

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА И ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Инж. ВИГЕРИНА Т. В.

Полоцкий государственный университет

Чугунные коленчатые валы (КВ) широко применяются как на отечественной технике (ГАЗ, ВАЗ, УАЗ, ИЖ), так и на импортных двигателях [1]. В Республике Беларусь чугунные КВ не выпускаются, поэтому усовершенствование технологий их ремонта актуально для решения вопросов импортозамещения. Затраты на устранение неисправностей и восстановление ресурса машин при их капитальном ремонте составляют 60–70 % от затрат на их производство. Нарботка двигателей после капитального ремонта от наработки новых – 45–50 %, что обусловлено более низким уровнем технологии ремонта машин по сравнению с технологией их изготовления.

В число основных деталей двигателей входят КВ, которые в значительной мере определяют надежность этих двигателей. Наиболее нагруженные элементы, определяющие ресурс вала, – шейки, поэтому важнейшими восстанавливаемыми геометрическими параметрами КВ являются диаметры коренных и шатунных шеек, а также соосность коренных шеек. Для восстановления шеек валов двигателей используют множество способов: наплавку и напыление различными материалами, припекание и др. Анализ существующих процессов восстановления показывает, что наплавка и напыление являются самыми производительными процессами. Они обеспечивают возможность изменения вложения количества тепловой энергии в материал заготовок, использования присадочных материалов с разным химическим составом, различных флюсов, введения легирующих добавок и др. Качество ремонта также во многом зависит от оценки предремонтного состояния валов, а именно – от его процентного соотношения между валами. После оценки предремонтного состояния валов их направляют непосредственно на восстановление с нанесением покрытий или шлифование под ремонтные размеры.

Целью проводимых автором исследований являлись анализ предремонтного состояния коленчатых валов и возможность повышения износостойкости шеек восстановленных валов с использованием плазменного напыления композиционного материала, содержащего медь.

Методики исследования. Автором были исследованы износы коренных и шатунных шеек и несоосность коренных шеек КВ двигателей ЗМЗ-53. Минимальные объемы выборок n деталей для исследования их технического состояния, приведенные в табл. 1, определяли по формуле (ГОСТ 17510–72)

$$n = \frac{\sigma^2 t_{\beta}^2}{\varepsilon^2},$$

где σ^2 – статистическая оценка дисперсии случайной величины (в данном случае износа поверхности и несоосности шеек); t_{β} – табличный (табулированный) коэффициент, зависящий от β принятой доверительной вероятности (при точности $\beta = 5\%$ и вероятности 0,95 $t_{\beta} = 1,96$); ε – доверительный интервал, т. е. интервал значений, которые покроют неизвестный параметр.

Таблица 1

**Минимальные объемы выборок коленчатых валов
двигателей ЗМЗ-53**

| Параметр | σ^2 | ε | n |
|-------------------------|------------|---------------|-----|
| Износ коренных шеек | 0,00154 | 0,01 | 59 |
| Износ шатунных шеек | 0,00147 | 0,01 | 56 |
| Соосность коренных шеек | 0,00085 | 0,01 | 33 |

Износ (отклонение от доремонтного размера) шеек валов определяли по наиболее изношенной шейке в направлении наибольшего износа с помощью микрометров МК 50-75 по ГОСТ 6507–90. Отклонение от соосности средней коренной шейки вала относительно край-

них измеряли на заводском индикаторном стенде.

Образцы для испытаний на износостойкость получали следующим образом: покрытия наносили плазменным напылением на шейки коленчатого вала. После напыления шеек проводили их шлифование на круглошлифовальном станке модели 3A151 до диаметра $70_{-0,019}$ и шероховатости Ra 0,32–0,63 мкм. Далее из них на токарном станке 16K20 вырезали образцы цилиндрической формы высотой 15 мм. Толщина напыленного слоя составляла 0,6 мм.

Режимы напыления смеси порошков (самофлюсующегося, железного, алюминиевого, медного в различном процентном соотношении): сила тока 325 А, расход плазмообразующего газа (аргона) 25 л/мин, расстояние от сопла до напыляемой поверхности 150 мм, гранулометрический состав порошка 100–160 мкм, диаметр сопла плазменной горелки 5,5 мм.

Интенсивность изнашивания определяли на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск – колодка» путем измерения массовой интенсивности изнашивания по ГОСТ 30480–97. В качестве контртела использовали вкладыши подшипников, из которых вырезали фрагменты размерами 12×12 мм. Биметаллические вкладыши представляют собой стальную основу, плакированную алюминиевым сплавом АО20-1.

В качестве смазки исследуемой пары трения использовали промышленное масло И-20А (ГОСТ 8581–78). Его вводили в зону трения без давления частичным погружением образцов в масляную ванну, при этом создавали режим смешанного трения, дающего на основании анализа работы подшипников скольжения наибольший износ. С целью ужесточения режимов испытаний в масло добавляли (0,3 % по массе) абразивные частицы SiO_2 и Al_2O_3 размером менее 30 мкм. Скорость скольжения составляла 2,93 м/с. Давление на трущихся поверхностях было определено по условию прочности материала вкладыша и составляло 7 МПа.

Основная часть исследования. Сведения об измерениях были отображены в виде эмпирических полигонов распределений (рис. 1–3), к каждому из которых подбирали один из наиболее близких теоретических законов распределения из числа: нормального, Вейбулла, показательного, Релея и гамма-распределения.

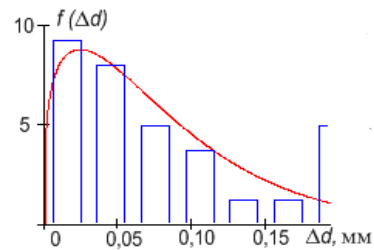


Рис. 1. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ коленчатых валов двигателей по максимальному износу коренных шеек Δd

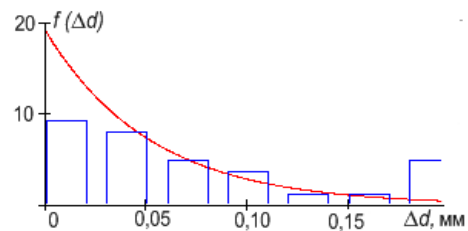


Рис. 2. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ коленчатых валов двигателей по максимальному износу шатунных шеек Δd

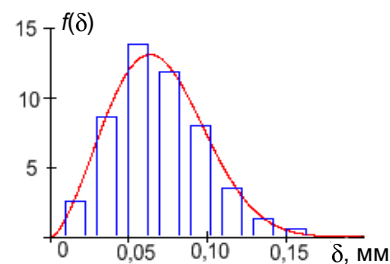


Рис. 3. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\delta)$ коленчатых валов двигателей по отклонению от соосности δ средней коренной шейки относительно крайних коренных шеек

Соответствие теоретических распределений данным экспериментов определяли с помощью критерия Пирсона χ^2 . Оказалось, что изучаемые параметры близко описываются законом Вейбулла (табл. 2), за исключением износа шатунных шеек, который лучше описывается показательным законом.

Наиболее распространенное повреждение деталей данного класса – естественный износ шеек, среднее значение которого находится в пределах 30–90 мкм, а максимальное не превышает 200 мкм. Наибольшая величина износа наблюдается на валах после схватывания шеек со вкладышами (аварийный износ). Как правило, коренные шейки изнашиваются интенсивнее шатунных в 1,3–1,5 раза. Больше изношены задние коренные и передние шатунные шейки. 70–75 % валов вышли из ремонтных размеров и требуют наплавки.

Результаты статистического анализа геометрических параметров коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, направляемых на восстановление

| Параметр | Закон распределения параметров в дифференциальном и интегральном выражениях | Критерий χ^2 | |
|--|---|-------------------|-----------|
| | | расчетный | табличный |
| Износ (Δd) коренных шеек | Вейбулла $F(\Delta d) := 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Delta d}{0,084}\right)^{1,258}\right]$ $f(\Delta d) := 14,98 \exp\left[-\left(\frac{\Delta d}{0,084}\right)^{1,258}\right] \left(\frac{\Delta d}{0,084}\right)^{0,258}$ | 0,842 | 5,99 |
| Износ (Δd) шатунных шеек | Показательный $F(\Delta d) := 1 - \exp(-19,149\Delta d)$ $f(\Delta d) := 19,1489 \exp(-0,19489\Delta d)$ | 1,372 | 7,81 |
| Несоосность (δ) коренных шеек | Вейбулла $F(\delta) := 1 - \exp\left[-\left(\frac{\delta}{0,077}\right)^{2,487}\right]$ $f(\delta) := 32,3 \exp\left[-\left(\frac{\delta}{0,077}\right)^{2,487}\right] \left(\frac{\delta}{0,077}\right)^{1,487}$ | 1,383 | 9,49 |

В капитальный ремонт направляют преимущественно те двигатели, коленчатые валы которых существенно изношены и требуют нанесения покрытий. Недопустимую несоосность коренных шеек имеют 5–10 % валов. Средняя несоосность коренных шеек находится в пределах 0,03–0,05 мм. Предельная несоосность шеек обусловлена их заклиниванием в шатунных или коренных подшипниках. При схватывании валов в подшипниках наблюдаются цвета побежалости, что свидетельствует о снижении твердости поверхностного слоя. Если не выполнять упрочняющую обработку, то валы с такими шейками в будущем после обработки под ремонтные размеры повторно претерпят схватывание с заеданием. Валы, которые претерпели схватывание и заедание, требуют шлифования через 2–3 ремонтных размера или наплавки с последующей обработкой под номинальный размер. При этом наплавки одной шейки требуют 78,0 % от всех наплавляемых валов, двух шеек – 22,0 % и 3–5 шеек – 0,4 %.

От 2 до 4 % КВ поступают в составе двигателей уже изломанными, а 1 % – с «подрезанными» галтелями. В ремонт могут направляться двигатели, износ КВ у которых инструментальными измерениями практически не ощуща-

ется (около 4 %). Для таких валов достаточно лишь полирование шеек.

Основная причина выбраковки КВ – наличие опасных эксплуатационных усталостных трещин. По этому показателю выбраковывают от 17 до 22 % КВ.

Для восстановления шеек КВ использовали смесь порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (0–15 %) и никель-алюминиевого ПТ-НА-01 (5–20 %). Изменение состава смеси осуществляли за счет изменения процентного соотношения медного и никель-алюминиевого порошков. Алюминий является одним из наиболее сильных восстановителей для большинства металлов при напылении. С никелем он вступает в экзотермическую реакцию с выделением теплоты, что повышает адгезионную и когезионную прочность покрытий. Вступая в реакцию с кислородом, алюминий может выступать в качестве упрочняющей фазы и повышать износостойкость покрытия. Медь относится к элементам, обеспечивающим антифрикционность материалов, но при этом ее влияние на это свойство неоднозначно [2].

Структура полученного порошкового покрытия гетерогенная и состоит из твердых ча-

стиц, выдерживающих нагрузку на вал, и мягкой, истирающейся в работе составляющей, которая обеспечивает наличие масла в местах выработки. На рис. 4 прослеживается расположение меди между спеченными частицами, что обусловлено их исходной формой и играет важную роль в процессе триботехнического взаимодействия деталей. Отсутствие меди в поверхностном слое объясняется, скорее всего, интенсивным ее выгоранием. Ближе к подложке прослеживаются следы меди, а также локальные участки сплошной меди, что свидетельствует о ее начальном обособленном расположении.

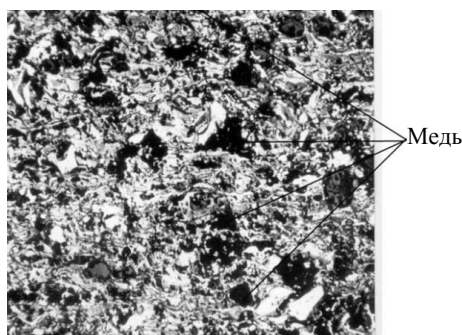


Рис. 4. Общий вид материала покрытия, полученного плазменным напылением из смеси порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01, железного ПЖ-5М, медного ПМС-1 и никель-алюминиевого ПТ-НА-01 ($\times 100$)

Тепловой режим пары трения обусловлен соотношением конкурирующих процессов тепловыделения и теплопередачи. При относительно постоянных показателях тепловыделения решающее значение имеет теплопередача. Медь, обладая высокой теплопроводностью, увеличивает теплоотвод из зоны трения в соединении и снижает температуру материала в контакте [3], тем самым повышая износостойкость. Влияние содержания меди в покрытии на интенсивность изнашивания и его ТКЛР приведено в табл. 3.

При наличии в исходном материале покрытия трущегося соединения до 5 % меди она оказывает минимальное воздействие на свойства трибосопрежения. Интенсивность изнашивания в этом случае максимальна, что можно объяснить низким содержанием меди и незначительным повышением теплопроводности материала покрытия. Если на начальном этапе эксплуата-

ции трибопары очаги меди и присутствуют в материале, исполняя роль антифрикционных добавок, то к концу приработки соединения наблюдается скачкообразный рост износа, что может свидетельствовать об отсутствии медной составляющей.

Таблица 3

Зависимость интенсивности изнашивания трущегося соединения от среднего содержания меди в порошке для напыления

| Содержание меди в порошке для напыления, % мас. | Интенсивность изнашивания, $\times 10^{-6}$ г/м | |
|---|---|---------|
| | Вал | Вкладыш |
| 5 | 4,2 | 8,9 |
| 10 | 4,0 | 7,8 |
| 15 | 4,5 | 7,9 |

При наличии меди в количестве 10 % предполагаются возрастание теплопроводности материала и снижение интенсивности изнашивания. В начальный период работы соединения наблюдался резкий скачок интенсивности изнашивания, что объясняется перераспределением меди по поверхности трения и ее участием в трении как антифрикционного материала. В этом случае интенсивность изнашивания пары трения наименьшая – $4,0 \cdot 10^{-6}$ г/м, что на 3–5 % ниже интенсивности изнашивания валов, восстановленных напылением смеси порошков без содержания меди.

При содержании меди 15 % на начальных этапах наблюдалось значительное снижение интенсивности изнашивания трущегося соединения. Однако затем происходил ее скачкообразный рост. Это может свидетельствовать о перераспределении меди в начале процесса, затем о концентрации ее в отдельных местах поверхности. Это сказывается, во-первых, на равномерности износа и, во-вторых, в местах наибольшей концентрации меди наблюдаются микровыворы поверхности вкладыша, произошедшие вследствие возникновения локальных мостиков сварки [4]. Все вышеперечисленное ведет к росту температуры и увеличению износа трущегося соединения.

Таким образом, минимальная интенсивность изнашивания как всего соединения, так и его деталей наблюдается при содержании меди, близком к 10 % [5]. При наличии меди

в составе порошкового материала 15 % и более интенсивность изнашивания пары трения увеличивается. Это можно объяснить тем, что в процессе триботехнического взаимодействия возникают локальные очаги схватывания и микрофрагментарного вырыва как в покрытии, так и в материале сопряженной детали. Содержание меди менее 5 % влияния на свойства покрытия практически не оказывает, и интенсивность изнашивания трибопары в данном случае максимальна.

ВЫВОДЫ

Определено техническое состояние коленчатых валов, поступающих на восстановление, из которых 25–30 % можно шлифовать до следующего ремонтного размера, а около 70–75 % валов выходят из ремонтных размеров и требуют восстановления с нанесением покрытий. Основной причиной выбраковки от 17 до 22 % коленчатых валов является наличие опасных эксплуатационных усталостных трещин. Исследования износов и несоосности коренных шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 близко описываются законом Вейбулла, а износ шатунных шеек – показательным законом.

Предложено восстановление шеек чугунных коленчатых валов плазменным напылением смесью порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01 (50 %), железного ПЖ-5М (30 %), медного ПМС-1 (10 %) и никель-алюминиевого ПТ-НА-01 (10 %), что снижает интенсивность изнашивания покрытия до $4 \cdot 10^{-6}$ г/м в период нормальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ярошевич, В. К.** Коленчатые валы автомобильных двигателей / В. К. Ярошевич, М. А. Белоцерковский, Е. Л. Савич. – Минск: БНТУ, 2004. – 176 с.
2. **Борисов, Ю. С.** Порошки для газотермического напыления покрытий / Ю. С. Борисов. – Киев: Знание, 1984. – 15 с.
3. **Медь** в черных металлах: под ред. И. Ле Мэя и Л. М.-Д. Шетки; пер. с англ. / под ред. О. А. Банных. – М.: Metallurgia, 1988. – 312 с.
4. **Трение**, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
5. **Порошковый** материал для напыления износостойких покрытий: решение о выдаче пат. № 16657 Респ. Беларусь, МПК 23 С 4/04 / В. П. Иванов, Т. В. Вигерина, А. П. Кастрюк, О. П. Штемпель, В. А. Фруцкий; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявка № а 20110604; приоритет 10.05.2011.

Поступила 10.10.2012