра (рис.4) и следы высохших капель воды под крышкой фильтра, в гофрах воздухопроводов и на дроссельной заслонке.

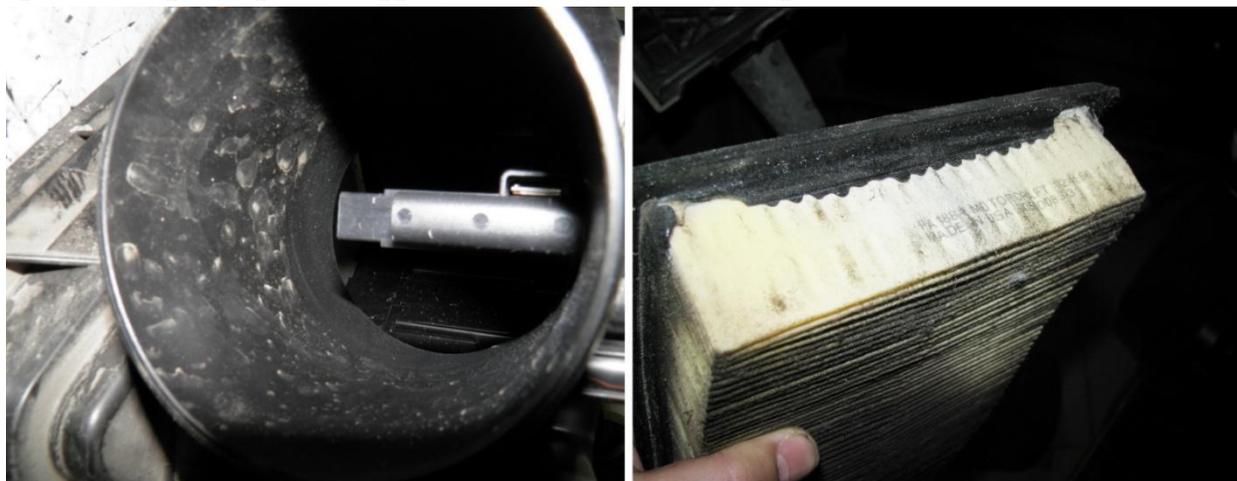


Рис.4. Типичные уточняющие признаки гидроудара - высохшие капли воды в воздуховоде (слева) и коробление элемента воздушного фильтра (справа).

Гидроудар от натекания в цилиндр топлива (топливный гидроудар) и попадания в цилиндр масла (масляный гидроудар) случаются намного реже, при этом имеется определенная сложность выделения уточняющих признаков этих видов гидроудара, поскольку масло и топливо не оставляют следов на деталях.

Тяжелые повреждения ДВС при разрушении выпускного клапана

Основная причина разрушения клапанов - это ошибки при ремонте и обслуживании, причем конструкции клапанных механизмов современных автомобильных ДВС стали особенно чувствительны к таким ошибкам в связи со всеобщим уменьшением диаметра стержня клапана (до 5 мм).

В практике ремонта встречаются 2 основных вида разрушения клапанов, а именно, обрыв стержня в верхней части по канавке для сухаря и отрыв головки клапана от стержня в нижней части [9,10,11]. Так же как и в случае гидроудара, пытаться определить причину такой неисправности только по характеру разрушения отдельных деталей, превратившихся в многочисленные деформированные вторичными ударами обломки, совершенно бессмысленно, и в данном случае следует решать обратную задачу - выявлять признаки, соответствующие конкретной причине, чтобы затем подтвердить эту причину по совпадению признаков.

Главным признаком неисправности данного вида, очевидно, является отсутствие головки клапана на ее штатном месте в седле (рис.5). Однако в отличие от главного признака гидроудара, отрыв головки может иметь не только первичный (усталостное разрушение), но и вторичный характер (мгновенное ударное разрушение от взаимодействия с обломками поршня). Поэтому для определения причины разрушения важны подтверждающие признаки, например, имеется ли следы ударов клапанов на поршнях соседних цилиндров, разрушен ли шатун и поршневой палец, поврежден или полностью разрушен поршень, а также какова степень износа нижней головки шатуна и шатунного подшипника.



Рис.5. Главный признак поломки клапана вследствие дефекта сборки - отсутствие тарелки в седле (слева) и разрушение поршня (справа), при наличии подтверждающих признаков - отсутствии разрушения пальца и шатуна.

Наиболее важными для данного вида неисправности являются уточняющие признаки локализации разрушения. Так, если стержень клапана остается в направляющей втулке, то разрушение произошло в нижней части

стержня с отделением головки от стержня, а причиной являются ударные изгибающие нагрузки на головке клапана [2]. Тогда уточняющие признаки - это следы ударов головки клапана на днище всех поршней, а также усталостный характер излома на стержне клапана. Если же в цилиндре имеются фрагменты разрушенного стержня клапана, то разрушение произошло по канавке для сухарей, и тогда после разрушения тарелка пружины сохраняется в сборе с сухарями и обломком стержня (рис.8), а излома стержня по канавке имеет специфическую микроструктуру (с включениями частиц материала направляющей втулки [10]).

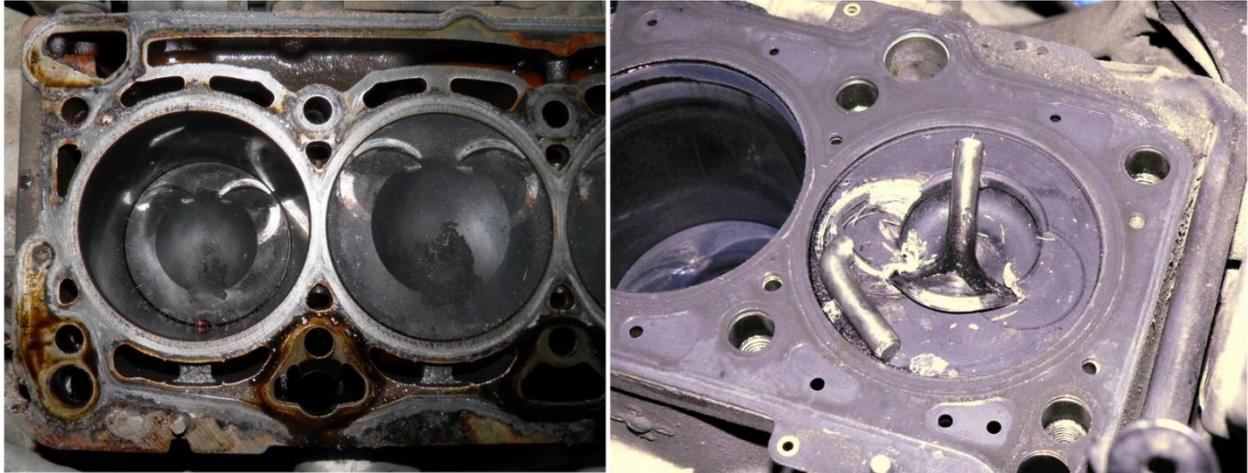


Рис.6. Уточняющие признаки разрушения клапана - неправильная установка фаз газораспределения (следы касания клапанов на поршнях, слева) и поломка клапана по канавке для сухаря вследствие неправильной сборки (стержень в цилиндре, справа).

Тяжелые повреждения ДВС вследствие масляного голодания

Данная неисправность возникает при нарушении подачи масла по различным причинам, среди которых преобладают эксплуатационные [1,3,7]. Главный признак неисправности - это усталостное разрушение шатуна по нижней головке, оно происходит вследствие износа, перегрева и разрушения шатунного подшипника с потерей прочности нижней головки шатуна при одновременном появлении ударных нагрузок от больших зазоров в подшипнике. Разрушение (в том числе, болтов крышки шатуна) обычно происходит с повреждениями и пробоем стенки блока цилиндров.

Подтверждающие признаки данной неисправности это, очевидно, полное или частичное разрушение вкладыша, износ и перегрев нижней головки шатуна (рис.7), а также повреждение днища поршня от ударов по головке цилиндров (из-за смещения шатунно-поршневой группы вверх при разрушении вкладыша), в некоторых случаях частичное или полное разрушение поршня,

Уточняющие признаки локализуют саму причину неисправности, среди них наиболее распространенными являются недостаточный уровень масла,

неисправность маслонасоса, засорение маслосистемы отложениями, а также различные ошибки при ремонте и прочие причины.



Рис.7. Пример сочетания главного признака масляного голодания (усталостное разрушение нижней головки шатуна) с комплексом подтверждающих признаков (перегрев нижней головки, частичное разрушение поршня и полное разрушение шатунного подшипника).

Методика определения причин тяжелых повреждений ДВС

Поскольку в совокупности все признаки позволяют достаточно надежно устанавливать причину разрушений по совпадению (или несовпадению) найденных признаков с описанными выше, можно построить простую методику определения причин неисправностей, если свести все известные признаки в таблицу (табл.1).

Табл.1. Виды тяжелых повреждений ДВС и их признаки.

Повреждение/ неисправность	Гидроудар	Обрыв клапана	Масляное голодание
Причина неисправности	Попадание жидкости в цилиндр	Дефект сборки сопряженных с клапаном деталей	Перегрев шатунного подшипника
Причина разрушения	Нештатные нагрузки на шатун из-за деформации стержня, усталостное разрушение стержня шатуна	Нештатные нагрузки на клапан, усталостное разрушение стержня клапана	Потеря прочности материала, нештатные ударные нагрузки, усталостное разрушение нижней головки шатуна
Последствия	Пробой блока цилиндров, повреждение цилиндра в нижней части, повреждение головки цилиндра и клапанов	Сильное повреждение цилиндра (по всей высоте) и камеры сгорания, пробой блока цилиндров	Пробой блока цилиндр., разрушение шатуна, повреждение цилиндра в нижней части
Главные признаки	Разрушение стержня шатуна в средней части, при расширенном поясе нагара в верхней части цилиндра	Сильное повреждение или разрушение поршня при отсутствии головки клапана на ее штатном месте в седле	Разрушение нижней головки шатуна при разрушении вкладыша и перегреве нижней головки шатуна
Подтвержд.	1) диагональный износ юбки	1) отсутствие разрушения	1) износ и перегрев

признаки	поршня, 2) деформация юбки, 3) след стертого нагара над отверстием пальца на поршне, ответный след стертого нагара в верхней части цилиндра, 4) износ края торцов поршневого пальца, 5) ответный износ стопорного кольца, 6) разбивание канавки стопорного кольца в отверстии для пальца, 7) нагарообразование на стенках камеры сгорания и на днище поршня, 8) повреждение нижнего края юбки и бобышек поршня, 9) диагональный износ шатунных вкладышей, отсутствие следов перегрева на них и на нижней головке шатуна, 10) в атмосферных ДВС выгаливание поршня с обломком шатуна вверх, в ДВС с наддувом - вниз, до полного разрушения поршня.	шатуна, 2) отсутствие разрушения поршневого пальца, 3) отсутствие повреждений нижней головки шатуна, 4) отсутствие износа шатунного подшипника.	вкладышей и головки шатуна, 2) повреждение днища поршня от ударов по головке цилиндра, 3) повреждение бобышек поршня снизу от ударов противовесов коленвала, 4) возможн. разрушение поршня.
Уточняющие признаки	При попадании воды извне: 1) коробление гофров возд. фильтра, 2) следы намокания на картоне, 3) следы высохших капель воды в корпусе фильтра, в воздуховодах и на дросс. заслонке. При попадании масла (только ДВС с турбонаддувом) и топлива: 1) отсутствие следов высохших капель внутри воздухопроводов, 2) течь уплотнений турбокомпрессора (внутренняя негерметичность агрегатов топливной систем).	1) при разрушении в нижней части стержня: - следы ударов головки клапана на днище всех поршней, - усталостный характер излома на стержне клапана, 2) при разрушении по канавке для сухарей: - стержень клапана в цилиндре, - тарелка пружины сохраняется в сборе с сухарями и обломком стержня, - специфическая микро-структура излома.	1) низкий уровень масла, 2) неисправность маслососа, 3) засорение маслосистемы отложениями, 4) ошибки при ремонте

Из табл.1. следует, что при наличии тяжелых повреждений ДВС для определения причины достаточно проверить имеющиеся признаки на соответствие гидроудару, масляному голоданию и дефекту сборки клапанного механизма, чтобы выбрать рабочую версию причины неисправности, которую затем также быстро подтвердить и уточнить ее место по прочим признакам - подтверждающим и уточняющим.

Заключение

Причины тяжелых повреждений ДВС, возникающих вследствие разрушения и рассогласования возвратно-поступательного и/или вращательного движения деталей, могут быть определены с высокой достоверностью, если использовать простую методику, в которой все

известные признаки повреждений разбить на главные, подтверждающие и уточняющие, чтобы проверять наличие указанных признаков при расследовании причин неисправностей.

Проверочное применение такой методики по базе данных выполненных досудебных и судебных экспертиз (более 90 исследований за 8 лет) показало, что с ее помощью можно практически исключить грубые ошибки при расследовании причин неисправности, включая выявление явных несоответствий заключений экспертиз, таких как путаница между причинами и следствиями, в том числе, при недостаточной квалификации исследователя.

Литература

1. Greuter E. Engine Failure Analysis / Greuter E., Zima S. // SAE International, R-320, ISBN 978-0-7680-0885-2. Warrendale, USA, 2012.- 582 p.
2. Компоненты двигателя и фильтры: дефекты, их причины и профилактика. Пер.с англ. // MC3-1109, Mahle GmbH, www.mahle-aftermarket.com, 2010.- 77с.
3. Engine Failure Analysis and Tips Job Aid. Guide to Preventing Repeat Engine Failures. Version 1.0 // Ford Motor Company, June 2013. - 23p.
4. Piston Damage - Causes and Remedies // MAHLE GmbH, Stuttgart, 1999.- 66p.
5. Хрулев А., Самохин С. Гидроудар "замедленного действия" // "Автомобиль и сервис", №01/2011, С.36-39.
6. Failure analysis of a fractured connecting rod / M.N. Mohammed, M.Z. Omar, Zainuddin Sajuri // Journal of Asian Scientific Research #2, 2011, p.737-741.
7. Хрулев А. Почему застучал вкладыш? // "Автомобиль и сервис", №12/2000, С.14-16.
8. Engine Bearings: Failure Analysis and Correction // MAHLE Aftermarket Inc. 23030 MAHLE Drive, Farm. Hills, MI 48335 United States, 2014. - 39p.
9. Хрулев А. Дьявол в деталях. Ч.2 // "Автомобиль и сервис", №03/2012, С.28-30.
10. Поломка клапана на конце стержня. TRW Service Information No.SI 0028 // MS Motor Service International GmbH, 74196 Neuenstadt, Germany, 2011.- 2p.
11. Naresh Kr. Raghuwanshi, Ajay Pandey, R. K. Mandloi. Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 1, Issue 2, December 2012, p.173-181.

Методика исследования и определения причин тяжелых эксплуатационных повреждений ДВС

Хрулев А.Э.

Бюро моторной экспертизы
СМЦ "АБ-Инжиниринг"

Большие усилия и средства, вкладываемые в научные исследования, проектно-конструкторские работы и производство ДВС, нередко не соответствуют сложности проблем, возникающих в эксплуатации. В результате наблюдается определенный разрыв между производителем и эксплуатантом транспортных средств, когда производитель не всегда имеет достоверную информацию о неисправностях, возникающих при эксплуатации его продукции, что препятствует установлению их причин и принятию соответствующих решений, в том числе, по внесению соответствующих изменений в производственный процесс.

С другой стороны, привлечение экспертов-исследователей к расследованию причин неисправностей ДВС в случае спора между эксплуатантом и производителем (или уполномоченным продавцом) также не решает проблемы - далеко не все исследователи, берущиеся за такие исследования, имеют соответствующую подготовку, квалификацию и опыт, в результате чего причины неисправности часто необоснованно объявляются производственными или, наоборот, эксплуатационными. Помимо этого, неправильное определение причин неисправностей, нередко наблюдаемое у персонала транспортного предприятия, которому поручается восстановительный ремонт поврежденного ДВС, связанное с недостаточной квалификацией, значительно увеличивает эксплуатационные затраты.

Опыт исследования причин неисправностей большого числа автомобильных двигателей показывает, что указанные проблемы можно решить при использовании методик, с помощью которых можно было бы определять причины неисправностей с необходимой степенью достоверности. Это особенно важно в случае наиболее значительных разрушений в ДВС, исследование причин которых также трудно, как и их устранение. Такие неисправности возникают, как правило, в результате рассогласования движения вращающихся и/или поступательно движущихся деталей как следствие 3-х наиболее распространенных видов повреждений - разрушения шатуна, деформированного в результате попадания жидкости в цилиндр, клапанов вследствие дефекта сборки и шатунных подшипников при нарушении подачи масла.

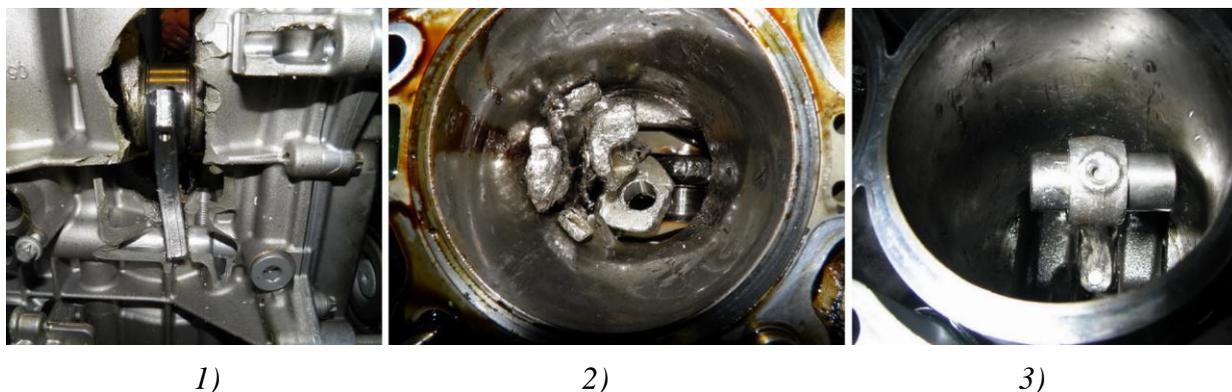


Рис. 1 – Наиболее распространенные виды тяжелых повреждений ДВС в эксплуатации:
1) – разрушение шатуна блока цилиндров после деформации, 2) - разрушение поршня и шатуна в результате нарушения подачи масла к подшипнику, 2) - разрушение поршня после обрыва головки клапана.

Такие неисправности условно могут быть определены как тяжелые повреждения ДВС, поскольку они нередко сопровождаются разрушениями основных деталей, включая корпусные, и приводят к дальнейшей неремонтопригодности ДВС.

Анализ практики экспертных исследований указанных неисправностей показал, что правильное определение их причин и построение каких-либо методик невозможно без подробного описания и анализа всех их признаков. Помимо этого, при разработке методики определения причин неисправностей учитывалось, что решение прямой задачи, а именно, только по характеру разрушения (излома) отдельных деталей определить причину, по которой они превратились в обломки, является типичной ошибкой экспертов, не позволяющей выявить причину неисправности. Вследствие этого методика строилась на решении обратной задачи - устанавливались все признаки, которые появились на деталях вследствие их начального повреждения еще в то время, когда детали сохраняли работоспособность. Тогда причину неисправности и последующего разрушения можно установить совершенно точно, если знать и обнаружить все такие признаки.

С этой целью все признаки выбранных видов неисправностей были установлены и тщательно проанализированы, в результате чего были выделены главные признаки, по которым можно сразу, без проведения детальных исследований, выбрать рабочую версию причины неисправности, а также подтверждающие признаки, позволяющие закрепить выбранную версию. Помимо указанных, для каждого вида неисправности были получены и уточняющие признаки, с помощью которых можно установить причину начального повреждения деталей ДВС - например, какая жидкость попала в цилиндр, или что вызвало нарушение подачи масла к шатунному подшипнику.

Все полученные данные были сведены в таблицу, которая и составила суть методики. В результате при тестировании методики (таблицы) по реальным случаям разрушений ДВС ее использование свелось к пошаговому алгоритму, упростившему работу по достоверному определению причины неисправности ДВС до нескольких действий - проверки из таблицы нескольких главных признаков для выбора версии и анализа прочих признаков для ее подтверждения и уточнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование причин тяжелых повреждений ДВС может быть значительно упрощено при одновременном существенном повышении достоверности результатов, если использовать методику, основанную на анализе признаков, которые образовались на деталях до их разрушения. Методика, созданная на базе указанных принципов для 3-х наиболее распространенных видов неисправностей, позволяет избежать грубых ошибок и обеспечивает хорошую достоверность определения причин неисправности, даже не требуя высокой квалификации исследователя.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Alexander E.Khrulev - PhD, Senior researcher, Head of the Bureau of Motor Expertise of Specialized Motor Center "AB-Engineering", a member of the House of court experts, Moscow, Russia, email: ab@ab-engine.ru.

Methods of study and determination of the causes of heavy duty damages of internal combustion engines

A.E.Khrulev

Moscow Specialized motor center "AB-Engineering", Bureau of Motor expertise