

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 $Ra\ 0,32\text{--}0,63\ \mu\text{м}$. 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.

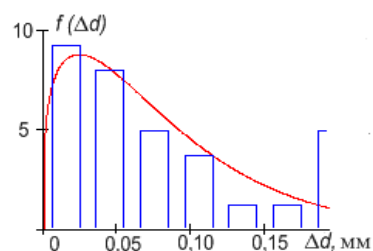


Рис. 1. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ коленчатых валов двигателей по максимальному износу коренных шеек Δd

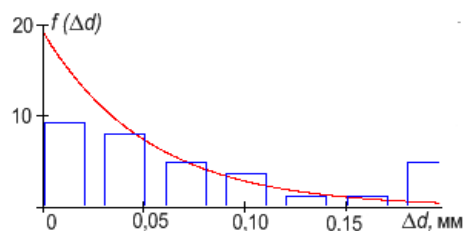


Рис. 2. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\Delta d)$ коленчатых валов двигателей по максимальному износу шатунных шеек Δd

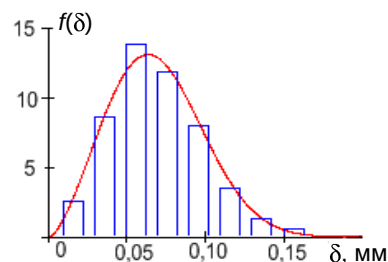


Рис. 3. Полигон и плотность вероятности распределения $f(\delta)$ коленчатых валов двигателей по отклонению от соосности δ средней коренной шейки относительно крайних коренных шеек

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.

Таблица 2

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 напыление смесью 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.

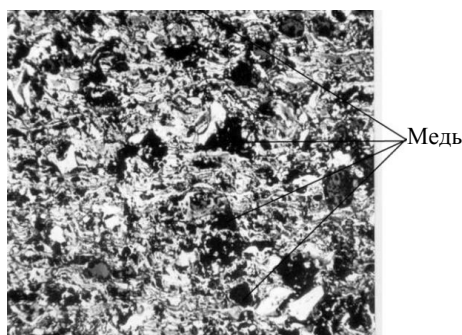


Рис. 4. Общий вид материала покрытия, полученного плазменным напылением из смеси порошков: самофлюсующегося ПГ-10Н-01, железного ПЖ-5М, медного ПМС-1 и никель-алюминиевого ПТ-НА-01 ($\times 100$)

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 трибосопряжения. 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