

УДК 620.16

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ВОССТАНОВЛЕННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. С.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ;
канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Эксплуатационные испытания восстановленных коленчатых валов современных тракторов показали, что поломки происходят из-за снижения усталостной прочности. Одним из способов повышения выносливости коленчатого вала является упрочнение методом поверхностного пластического деформирования галтелей шатунных шеек после восстановления наплавкой. Проведенные исследования по восстановлению изношенных шеек коленчатых валов двигателя Д-240 с последующим упрочнением галтелей выявили значительный резерв повышения усталостной прочности, составляющий 25...30 % и более.

Введение. Коленчатый вал – одна из важных дорогостоящих деталей двигателя, в значительной степени определяющая его ресурс. Особенно быстро выходят из строя коленчатые валы тракторных двигателей, работающих в более тяжелых условиях по сравнению с автомобильными. Если средняя эксплуатационная нагрузка автомобильных двигателей составляет 50...60 %, то тракторных – при выполнении многих сельскохозяйственных работ – 95...98 %. Удельное давление на наиболее нагруженные шатунные шейки коленчатых валов тракторных двигателей в 1,5...2 раза выше, чем у автомобильных. В процессе эксплуатации сопротивление усталости тракторных коленчатых валов снижается на 25...30 %. Основными причинами выбраковки коленчатых валов двигателей являются износ шеек и их поломки в области галтелей (рис. 1).



Рис. 1. Характерные виды отказов и поломок коленчатых валов двигателей

Локальный характер разрушения коленчатых валов показывает, что кинетика разрушения определяется развитием трещин. Механизм процесса разрушения при длительном воздействии нагрузки сводится к постепенному росту микротрещин до критического размера. Возникновение трещин на галтелях и на расстоянии до 10 мм от них значительно снижает сопротивление усталости, и валы с таким дефектом не подлежат восстановлению. Что касается возможности восстановления коленчатых валов с трещинами на шейках, то валы, имеющие на шейках трещины длиной не более 10...12 мм, глубиной до 3 мм, могут быть восстановлены последующей наплавкой без существенного снижения сопротивления усталости. Изношенные

валы с коренными и шатунными шейками, перешлифованные на все ремонтные размеры, но пригодные для восстановления путем нанесения покрытий до номинальных размеров, составляют 65...75 % [1–3].

При наплавке легирующими материалами без применения термообработки на галтелях между шейками и щеками образуется зона сплавления, имеющая низкую пластичность, а в зоне термического влияния из-за резкой структурной неоднородности возникают трещины, микротрещины, усиливается концентрация напряжений, снижается сопротивление усталости. При этом из-за значительного термического влияния происходит деформация вала. Таким образом, несмотря на то, что в наплавленном слое образуется структура мартенсита, обеспечивающая сжимающие напряжения, низкая пластичность в зоне сплавления служит основной причиной снижения сопротивления усталости.

Долговечность коленчатых валов в значительной степени определяется сопротивлением усталости. Отрицательное влияние на сопротивление усталости оказывают растягивающие напряжения, которые вызываются неоднородностью пластической деформации, различием коэффициентов расширения основного и наплавленного металлов, структурными превращениями в наплавленном металле и зоне термического влияния. Результатом возникновения остаточных растягивающих напряжений являются низкая прочность и малая пластичность слоя, образующегося в процессе наплавки на границе сплавления основного и наплавочного металлов. Восстановление коленчатых валов тракторных двигателей плазменной наплавкой порошковыми сплавами малогабаритным плазматроном без заправки галтелей снижает усталостную прочность до 45 %.

С целью повышения усталостной прочности деталей применяют технологические процессы, основанные на изменении физических свойств, химического состава, структуры и напряженного состояния поверхностных слоев материала деталей [4; 5]. Наибольшее распространение получили механические способы упрочнения методом поверхностного пластического деформирования (ППД) благодаря таким достоинствам, как:

- простота изготовления;
- невысокая стоимость;
- применение практически для всех видов металлов и для деталей любой формы;
- создание глубины упрочнённого слоя до 20 мм;
- границы наклёпанной поверхности не являются зонами пониженной прочности;
- эффективность наклёпа в сравнении с другими методами значительно меньше зависит от режима наклёпа;
- при повышении усталостной прочности ударная вязкость снижается значительно меньше, чем при обработке другими способами.

Испытания по определению усталостной прочности проводили на образцах (рис. 2), имитирующих шейку коленчатого вала с галтелями. Образцы изготовлены из стали марки 45X, соответствующей марке стали коленчатых валов двигателя Д-240.

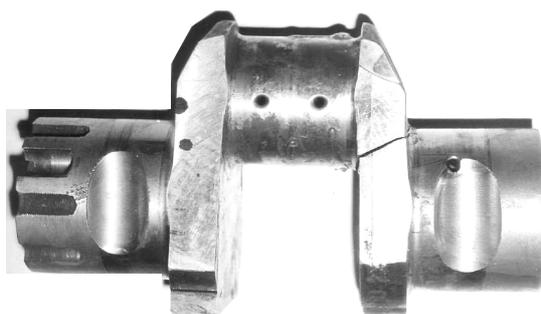


Рис. 2. Модель натурального образца коленчатого вала

Испытания проводили на резонансной машине УП-50, позволяющей создать изгибающий момент на испытуемом образце по симметричному циклу на базе $2 \cdot 10^6$ циклов [6].

Исследования проводились на натуральных образцах с элементом шатунных шеек, выполненных в двух сериях: 1 серия – без упрочнения; 2 серия – с упрочнением дробью $\varnothing 3$ мм.

Упрочнение осуществляли специальным приспособлением при усилии накатывания до 8 кН, $n = 251/\text{мин}$, $\tau = 60$ с.

Для закрепления натуральных образцов на испытательной машине их подвергали дополнительной обработке. Щёки натуральных образцов с элементом шатунных шеек фрезеровались (в зоне вероятного разрушения) в размер, равный 105 мм для всех образцов. Перед нагружением образцы тарировали с помо-

стью динамометра. По тарировочному графику устанавливалась амплитуда деформации в зависимости от испытательного усилия.

В каждой серии испытывалось 2 образца, что при испытании натуральных моделей соответствует точности 7...8 %. Точность нагрузки при испытании поддерживалась в диапазоне $\pm 5\%$.

Предварительно установлены следующие режимы упрочнения: давление воздуха 0,46...0,48 МПа; продолжительность обработки 5 мин. Выбранные режимы упрочнения обеспечивают насыщение поверхности галтелей следами отпечатков и достаточны для одновременного упрочнения наплавленного слоя. Статическая тарировка осуществлялась с помощью динамометра типа ДОСМ-1000. Испытание образца считалось законченным с момента зарождения усталостной трещины или после отработки им без разрушения принятой базы испытаний. Общий вид образцов, доведенных до разрушения, представлен на рисунке 3.

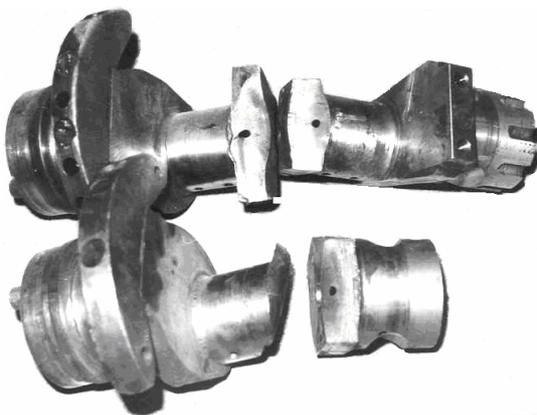


Рис. 3. Общий вид образцов после испытаний

Момент появления усталостной трещины легко определяется по изменению режима работы установки (увеличение амплитуды колебаний при заданной частоте). Предел выносливости определялся с точности до 10 МПа.

Представленные на рисунке 4 результаты исследования свидетельствуют о том, что упрочнение галтелей восстановленных коленчатых валов пневмодинамическим наклепом шариками диаметром 3 мм увеличивает их предел выносливости при изгибе от 40...60 до 90 МПа, т.е. в 1,5 раза и более, а по количеству циклов нагружения при одинаковой нагрузке 5 кН – более чем в 5 раз.

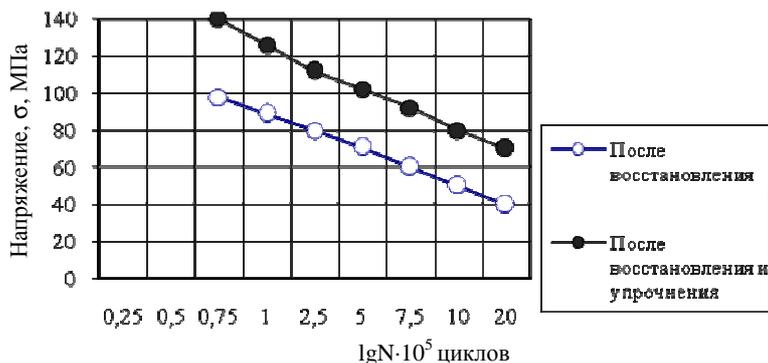


Рис. 4. Кривые усталости натуральных образцов

Глубина наклепа определяется по эмпирической формуле

$$\delta_n = \frac{C d_d v_d}{U} \sqrt{\frac{\rho(1-K^2)}{6gHB}}, \quad (1)$$

где C – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств материала, $C = 18...20$; d_d – диаметр дроби; v_d – скорость дроби при встрече с обрабатываемой поверхностью; U – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей $U = (1 + 0,07R)$; R – радиус кривизны сферической дроби; ρ – плотность материала деформирующего элемента; K – коэффициент восстановления при ударе; g – ускорение свободного падения; HB – твердость по Бринеллю.

Для стальных шариков $\varnothing 3$ мм $v_d = 17,7$ м/с при давлении в пневмосети $P = 0,4$ МПа. При этом следует отметить, что для увеличения усталостной прочности коленчатого вала недостаточно упрочнения галтелей только на шатунных шейках, так как начало зарождения трещины может появиться в неупрочненных галтелях на коренных шейках.

Для расчета надежности деталей машин с повреждениями методами механики разрушения необходимо знать значение коэффициента интенсивности напряжений K_1 (КИН). Выражение для КИН в коленчатом валу [4] в общем виде можно записать следующим образом:

$$K_1 = Y_B \sigma \sqrt{2c}, \quad (2)$$

где Y_B – геометрический фактор для вала; σ – напряжение изгиба ($\sigma = 32M/\pi D_u^3$); M – изгибающий момент; $2c$ – длина трещины по поверхности шейки вала; D_u – диаметр шейки вала.

В процессе развития трещины жесткость вала снижается, и большая часть трещины развивается в зоне, где отсутствуют остаточные напряжения сжатия.

Полученные данные о геометрическом факторе для валов и диаграмме усталостного разрушения позволяют рассчитать размер неразвивающихся трещин при напряжении и числе циклов, которые необходимы для развития трещин от одного размера до другого.

Зависимость порогового напряжения σ_{th} , при котором трещина не развивается, от размера трещины в валу получена по формуле

$$\sigma_{th} = \frac{K_{th}}{Y_B} \sqrt{2c}, \quad (3)$$

где K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

Эти данные позволяют оценить относительную опасность трещин разного размера, так как в долговечности вала стадия развития усталостной трещины занимает значительную долю.

Известно [5], что при циклическом нагружении у вершины трещины образуются две зоны: статическая и циклическая. При переходе роста трещины пороговой скорости происходит скачкообразное изменение размера пластической зоны на фронте трещины и образование усталостных бороздок. Размер статической зоны связан с пределом текучести материала; для поверхностной трещины можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\frac{r_p}{l} = 0,25 \left(\frac{\sigma_{max}}{\delta_y} \right)^2, \quad (4)$$

где r_p – размер статической зоны; l – длина трещины; σ_{max} – максимальное напряжение; δ_y – предел текучести.

Это позволяет согласно условию подобия локального напряженно-деформированного состояния оценивать состояние и ресурс материалов валов по условиям одной и той же величины отношения размера пластической деформации к длине трещины.

В связи с тем, что при анализе усталостного разрушения реальных объектов часто важно знать, каков вклад стадии зарождения и стадии распространения трещины в общую долговечность, в некоторых случаях использовали коленчатые валы с заранее созданными концентраторами [6], которыми служили отверстия, выполненные сверлом диаметром 0,6 мм. Совпадение кинетических кривых развития трещины в коленчатых валах с концентратором, с соответствующими участками кинетических кривых в идентичных валах без концентратора, свидетельствует об инвариантном характере закона развития усталостных трещин в чугунных коленчатых валах при наличии концентраторов выбранных размеров. Несимметричность развития усталостной трещины по обе стороны от концентратора оказалась незначительной. Поэтому при построении зависимости длины трещины от числа циклов, не допуская большой погрешности, использовали значение увеличения размера одного конца трещины, принимая его за полудлину трещины. Точно также осуществляли построение кинетических кривых и при отсутствии концентраторов. Однако в этом случае наблюдение за развитием трещины удалось вести с того момента, когда ее размеры уже достигали 2...3 мм. Дальнейший рост одного из концов трещины фиксировали непосредственно по шкале окуляра микроскопа.

Исследования показали преимущественную роль стадии распространения усталостной трещины в общей доле долговечности по сравнению со стадией зарождения этой трещины [7–8]. Даже если отнести к стадии зарождения трещины период ее развития до 2 мм, то и тогда эта стадия для коленчатого вала с неупрочненной галтелью составляет несколько более 10 %, а для коленчатого вала с упрочненной галте-

лю – около 40 %. Рассматриваемые образцы испытывали при существенно отличных номинальных напряжениях: для упрочненного методом ППД $\sigma_n = 350$ МПа, для неупрочненного $\sigma_n = 200$ МПа.

В заключение исследования можно сделать **вывод**, что основными факторами, способствующими повышению сопротивления усталости восстановленных коленчатых валов, могут служить следующие:

- 1) создание напряжений сжатия в поверхностных слоях;
- 2) сближение значений коэффициента линейного расширения основного и наплавочного металлов;
- 3) выбор глубины проплавления. К восстановлению наплавкой рекомендуются изношенные коленчатые валы с трещинами на шейках длиной до 12 мм и глубиной до 3 мм. Поэтому проплавление поверхности шейки, галтелей – необходимое условие не только получения высокой прочности сцепления, но главным образом устранения трещин. Проплавление шеек на глубину более 1,5 мм приводит к значительному увеличению деформаций;
- 4) усталостная прочность коленчатых валов Д-240 из стали 45Х, прошедших восстановительный ремонт с плазменной наплавкой шатунных и коренных шеек и последующей шлифовкой галтельных переходов, может быть значительно увеличена за счёт внедрения упрочнения галтелей пневмодинамическим наклёпом шариками диаметром 3 мм;
- 5) предел выносливости при изгибе натурных моделей коленчатых валов с упрочнёнными галтелями увеличивается на 50 % и более, а их долговечность при одинаковом уровне испытательной нагрузки возрастает более чем в 5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. Нигородов, В.В. Восстановление коленчатых валов автотракторных двигателей / В.В. Нигородов, В.Г. Ерошкин. – М.: ЦНИИТЭИ, 1981. – 49 с.
3. Горохов, В.А. Ремонт и восстановление коленчатых валов / В.А. Горохов, П.А. Руденко. – М.: Колос, 1978. – 159 с.
4. Об усталостной трещиностойкости коленчатых валов / А.В. Прокопенко [и др.] // Проблемы прочности. – 1983. – № 5. – С. 53–55.
5. Романов, А.Н. Пороговая скорость роста усталостной трещины и циклическая трещиностойкость металлов / А.Н. Романов, О.В. Иванова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – № 5. – С. 35–41.
6. Завистовский, С.Э. Анализ технологических способов упрочнения коленчатых валов ДВС методом ППД / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Материалы, технологии и оборудования в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. / под общ. ред. П.А. Витязя. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2009. – Т. 3. – С. 165–168.
7. Завистовский, С.Э. Исследование влияния технологических режимов пневмодинамического упрочнения на изменение прочности и твердости галтелей серийных коленчатых валов тракторов «Беларусь» / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. – Новополоцк, 2013. – С. 183–186.
8. Исследование усталостной прочности коленчатых валов, упрочненных методом ППД / М.А. Белоцерковский [и др.] // Материалы, технологии и оборудования в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. / под общ. ред. П.А. Витязя. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2009. – Т. 2. – С. 235–238.

Поступила 27.01.2015

RESIDUAL LIFE OF REMANUFACTURED CRANKSHAFTS

S. ZAVISTOVSKY, V. ZAVISTOVSKY

Performance tests of recovered crankshafts of modern tractors showed that breakages occur due to fatigue strength reduction. One of the ways to improve the endurance of the crankshafts is the consolidation of crankpins after their restoration by welding using the method of surface plastic deformation of fillets. Studies on restoration of worn out crankshaft of engine D-240 journals, followed by hardening of fillets showed a significant increase in fatigue strength reserve which amounts to 25...30 % or more.