

УДК 658.562:621.01

М. В. ПОДОСЕТНИКОВ¹, С. В. СЕМЕНОВ¹, Г. Б. ПРЕМЕНТ², В. А. ГАЙКО³

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

¹Полоцкий завод «Проммаширемонт», Полоцк,

²ООО «Фелокт-сервис», Минск,

³ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

(Поступила в редакцию 16.07.2015)

Введение. Изучение особенностей технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества рабочих поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания позволяет выявить сходство и различия в процессах передачи эксплуатационных свойств при изготовлении и восстановлении деталей, отвечающих за ресурс машины [1, 2].

Для сравнительного анализа наследования эксплуатационных свойств необходимо рассматривать одну и ту же деталь в процессах производства и ремонта, на совпадающих операциях технологических процессов изготовления и восстановления [3–5]. Поэтому в качестве исследуемой детали двигателя при сравнительном анализе механизмов наследования при изготовлении и восстановлении рабочих поверхностей выбран коленчатый вал как изготавливаемый, так и восстанавливаемый на ремонтных предприятиях республики [6, 7]. Сравнение особенностей технологического наследования проводилось для коренных и шатунных шеек коленчатого вала после черновых, чистовых и отделочных операций механической обработки, совпадающих в технологических процессах изготовления и восстановления детали.

Методика исследования передачи параметров качества в процессах изготовления и восстановления. Замеры эксплуатационных параметров качества производились на рабочих поверхностях коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53, так как на эти поверхности в процессе эксплуатации воздействуют контактные нагрузки, приводящие к их износу и разрушению. Измерения физико-механических и геометрических параметров качества проводились после токарной обработки, шлифования и полирования на поверхностях пяти коренных и четырех шатунных шеек.

В экспериментальных исследованиях явлений наследования параметров качества коренных и шатунных шеек в процессах производства и ремонта коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53 за основной физико-механический параметр принималась твердость материала по Бринеллю (НВ) при изготовлении и по Роквеллу (HRC) при восстановлении детали. Результаты измерений основной физико-механической характеристики и геометрических параметров качества: радиального биения r , точности размеров IT и шероховатости поверхности Ra коренных и шатунных шеек заносились в таблицы. В них по вертикали располагались данные согласно порядковым номерам исследуемых классов коленчатых валов, а по горизонтали – данные по каждой шейке вала. Это позволило анализировать не только среднеарифметические результаты измерений по классам разных деталей, но и отличия данных по различным номерам коренных и шатунных шеек на всем протяжении вала.

На основе табличных данных строились графики изменения эксплуатационных параметров качества рабочих поверхностей коленчатого вала на характерных этапах технологического процесса его изготовления (рис. 1, 2) и восстановления (рис. 3, 4). По графикам детально анализировались закономерности изменения параметров качества в процессе механической обработки поверхностей коренных и шатунных шеек.

По экспериментальным табличным данным рассчитывались коэффициенты передачи технологического наследования и взаимовлияния K (табл. 1–8), равные отношению характеристик на предыдущей и последующей операциях для исследуемых свойств: HB (HRC), ρ , IT и Ra поверхностей коренных (1–5) и шатунных шеек (1–4) коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

Исследуемые физико-механические и геометрические характеристики взаимосвязаны между собой, поэтому анализировалось проявление технологического наследования при взаимовлиянии эксплуатационных свойств [1, 2, 5]. Твердость поверхностного слоя на всех операциях механической обработки влияет на точность обеспечения формы, выполнения размеров и на формирование микрорельефа поверхности. При относительно большом биении поверхности нельзя говорить о высокой точности размеров, а на радиальное биение оказывают влияние как точность размеров, так и шероховатость поверхности. Шероховатость поверхности не всегда является наследуемым параметром, так как с очередным проходом инструмента формируется свой микрорельеф, практически не связанный с предыдущим микрорельефом [8, 9].

Для оценки наследования по всему технологическому маршруту рассчитывались результирующие коэффициенты передачи K_p , равные произведению соответствующих коэффициентов для эксплуатационных параметров качества по всей последовательности операций (табл. 1, 2, 5, 6). Для определения степени влияния наследования на различных технологических операциях рассчитывались коэффициенты сравнения K_c , равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях (табл. 3, 4, 7, 8).

Определение механизмов передачи и управление наследованием свойств в процессе изготовления детали. Изучение экспериментальных данных в процессе производства (рис. 1, 2) позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических

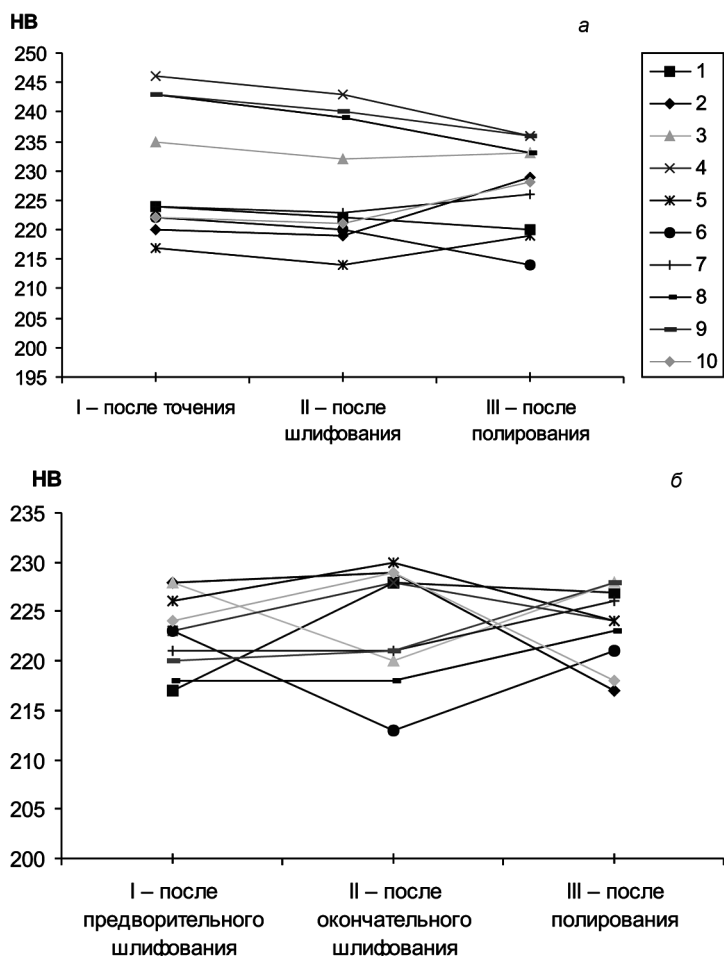


Рис. 1. Зависимость изменения твердости коренных (а) и шатунных (б) шеек по классам (1–10) коленчатых валов двигателя на этапах (I, II, III) их изготовления

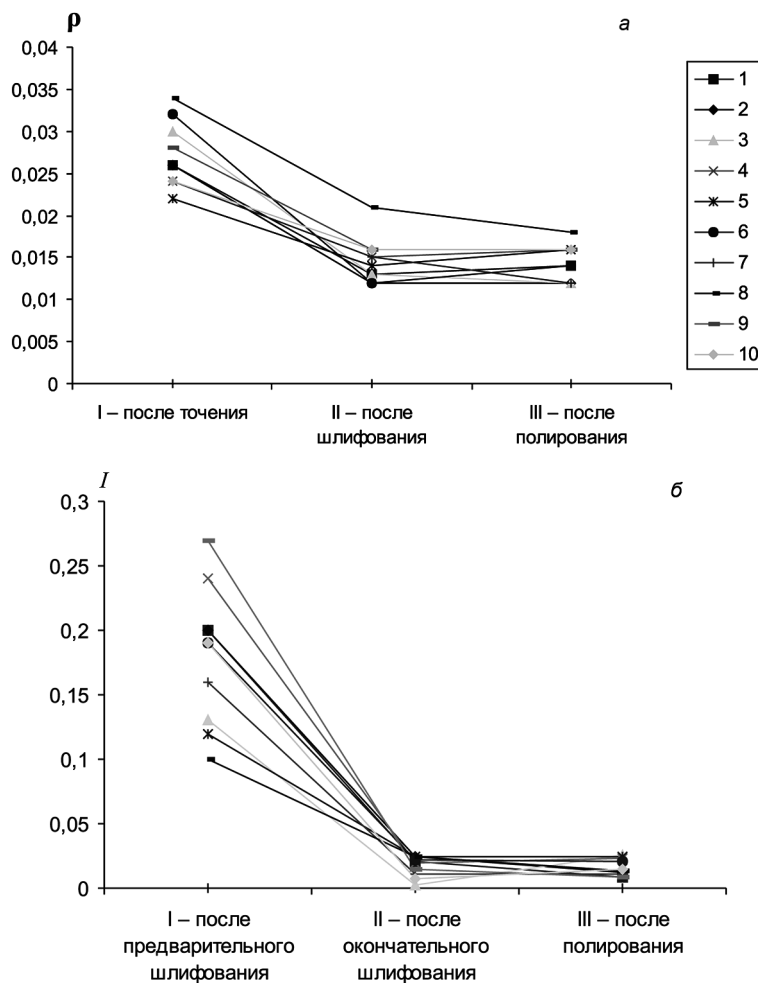


Рис. 2. Зависимость изменения радиального биения коренных шеек (а) и точности размеров шатунных шеек (б) по классам (1–10) коленчатых валов двигателя на этапах (I, II, III) их изготовления

и геометрических параметров качества коренных (табл. 1, 3) и шатунных шеек (табл. 2, 4) коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

При механической обработке в процессе изготовления детали (табл. 1, 2), как и требуется для рационально построенного технологического процесса [2, 3, 5], на начальных операциях устраняется вредное влияние технологической наследственности, т. е. коэффициенты передачи велики ($K \gg 1$) для геометрических и малы ($1 > K > 0$) для физико-механических параметров качества, а на заключительных операциях они стабилизируются ($K \rightarrow 1$).

Коэффициенты взаимовлияния (табл. 3, 4) позволяют оценить значимость как технологических операций, так и технологических факторов, влияющих на параметры на отдельных операциях.

Твердость материала существенно влияет на геометрические параметры. Для отклонений параметров IT и Ra это влияние важно как на черновых, так и на чистовых операциях и постепенно возрастает по всем технологическим переходам.

Таблица 1. Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , отклонений формы ρ , точности размеров I и рельефа поверхности R на коренных шейках коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент передачи технологического наследования			
	K^H	K^p	K^I	K^R
Точение – шлифование (K_1)	1,011	1,847	16,684	181,302
Шлифование – полирование (K_2)	0,999	1,001	1,188	1,928
$K_p = K_1 K_2$	1,011	1,853	19,815	349,555

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , точности размеров I и рельефа поверхности R на шатунных шейках коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент передачи технологического наследования		
	K^H	K^I	K^R
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	0,979	12,603	1,926
Окончательное шлифование – полирование (K_2)	1,019	1,056	1,333
$K_p = K_1 K_2$	1,002	13,314	2,574

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических p, I, R параметров качества поверхностей коренных шеек коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент взаимовлияния технологического наследования					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	K^{pI}	K^{pR}	K^{IR}
Точение – шлифование (K_1)	15704,514	12084,211	424,399	1,421	0,050	0,586
Шлифование – полирование (K_2)	15557,534	14196,250	809,480	0,914	0,052	0,068
$K_c = K_1/K_2$	1,009	0,851	0,524	1,555	0,958	8,654

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических I, R параметров качества поверхностей шатунных шеек коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент взаимовлияния технологического наследования		
	K^{HI}	K^{HR}	K^{IR}
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	12893,893	676,715	0,661
Окончательное шлифование – полирование (K_2)	13919,959	921,999	0,070
$K_c = K_1/K_2$	0,926	0,734	9,453

Геометрические параметры поверхности такие, как IT и Ra , после черновой обработки наследуются в большей степени, чем после чистовых операций доводки коренных и шатунных шеек коленчатого вала.

Кроме того, необходимо отметить, что на шероховатость поверхностей коренных и шатунных шеек, точность обработки и отклонения формы, полученные на предыдущих операциях, практически не влияют (табл. 3, 4). В этой связи операции окончательного шлифования можно рассматривать как технологические «барьеры» для передачи параметров точности обработки, в особенности биения поверхностей на их шероховатость. При этом также следует отметить влияние передачи погрешности формы (табл. 1) на параметры точности обработки (табл. 3).

В результате можно говорить о рациональном построении маршрута механической обработки коренных и шатунных шеек коленчатого вала, так как передача параметров IT и Ra поверхностей на черновых операциях наиболее значима, а затем на отделочных операциях существенно ослабевает (табл. 1, 2). Следует обратить внимание на высокие коэффициенты передачи точности обработки после черновых операций и особое внимание – на коэффициент передачи шероховатости после точения.

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование эксплуатационных параметров качества дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при изготовлении коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

При точении на параметры качества поверхности существенно влияет тангенциальная составляющая силы резания, которая определяется его глубиной и подачей инструмента. Поэтому при управлении качеством обработки особое внимание следует уделять припуску под точение и подаче инструмента.

При шлифовании и полировании на физико-механические и геометрические параметры качества поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей инструмента, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому при управлении качеством обработки следует особо учитывать припуск под обработку, скорость вращения и подачу круга.

В результате при точении на малых подачах необходимо использовать ширококромочный резец, а при шлифовании снижать подачу шлифовального круга и регулярно осуществлять его правку.

Определение механизмов передачи и управления наследованием свойств в процессе восстановления детали. Изучение экспериментальных данных в процессе восстановления коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53 (рис. 3, 4) позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества коренных (табл. 5, 7) и шатунных шеек (табл. 6, 8).

Таблица 5. Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , отклонений формы p , точности размеров I и рельефа поверхности R на коренных шейках коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент передачи технологического наследования			
	K^H	K^p	K^I	K^R
Точение – шлифование (K_1)	0,966	31,999	10,625	1,866
Шлифование – полирование (K_2)	1,018	1,912	0,691	1,268
$K_p = K_1 K_2$	0,98	61,15	7,34	2,37

Таблица 6. Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , точности размеров I и рельефа поверхности R на шатунных шейках коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент передачи технологического наследования		
	K^H	K^I	K^R
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	0,975	9,235	1,919
Окончательное шлифование – полирование (K_2)	1,014	1,063	1,290
$K_p = K_1 K_2$	0,999	9,824	2,481

Таблица 7. Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических p, I, R параметров качества поверхностей коренных шеек коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент взаимовлияния технологического наследования					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	K^{pI}	K^{pR}	K^{IR}
Точение – шлифование (K_1)	705,093	1903,750	91,839	86,375	4,167	0,513
Шлифование – полирование (K_2)	1395,575	1362,442	120,583	1,866	0,165	0,061
$K_c = K_1/K_2$	0,505	1,397	0,762	46,286	25,229	8,379

Таблица 8. Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических I, R параметров качества поверхностей шатунных шеек коленчатого вала двигателя

Операция изготовления	Коэффициент взаимовлияния технологического наследования		
	K^{HI}	K^{HR}	K^{IR}
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	1839,706	93,708	0,470
Окончательное шлифование – полирование (K_2)	2007,016	124,053	0,066
$K_c = K_1/K_2$	0,917	0,755	7,155

Коэффициенты передачи (табл. 5, 6) показывают, что технологический процесс восстановления имеет ряд существенных отличий от технологического процесса производства коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

Вместе с тем при механической обработке как в процессе изготовления, так и в процессе восстановления коленчатого вала на начальных операциях устраняется вредное влияние технологической наследственности, т. е. коэффициенты передачи велики ($K \gg 1$) для геометрических и малы ($1 > K > 0$) для физико-механических параметров качества, а на заключительных операциях они стабилизируются ($K \rightarrow 1$).

При восстановлении коренных и шатунных шеек коленчатого вала в процессе ремонта как геометрические, так и физико-механические параметры сначала ухудшаются, а затем при механической обработке улучшаются. В результате по всему технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические (особенно связанные с микрорельефом поверхности) незначительно улучшаются.

Коэффициенты взаимовлияния (табл. 7, 8) позволяют оценить значимость как технологических операций, так и формируемых параметров качества. Твердость материала так же, как и в процессах изготовления детали, существенно влияет на геометрические параметры. Данное влияние значительнее на заключительных операциях для отклонений формы (табл. 7). В остальных случаях оно стабильно по всем технологическим переходам.

Геометрические параметры цилиндрических поверхностей коренных и шатунных шеек наследуются слабо, что особенно заметно на начальных операциях. При этом для микрорельефа поверхности (шероховатости) чистовые операции восстановления являются технологическими «барьерами» (так как K^{pR} и $K^{IR} \rightarrow 0$). Влияние предыдущих геометрических параметров на последующие незначительно. Наиболее заметно происходит изменение коэффициентов передачи для погрешности форм и точности обработки от черновых к чистовым операциям (табл. 5, 6).

Графики изменения твердости коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53 (рис. 3, а, б) показывают, что при восстановлении рабочих поверхностей окончательные физико-механические параметры качества поверхностей формируются при шлифовании. Это можно наблюдать и для других геометрических характеристик, кроме параметров микрорельефа поверхности (рис. 4, а, б),

В результате исследования операции восстановления рабочих поверхностей установлено, что в процессе плазменной металлизации твердость поверхности стабилизируется (колебания в пределах 4–5 HRC) [8, 10].

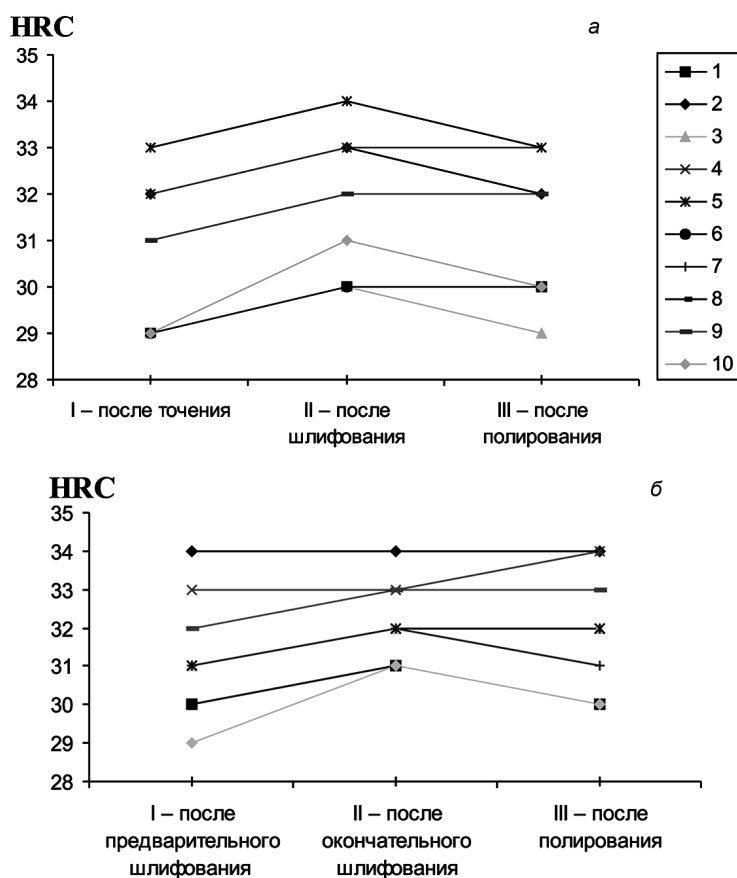


Рис. 3. Зависимость изменения твердости коренных (а) и шатунных (б) шеек по классам (1–10) коленчатых валов двигателя на этапах (I, II, III) их восстановления

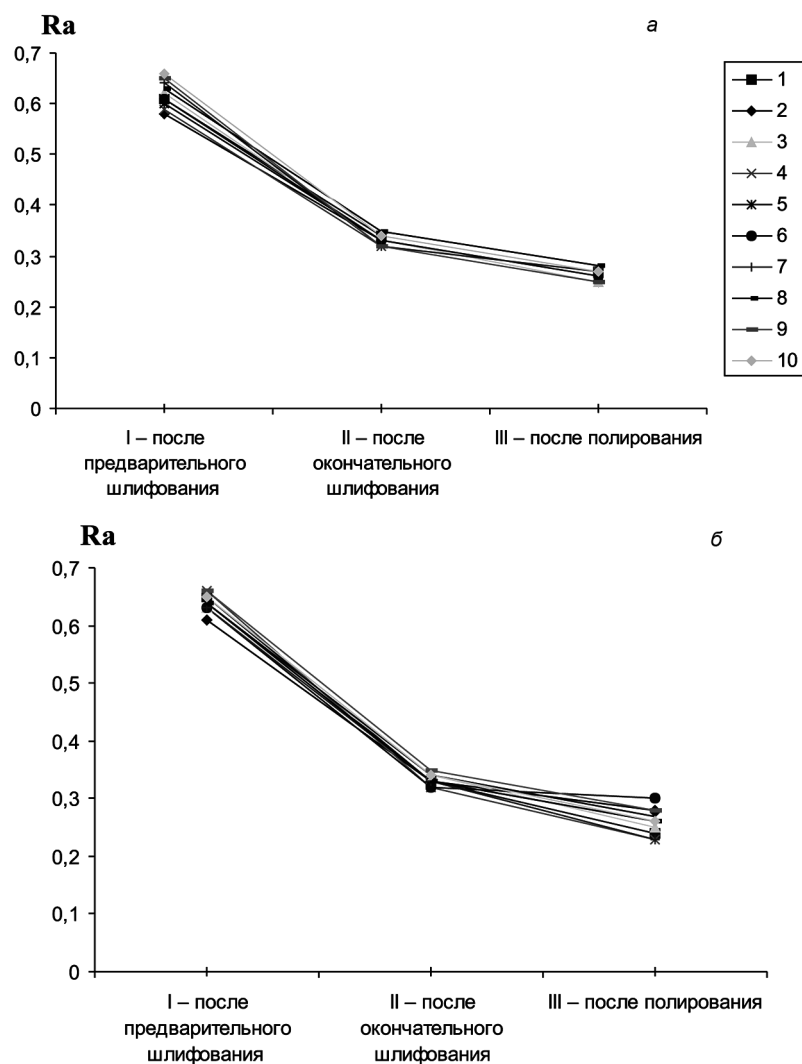


Рис. 4. Зависимость изменения шероховатости поверхностей коренных (а) и шатунных (б) шеек по классам (1–10) коленчатых валов двигателя на этапах (I, II, III) их восстановления

Геометрические параметры поверхности (Ra , IT и особенно ρ) после черновой обработки наследуются на чистовых операциях шлифования коренных и шатунных шеек коленчатого вала.

Таким образом, анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе восстановления позволил выявить определяющие процессы передачи свойств при механической обработке поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

Установлено, что в процессе плазменной металлизации порошка ПГ-10Н-01 на HRC поверхности и толщину формируемого покрытия существенное влияние оказывают сила тока плазменной дуги, расход порошка, диаметр сопла плазмотрона, а также скорость обработки. Определяющим параметром для управления качеством наплавки является сила тока [6, 7, 10].

При окончательном шлифовании на параметры HRC и Ra влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, определяемые его глубиной и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки.

По результатам исследований рекомендовано при управлении качеством обработки строго следовать регламентам для операций восстановления поверхностей, позволяющим обеспечить в процессе плазменной металлизации стабильную твердость материала и толщину покрытия, а для операций механической обработки особое внимание уделять глубине резания и подаче круга при равномерном припуске под шлифование.

Выводы

1. Сравнение явлений технологической наследственности показало, что на аналогичных операциях механической обработки при точении, шлифовании и полировании в процессах изготовления и восстановления коренных и шатунных шеек коленчатого вала передача свойств в целом рациональна. На начальных операциях устраняется вредное влияние наследуемых факторов, а на заключительных операциях улучшаются эксплуатационные параметры при небольшом отступлении по точности обработки после полирования восстановленных шеек вала. Операция плазменной металлизации в процессе восстановления рабочих поверхностей является технологическим «барьером» для физико-механических параметров материала и напряженного состояния поверхностного слоя, влияющих на отклонения формы и точность размеров готовых деталей.

2. Изменение свойств в процессе механической обработки наиболее сильно проявляется при наследовании биения (K^P) после восстановления коренных шеек коленчатого вала ($32,0 \rightarrow 1,9$, а для сравнения при изготовлении $1,8 \rightarrow 1,0$), что связано с неравномерной толщиной наплавленного покрытия. Изменения значительно проявляются при наследовании шероховатости (K^R) коренных шеек в процессе изготовления вала ($181,3 \rightarrow 1,9$, а для сравнения после восстановления $1,9 \rightarrow 1,3$), что связано с рельефом, формирующимся на «корке» чугуновой отливки, при обработке твердосплавным инструментом.

3. Твердость рабочих поверхностей коленчатого вала, определяемых неравномерностью «отбеленного» слоя чугуновой заготовки и состоянием наплавленного слоя на изношенной детали, стабильно влияет на погрешности формы, точность и качество механической обработки. При этом для изготовленных деталей данное влияние значительней, чем для восстановленных поверхностей (на форму в 10–20 раз; на точность в 6–10 раз; на шероховатость в 5–7 раз). Взаимовлияние геометрических параметров качества проявляется через передачу искажений погрешности формы коренных шеек на их точность и рельеф, которая более заметна при обработке восстановленных поверхностей, чем при изготовлении коленчатого вала.

4. По результатам сравнения технологического наследования в процессах изготовления и восстановления рабочих поверхностей коленчатого вала рекомендовано контролировать и управлять операцией плазменной металлизации для обеспечения стабильной твердости и толщины покрытия; регламентировать глубину резания и подачу шлифовального круга при равномерном припуске на заключительных операциях механической обработки.

Исследования частично поддержаны белорусско-сербским T14CPB-010 грантом БРФФИ.

Литература

1. Яцерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., 1977.
2. Дальский А. М., Базров Б. М., Васильев А. С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М., 2000.
3. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., 1975.
4. Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин / Под редакцией К. С. Колесникова. М., 1990.
5. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
6. Яцерицын П. И., Кусакин Н. А., Хейфец М. Л., Премент Г. Б. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 110–115.
7. Хейфец М. Л., Семенов В. И., Точило В. С., Подосетников М. В. // Тяжелое машиностроение. 2006. № 4. С. 33–35.
8. Яцерицын П. И., Скорынин Ю. В. Работоспособность узлов трения машин. Мн., 1984.
9. Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. К., 1989.
10. Подосетников М. В., Семенов С. В., Хейфец М. Л. и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. 2010. № 2. С. 100–103.

M. V. PODOSETNIKOV, S. V. SEMENOV, G. B. PREMENT, V. A. GAIKO

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL INHERITANCE OF OPERATIONAL QUALITY PARAMETERS AT MANUFACTURING AND REPAIR OF AN ENGINE CRANKSHAFT

Summary

Technological inheritance of physical and mechanical as well as geometrical quality parameters in processes of manufacture and repair of engine crankshaft has been analyzed. Recommendations for the management of technological factors at manufacture and repair of the engine crankshaft by applying of mechanical and electrophysical treatment are given.