

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ АЗОТИРОВАННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ШЕЕК**

В работе представлены результаты исследования, направленного на обеспечение ремонтно-пригодности азотированных коленчатых валов. Анализ эксплуатационной надёжности двигателей КАМАЗ с азотированными коленчатыми валами показал высокую износостойкость данных валов. Вместе с тем, возникающие при эксплуатации на шейках вала задиры общепринятыми методами обработки устранить практически невозможно из-за высокой твёрдости поверхностного слоя, а наплавка на азотированный слой невозможна, что приводит к утилизации вала. К тому же, толщина азотированного слоя крайне мала, что позволяет обрабатывать вал не более, чем на один ремонтный размер. Вследствие этого, ремонтпригодность азотированных коленчатых валов является крайне неудовлетворительной и значительно увеличивает издержки на эксплуатацию транспортных средств. Так, при среднерыночной цене коленчатого вала 93 тыс. руб., программе производства 50 тысяч двигателей и уровне годовой выбраковки 0,03 потери потребителей составят 697,5 млн. руб. Для обеспечения возможности наплавки шеек азотированных валов в эксплуатации необходимо снятие азотированного слоя с минимальными затратами ресурсов и времени. Одной из технологий, отвечающих данным требованиям, является разработанная технология ремонта со снятием азотированного слоя электроэрозионным способом на глубину 0,4 мм в состоянии основной структуры, что обеспечивает возможность индукционной закалки или наплавки без появления на коленчатых валах трещин, отслоений, пузырений. После этого шейки вала упрочняют ТВЧ и перешлифовывают в условиях завода-изготовителя или наплавляют с последующей шлифовкой и полировкой в условиях ремонтных производств в установленные размеры. Последующая перешлифовка шеек на установленный размер позволяет восстанавливать до 80% коленчатых валов с задирами шеек. Предложенная технология показала при испытаниях свою работоспособность и эффективность, применима как в условиях ремонтного производства, так и в условиях завода-изготовителя с использованием стандартного оборудования со значительной экономией ресурсов по сравнению с существующими методами ремонта.

**Ключевые слова:** коленчатый вал, термообработка, азотирование, электроэрозионная обработка.

Опыт эксплуатации двигателей КАМАЗ с коленчатыми валами, закаленными ТВЧ, показал, что наиболее распространенными дефектами являются:

- проворачивание вкладышей, задиры или аварийный износ коренных и (или) шатунных шеек (22%);
- деформация коленчатого вала из-за задиры шеек и прижогов от проворачивания вкладышей (29%);
- трещины на коренных и (или) шатунных шейках (7%);
- ослабление посадки, смятие штифтов, разрушение резьбы под болты крепления маховика (19%).

Причиной возникновения задиры шеек является нестабильность смазочного процесса, вызывающая масляное голодание в подшипниках коленчатого вала при работе двигателя [1]–[4].

При нормальном износе средняя величина отклонения номинального диаметра в зоне-

наибольшего износа коренных шеек составляет 0,027 мм, а шатунных 0,029 мм, т. е. коренные и шатунные подшипники имеют стабильно низкий уровень интенсивности изнашивания (ниже, чем у шеек коленчатого вала двигателей ЯМЗ-238 и ЯМЗ-236) [2], [5]. Биение средней шейки для нормально изношенных валов находится в пределах от 0,02 мм до 0,17 мм, при этом средняя величина биения составляет 0,054 мм, а для аварийного износа в пределах от 0,040 мм до 0,730 мм, при средней величине биения 0,227 мм.

Доля коленчатых валов с усталостными поломками составляет 1,1%. В основном разрушения происходят при доминирующем влиянии прогиба оси вала от задиры шеек, причем подавляющее количество разрушенных коленчатых валов (92%) имели сопутствующие дефекты эксплуатационного и технологического происхождения. Так, наиболее опасными являются сочетания дефектов «задиры» и «трещина», а также «задиры» и «подрез галтели». Кроме того,

почти у четверти разрушенных валов были скрытые дефекты в зоне смыкания штампа, послужившие началу развития разрушения. Часть разрушений (17%) была усугублена конструкцией и качеством изготовления грязеуловительной полости. К тому же их показатели существенно зависели от качества поставляемой для изготовления коленчатых валов стали, т. к. при испытаниях нормально изношенных валов с шейками ремонтных размеров значимого снижения сопротивления усталости выявлено не было.

Технологически восстановление коленчатого вала, закаленного ТВЧ, производится перешлифовыванием в ремонтные размеры с последующей полировкой и обработкой галтелей маслоподводящих отверстий. До ремонтных размеров шеек коленчатого вала твердость поверхностей шеек сохраняется без повторной термообработки. Для данных валов предусмотрены восемь ремонтных размеров вкладышей подшипников коленчатого вала (таблица 1).

Восстановление валов, имеющих изгиб более допустимого (таблица 2) проводится посредством правки на приспособлении, изготовленном с использованием ручного гидравлического домкрата; величину биения проверяют индикаторной стойкой; для фиксации правки используют чеканку галтелей.

Разработка технологии правки чеканкой галтелей позволила получить ремонтные размеры у коленчатых валов с большим изгибом.

При массовом производстве двигателей на КАМАЗе предпочтение было отдано упрочнению коленчатых валов индукционной закалкой, которая имеет ряд преимуществ: в производстве – простота и высокая производительность; в эксплуатации – ремонтпригодность.

В новом поколении двигателей КАМАЗ экологических классов Е-2 и Е-3 применяются азотированные коленчатые валы, целесообразность применения которых наряду с технической составляющей имеет и важную экономическую составляющую, т. к. азотирование деталей является одним из эффективных способов их упрочнения. Для изготовления азотированных коленчатых валов была разработана и применяется сталь 42ХМФА (химический состав в %: углерод 0,40–0,45; ванадий 0,08–0,12; марганец 0,50–0,80; кремний 0,17–0,37; хром 1,0–1,3; молибден 0,35–0,45). Глубина упрочненного азотированного слоя у шатунных и коренных шеек составляет до 0,4 мм. Вместе с тем, при упрочнении азотированием детали снижают свою ремонтпригодность или полностью становятся неремонтпригодными. Это связано с тем, что рабочий нитридный слой, в отличие от просто закаленного слоя, например, с помощью ТВЧ, очень тонок (0,2–0,5 мм) и уже на глубине 0,1 мм его триботехнические свойства снижаются в 2–3 раза.

Предусмотренное конструкторской документацией повторное азотирование приводит к

Таблица 1. Категории ремонтных размеров шеек коленчатого вала

Номинальный размер, мм		Ремонтный размер, мм.			
		I	II	III	IV
коренная шейка	95±011	$94,5^{+0,015}_{-0,010}$	$94^{+0,015}_{-0,010}$	$93,5^{+0,015}_{-0,010}$	$93^{+0,015}_{-0,010}$
шатунная шейка	80±011	$79,5^{+0,015}_{-0,010}$	$79^{+0,015}_{-0,010}$	$78,5^{+0,015}_{-0,010}$	$78^{+0,015}_{-0,010}$
ширина пятой коренной шейки	36,2+0,05	36,2+0,08 или 36,5+0,08			

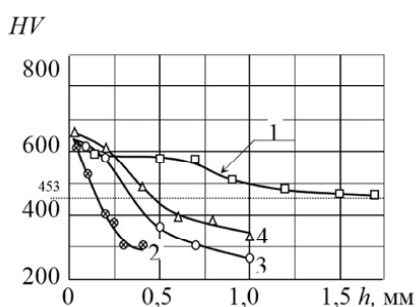
Таблица 2. Величина допустимого биения средней коренной шейки относительно крайних для перешлифовки в последний ремонтный размер без правки от исходных категорий ремонтных размеров

Наименование	Исходный размер			
	Номинал	I	II	III
Величина допустимого биения, в мм	0,90	0,65	0,40	0,15

перенасыщению рабочего слоя нитридами и, как следствие, к образованию трещин и потери работоспособности детали. Подтверждением этого может служить опыт эксплуатации двигателя ЯМЗ-238НБ, в котором был применен азотированный коленчатый вал [5]. Наряду с повышением сопротивления усталости и износостойкости шеек коленчатого вала задиристость шеек оставалась неудовлетворительной. Так, на Кандалакшском АРЗ предпринимались попытки восстановления азотированных коленчатых валов с задирами на шейках методом ремонтных размеров, но после перешлифовки вероятность задира, износа и поломок резко возрастала. Все попытки специалистов Ярославского моторного завода сделать этот коленчатый вал более ремонтнопригодным оказались безуспешными [6].

Для сравнения эффективности разных видов поверхностного упрочнения были проведены исследования микротвёрдости коленчатых валов, результаты которых представлены на рисунке 1. Замеры микротвёрдости выполнены по HV<sub>0,3</sub> по сечениям, перпендикулярным к исследуемым поверхностям. С точки зрения обеспечения ремонтнопригодности минимальная допустимая твердость поверхности равна 453 HV<sub>0,3</sub> (45 HRC). Анализ показывает: ионное азотирование имеет наименьшую глубину микротвёрдости (рисунок 1, кривая 2).

Ионное азотирование имеет наименьшую глубину микротвёрдости, вследствие чего коленчатые валы, подвергнутые ионному азотированию, могут быть восстановлены перешлифовкой на 0,25 мм при естественном износе в эксплуатации. Однако при задирах перешлифовка невозможна.



1 – закалка ТВЧ; 2 – ионное азотирование, сердцевина 248 НВ 10/3000; 3 – карбонитрирование, сердцевина 255 НВ 5/750/10; 4 – карбонитрирование, сердцевина 341 НВ 5/750/10

Рисунок 1. Зависимость микротвёрдости от глубины упрочненного слоя

Каталитическое азотирование (карбонитрирование) с твердостью сердцевины 255 НВ 5/750/10 (рисунок 1, кривая 3) обеспечивает минимально допустимую микротвёрдость на глубине около 0,4 мм, что выше, чем при ионном азотировании. Восстановление коленчатых валов в этом случае возможно при естественном износе перешлифовкой на 0,5 мм, а при задирах вкладышей в эксплуатации ремонт также невозможен [6].

Вместе с тем, конструкция такого коленчатого вала недостаточно приспособлена к нынешнему уровню эксплуатации и сервиса, т.к. глубина азотированного слоя на шейках до 0,4 мм является технологическим пределом. В производстве на заводе двигателей ОАО «КАМАЗ-Дизель» она достигается в течение 30 часов непрерывного процесса. Наряду с существующими трудностями в технологии изготовления азотированных коленчатых валов, остаются нерешенными вопросы эксплуатационно-ремонтного цикла и ремонтнопригодности азотированного коленчатого вала КАМАЗ, а также целесообразность такого решения [7].

Несмотря на высокую прочность поверхности шеек азотированного коленчатого вала, при работе двигателя будут неизбежными износы и задиры по шейкам из-за попадания абразива, внезапных потерь давления масла и других факторов эксплуатации, что в среднем через 300 тыс. км ведёт к необходимости перешлифовки коленчатого вала. Допустимое уменьшение размера шеек от номинального до ремонтного размера не превышает 0,4 мм на сторону из-за резкого уменьшения твердости (кривая 3, рисунок 1), износостойкости и прочности шеек коленчатых валов, так как после перешлифовки не остается упрочненного слоя. Однако, при указанной глубине азотированного слоя до 0,4 мм и ремонтных размерах шеек и вкладышей, предусматривающих перешлифовывание на 0,5 мм по диаметру (0,25 мм на сторону), коленчатый вал с азотированием допускает одно перешлифовывание [8], [9]. После данной операции требуется производить повторно термообработку или наплавку, дающими необходимую твердость, что неприменимо для шеек, упрочненных азотированием из-за того, что повторная индукционная закалка или наплавка не ложится на азотированный слой, а процесс снятия азотированного слоя посредством шлифовки является трудоемким и требует расхода

большого количества шлифовальных кругов. Повторное упрочнение азотированием, заложенное в руководстве по эксплуатации двигателей Е-2 и Е-3 [9], в условиях эксплуатации ввиду его сложности и отсутствия оборудования, а также его неприемлемости из-за недостижимости требуемой степени очистки от масла и отложений коленчатого вала, невозможно. Все эти факторы делают коленчатый вал неремонтпригодным, и он отправляется в утиль.

Таким образом, экономическую эффективность эксплуатации новых двигателей с азотированными коленчатыми валами будет определяться уровнем задиростойкости шеек и их деформацией. Вместе с тем, при условии снижения вероятности задира шеек в 2 раза количество дефектных валов, приходящих в ремонт, всё равно составит более 10%. А вследствие того, что вопросы задиростойкости шеек азотированного коленчатого вала недостаточно изучены, особенно после обработки до ремонтных размеров, остается неясным, в какой степени будет снижаться сопротивление усталости, поэтому из-за низкой ремонтпригодности такие валы выбраковываются.

Анализ вышеизложенного материала позволяет сделать вывод, что повышение эффективности применения азотированных коленчатых валов является важной и не только технической, но и экономической задачей. Так, при среднем сроке службы двигателя 10 лет и вероятности выбраковки коленчатых валов в течение года 0,01, при устоявшихся процессах выпуска и эксплуатации средняя годовая потребность их в замене составит около 5% от годового выпуска двигателей, при вероятности выбраковки 0,03 – около 15%, при вероятности выбраковки 0,05 – около 24%, а при вероятности выбраковки 0,07 – около 30% от годового выпуска двигателей. Это связано с тем, что в эксплуатации находятся существенно больше двигателей, чем их годовой выпуск. Допустимость уровня выбраковки связана с одной стороны возможностями производственных мощностей, а с другой уровнем потерь потребителей. Для примера, при среднерыночной цене коленчатого вала 93 тыс. руб., программе производства 50 тысяч двигателей и уровне годовой выбраковки 0,03 потери потребителей составят 697,5 млн. руб. Поэтому исходя из опыта отечественных условий эксплуатации и сервиса в новых конструкциях ко-

ленчатых валов внедрена комбинированная термообработка шеек ТВЧ и азотирования одновременно. Однако в эксплуатационных условиях при существующем положении необходима глубокая проработка способов ремонтных воздействий, в том числе и различных методов восстановления шеек (наплавка, напыление), упрочненных азотированием, коленчатого вала двигателя КАМАЗ.

Для обеспечения возможности наплавки шеек азотированных валов в эксплуатации необходимо снятие азотированного слоя с минимальными затратами ресурсов и времени. Одной из технологий, отвечающих данным требованиям, является разработанная технология ремонта со снятием азотированного слоя электроэрозионным способом [10].

Снятие азотированного слоя с шеек коленчатых валов осуществляется электроэрозионной обработкой на глубину 0,4 мм в состояние основной структуры, что обеспечивает возможность индукционной закалки или наплавки без появления на коленчатых валах трещин, отслоений, пузырений. После этого шейки вала упрочняют ТВЧ и перешлифовывают в условиях завода-изготовителя или наплавляют с последующей шлифовкой и полировкой в условиях ремонтных производств в установленные размеры. Последующая перешлифовка шеек на установленный размер позволяет восстанавливать до 80% коленчатых валов с задирами шеек.

При проведении экспериментальной оценки работоспособности и эффективности разработанной технологии был изготовлен электрод из графита по ширине шейки, состоящей из двух половин, охватывающих шейку (рисунок 2).

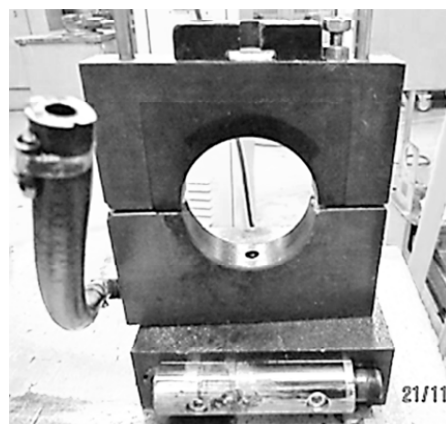
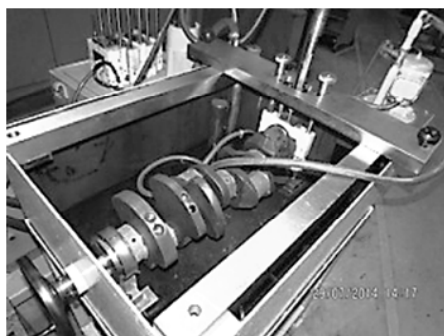


Рисунок 2. Внешний вид изготовленного графитового электрода



а)



б)

Рисунок 3. Обработка шеек коленчатого вала на электроэрозионном станке: а) коленчатый вал, погружённый в масляную ванну; б) внешний вид электроэрозионного станка

Для удаления азотированного слоя электрод устанавливался на шейку коленчатого вала, после чего коленчатый вал с электродом устанавливался в электроэрозионный станок в масляную ванну (рисунок 3). Станок обеспечивает необходимую плотность тока, за счет чего азотированный слой выжигается. Обработка велась поочередно коренных и шатунных шеек. Далее, в условиях ремонтного производства шейки наплавлялись (в работе использовалась наплавка под слоем флюса АН-348А проволокой 1,6Нп-30ХГСА), и шлифовались в номинальный размер.

В условиях завода-изготовителя после снятия азотированного слоя производят закалку ТВЧ, после чего шлифуют шейки коленчатого вала, подвергают финишной обработке суперфинишированием и полированием.

Ремонт с наплавкой в условиях эксплуатации производят по дефектным шейкам, а в условиях завода-изготовителя с закалкой ТВЧ по всем шейкам.

Также, разработаны опытные образцы современного оборудования для использования в условиях заводского и ремонтного производства, позволяющего снимать азотированный слой одновременно со всех шеек коленчатого вала (рисунок 4).

На автомобилях КАМАЗ в настоящее время проходят опытную эксплуатацию коленчатые валы с наплавленными шейками после электро-

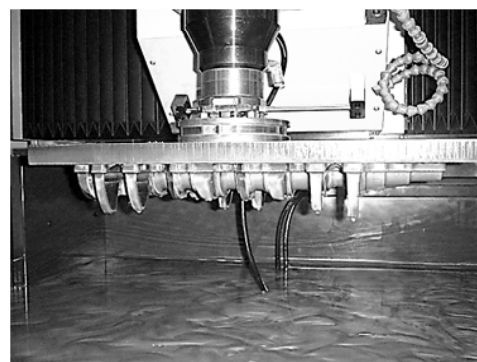


Рисунок 4. Установка для одновременной электроэрозионной обработки всех шеек коленчатого вала

эрозионной обработки в комплекте с номинальными вкладышами после наплавки.

Таким образом, как видно из представленного анализа, азотированные коленчатые валы являлись практически неремонтопригодными и утилизировались, что крайне невыгодно с точки зрения экономической эффективности эксплуатации транспортных средств. Вместе с тем, предложенная технология снятия азотированного слоя электроэрозионным способом, показавшая при испытаниях свою работоспособность и эффективность, позволяет проводить ремонт азотированных коленчатых валов как в условиях ремонтного производства, так и в условиях завода-изготовителя с использованием стандартного оборудования со значительной экономией ресурсов по сравнению с существующими методами ремонта.

11.03.2015

**Список литературы:**

1. Авдонькин, Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации / Ф.Н. Авдонькин. – М: Транспорт. – 1993. – 350 с.
2. Денисов, А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей / А.С. Денисов. – Саратов: СГТУ. – 1999. – 352 с.

3. Денисов, А.С. Анализ причин эксплуатационных разрушений шатунных вкладышей / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Двигателестроение, 1981. – № 9. – С.37–40.
4. Денисов, А.С. Изменение условий смазки шатунных подшипников в процессе эксплуатации автомобильного дизеля / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Двигателестроение. – 1986. – № 4. – С.44–46.
5. Чернышов, Г.Д. Ремонт двигателей ЯМЗ / Г.Д. Чернышов, Г.И. Созинов, В.М. Кротов, В.А. Бесчастнов // Москва: Транспорт. – 1974. – С. 21-30).
6. Исследование ремонтпригодности коленчатых валов двигателей КамАЗ. Технический отчет НТЦ «КАМАЗ» // Набережные Челны. – 2004. – 56с.
7. Денисов, А.С. Совершенствование конструкции коленчатого вала на условия их смазки / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, Н.И. Светличный, А.А. Гафиятуллин // Двигателестроение. – 2003. – №3. – С. 24-26.
8. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту двигателей 740.11 -240; 740.13-260; 740.14-300 // Набережные Челны. – 2001. – ОАО «КАМАЗ». – 131с.
9. Руководство по эксплуатации двигателей КамАЗ экологических классов ЕВРО-2 и ЕВРО-3 // Набережные Челны: ОАО «КАМАЗ». – 2007. – 125 с.
10. Патент RU№2487002. Способ ремонта упрочненных азотированием шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания / Галиев Р.К., Кулаков А.Т., Денисов А.С., Гафиятуллин А.А. – опубл. 10.07.13. – Бюл. № 10. – 5 с. : ил.

Сведения об авторах:

**Денисов Александр Сергеевич**, заведующий кафедрой автомобиля и автомобильное хозяйство Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., доктор технических наук, профессор, e-mail: denisov0307@yandex.ru

**Галиев Рафис Кашфелович**, главный инженер завода двигателей ОАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, соискатель кафедры автомобиля и автомобильное хозяйство Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., e-mail: galiev@kd.kamaz.org

**Кулаков Александр Тихонович**, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта Набережночелнинского института (филиала) «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет», доктор технических наук, e-mail: alttrak09@mail.ru

**Коваленко Сергей Юрьевич**, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта транспортного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, e-mail: kovalenko-osu@yandex.ru