

МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 658.512:621.7:621.9+388.94

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

канд. техн. наук, доц. Н.А. КУСАКИН

(Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, Минск),
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, Г.Б. ПРЕМЕНТ, М.В. ПОДОСЕТНИКОВ

(Полоцкий государственный университет)

Предложена методология статистического анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин. Технологический процесс изготовления детали и её эксплуатации в узле машины может быть представлен в виде графа, выделяющего заготовительные, черновые, чистовые и отделочные операции, а также обкатку, приработку и изнашивание на стадиях эксплуатации. Статистический анализ технологического и эксплуатационного наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатых и распределительных валов двигателей позволил рассмотреть последовательность технологических переходов обработки и упрочнения, регламентировать технологические воздействия и обеспечить высокое качество восстановления.

По результатам исследований разработаны регламенты для операций технологических процессов восстановления деталей, позволяющие обеспечить в процессе наплавки стабильную твердость и однородность материала покрытия, а в процессе закалки высокую твердость поверхности.

Введение. Обеспечение высокого качества продукции на этапе создания и освоения изделий заключается в организации такой технологической подготовки и осуществлении такого производства, при которых продукция соответствовала бы требованиям конструкторской документации и не имела бы вредных последствий от технологических методов обработки [1]. Поэтому все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики формируются всем комплексом технологических воздействий и изменяются при эксплуатации машины, ее техническом обслуживании и ремонте [1, 2].

Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [3, 4]. Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их показателей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе и на стадиях эксплуатации, проходя через различные трансформации, испытывают воздействия технологических и эксплуатационных факторов [4, 5].

В цепочке технологических операций и при эксплуатации существуют своего рода «барьеры». Некоторые технологические факторы преодолеть эти «барьеры» не могут, и в таком случае их влияние на дальнейшие свойства объекта отсутствует. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [2, 3]. Самым существенным «барьером» являются термические воздействия, а также воздействия, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микрогеометрию поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. Следовательно, процессом технологического и эксплуатационного наследования можно управлять с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всей обработки и эксплуатации, а свойства, влияющие отрицательно – ликвидировать в начале их зарождения [4, 5].

До недавнего времени в математическом описании технологического и эксплуатационного наследования использовались различные аналитические модели [2], так как считали, что управление процессами обработки детерминировано технологическими воздействиями на конкретных операциях технологического процесса [3], а управление при эксплуатации зависит от внешних стохастических факторов, влияние которых существенно изменяется в процессе изнашивания деталей машин [4, 5].

Однако в последнее время на основании анализа самоорганизации поверхностных явлений [6] в технологических и эксплуатационных процессах показано, что их следует описывать с единых синергетических позиций [7]. При таком описании определяется ограниченное число сценариев поведения технологических и эксплуатационных систем, которыми можно управлять в устойчивых диапазонах выходных параметров качества [6]. В результате обеспечивается возможность описания многократных циклов «производство – эксплуатация», которым подвергаются детали машин при их технологическом обслуживании и ремонте.

Цель работы – формирование методологии статистического анализа сквозного технологического и эксплуатационного наследования и изучение особенностей передачи показателей качества при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин для структурно-параметрической оптимизации технологических процессов ремонтного производства.

Методология статистического анализа технологического и эксплуатационного наследования. Технологический процесс изготовления детали и её эксплуатации в узле машины может быть представлен в виде графа, выделяющего заготовительные, черновые, чистовые и отделочные операции, а также обкатку, приработку и изнашивание на стадиях эксплуатации [2, 4]. Граф, как правило, является ориентированным [5], а показатели качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

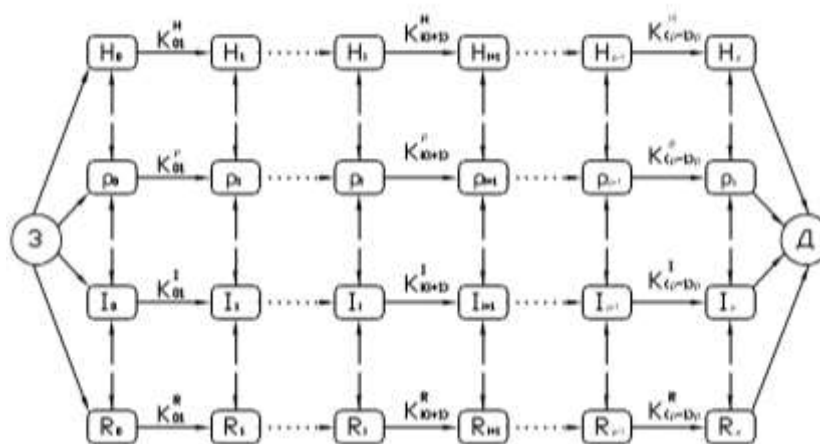


Рис. 1. Развернутый граф технологического и эксплуатационного наследования, учитывающий комплекс показателей качества

Начальная вершина графа в технологическом процессе представляет собой заготовку (З), а конечная вершина – изношенную деталь (Д) в процессе эксплуатации. Ориентированные ребра графа показывают передачу показателей качества детали при обработке, сборке и эксплуатации машин. Передача ребра описывается коэффициентом наследования K , который показывает количественное изменение свойства и равен отношению предыдущих S_{i-1} и последующих S_i значений свойства [2, 5]:

$$K = \frac{S_{i-1}}{S_i}. \quad (1)$$

Вместе с прямой передачей свойств (см. рис. 1, сплошные линии) при технологическом и эксплуатационном наследовании целесообразно оценивать взаимовлияние свойств (см. рис. 1, штриховые линии).

Общую структуру процессов производства и эксплуатации можно представить как сложную многомерную систему в виде последовательности изменения основных показателей качества детали [2, 4]. На вход технологической системы обработки поступают различные характеристики заготовки $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$, а на выходе эксплуатационной системы обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для изношенной детали $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}\}$ факторов для каждой текущей ϕ_i операции технологического процесса и стадии эксплуатации машины [3, 4].

Так, для показателя качества S_i с учетом предыдущей обработки или эксплуатации имеем [2, 4]:

$$S_i = a_i S_{i-1}^{b_i}. \quad (2)$$

Количественные связи технологической и эксплуатационной наследственности, зависящие от выбора методов обработки и условий эксплуатации, определяются коэффициентами b , а основные режимы обработки и эксплуатации внутри этих методов или условий – коэффициентами a . Коэффициент a_i описывает влияние факторов $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}$ на рассматриваемый параметр качества S_i для операции или стадии ϕ_i и может быть представлен в виде [2, 3]:

$$a_i = k_{i0} t_{i1}^{k_{i1}} t_{i2}^{k_{i2}} \dots t_{in}^{k_{in}}, \quad (3)$$

где $k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}$ – эмпирические коэффициенты влияния технологических или эксплуатационных факторов.

Выполнив преобразования для показателей качества, получим описание коэффициента наследования:

$$K = \frac{a_i^{b_i}}{S_i^{b_i+1}}. \quad (4)$$

Анализ зависимости (4) показывает, что производство и эксплуатация могут быть представлены как в виде передачи значений свойств S_i (см. рис. 1, сплошные линии) между операциями и стадиями (описывается знаменателем отношения (4)), так и в виде взаимовлияния свойств (см. рис. 1, штриховые прерывистые линии) на конкретной операции или стадии через действие a_i совокупности факторов t_i с учетом предшествующего значения свойства, которое описывается числителем отношения (4).

В результате представление технологического и эксплуатационного наследования совокупности свойств $\{S_{1i}, S_{2i}, \dots, S_{mi}\}$ может быть трансформировано (рис. 2) с учетом выделения и описания взаимовлияния отдельных S_1, S_2, \dots, S_m показателей качества и совокупности факторов $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}\}$ на каждой операции и стадии φ_i .

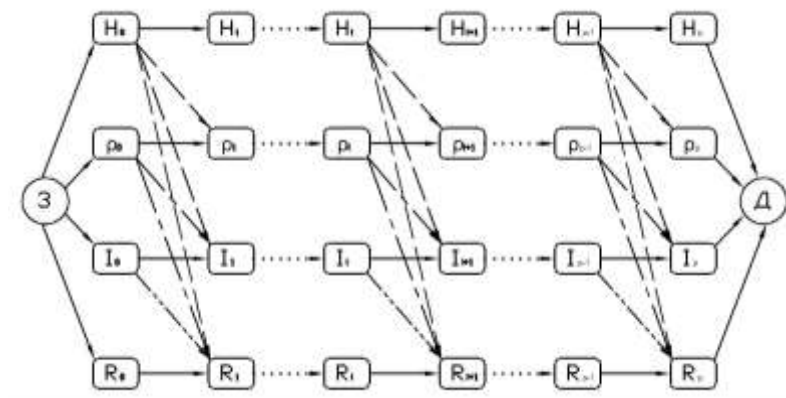


Рис. 2. Граф технологического и эксплуатационного наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических показателей качества

Упрощение структурной модели наследования показателей качества (см. рис. 2) путем минимизации количества ребер графа для сокращения объема исходных данных при статистическом анализе, возможно посредством выделения основных параметров качества и определяющих связей при наследовании свойств.

Если на какой-либо операции или стадии φ_i коэффициент $b_i = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данного воздействия, что может служить интерпретацией действия операции и стадии φ_i как непреодолимого «барьера» [2, 3].

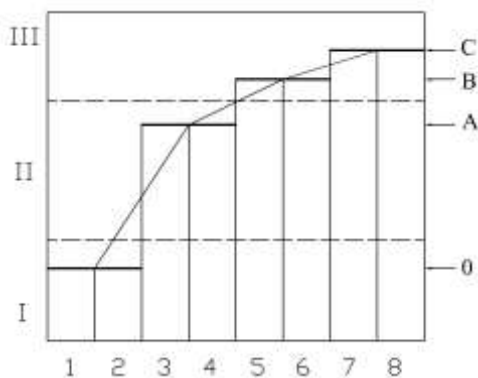


Рис. 3. ABC-анализ изменения в процессе эксплуатации (I...III) начальных показателей качества (1...8): 0 – формирование поверхности; А – изменение контактных нагрузок; В – выход детали из строя; С – полное разрушение поверхности; I – приработка; II – нормальное изнашивание; III – катастрофическое изнашивание; 1 – шероховатость поверхности; 2 – структура поверхностного рельефа; 3 – волнистость поверхности; 4 – структура поверхностных слоев; 5 – форма поверхности; 6 – точность размеров; 7 – остаточные напряжения; 8 – структура основного материала

износа (В) и связанным как с физико-механическими характеристиками материала (7, 8), так и с геометрическими параметрами рельефа поверхности (1, 3).

Изучение технологического наследования эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей. Изучение технологического наследования по предложенной методологии проводилось для наиболее часто восстанавливаемых деталей, отвечающих за ресурс ремонтируемых двигателей – коленчатых и распределительных валов [9].

Для описания технологического наследования эксплуатационных свойств коленчатых и распределительных валов в процессе восстановления рассматривалась совокупность физико-механических и геометрических свойств (см. рис. 1 и 2): твердости (H), отклонений формы (ρ), точности размеров (I) и рельефа поверхности (R). Для этого в качестве определяющего свойства рабочих поверхностей деталей (см. рис. 3) принималась физико-механическая характеристика (8) – твердость по Роквеллу (HRC), так как твердость является одним из наиболее распространенных и общедоступных интегральных критериев оценки свойств материалов, позволяющим судить о прочностных и триботехнических характеристиках материала. В качестве зависимых от твердости параметров последовательно рассматривались: отклонения формы поверхностей (6) – биения ρ ; точность размеров (5) – квалитет IT ; шероховатость поверхности (1) – среднеарифметическое отклонение профиля Ra .

Эксплуатационные параметры качества рабочих поверхностей детали (HRC , ρ , IT и Ra) измерялись после технологических операций механической обработки: точения, шлифования, полирования, а также после обкатки двигателя и его дальнейшей эксплуатации.

Измерения твердости HRC , отклонений формы ρ , точности размеров IT и рельефа поверхности Ra проводились на партии из пятидесяти деталей. При этом партия разбивалась по величине износа на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе. На основании расчетных результатов определялись коэффициенты передачи наследования K^H , K^ρ , K^I , K^R и коэффициенты взаимовлияния наследования свойств K^{Hp} , K^{HI} , K^{HR} , $K^{\rho I}$, $K^{\rho R}$, K^{IR} .

Для оценки наследования по технологическому маршруту и по стадиям эксплуатации рассчитывались результирующие коэффициенты K_p , равные произведению соответствующих коэффициентов для параметров качества по всей последовательности операций и стадий. Для определения степени влияния наследования на различных технологических операциях и стадиях эксплуатации рассчитывались коэффициенты сравнения K_c , равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях или стадиях.

Изучение экспериментальных данных в процессе восстановления позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества рабочих поверхностей **коленчатого вала двигателя** (табл. 1...4).

Таблица 1

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

Операции механической обработки	Коэффициенты передачи технологического наследования при восстановлении коренных шеек			
	K^H	K^ρ	K^I	K^R
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	0,9658	31,99	10,625	1,866
Окончательное шлифование – полирование (K_2)	1,0181	1,912	0,691156	1,268
$K_p = K_1 K_2$	0,98	61,15	7,34	2,37

Таблица 2

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

Операции механической обработки	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования при восстановлении коренных шеек					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	$K^{\rho I}$	$K^{\rho R}$	K^{IR}
Предварительное шлифование – окончательное шлифование (K_1)	705,093	1903,750	91,839	86,375	4,167	0,513
Окончательное 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 3

Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , отклонений формы ρ , точности размеров I и рельефа поверхности R шатунных шеек коленчатого вала двигателя

Операции механической обработки	Коэффициенты передачи технологического наследования при восстановлении шатунных шеек		
	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 4

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

Операции механической обработки	Коэффициенты передачи технологического наследования при восстановлении шатунных шеек		
	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

При механической обработке в процессе восстановления коленчатого вала на начальных операциях устраняется вредное влияние технологической наследственности, т.е. коэффициенты 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) даже улучшаются.

Коэффициенты взаимовлияния (см. табл. 2 и 4) позволяют оценить значимость как технологических операций, так и технологических факторов и параметров на отдельных операциях. Твердость материала существенно влияет на геометрические параметры. Сильнее всего это влияние на заключительных операциях для отклонений формы (см. табл. 3). В остальных случаях оно стабильно по всем операциям.

Геометрические параметры поверхностей коренных и шатунных шеек наследуются слабо, особенно это заметно на начальных операциях. Причем для микрорельефа поверхности (шероховатости) чистовые операции восстановления являются технологическими «барьерами», так как $K^{\rho R}$ и $K^{IR} \rightarrow 0$. Влияние предыдущих геометрических параметров на последующие невелико. Наиболее заметно происходит изменение коэффициентов передачи для погрешности форм и точности обработки от черновых к чистовым операциям (см. табл. 1 и 3).

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе восстановления дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при механической обработке поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя.

При окончательном шлифовании на твердость HV и шероховатость Ra поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому для управления качеством обработки при равномерном припуске особое внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

По результатам исследований разработаны регламенты операций технологического процесса, позволяющие обеспечить в процессе металлизации стабильную твердость и однородность материала, а также равномерную толщину покрытия.

Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества **распределительного вала двигателя** в процессе восстановления (табл. 5... 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 опорных шеек распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты передачи технологического наследования			
	K^H	K^p	K^I	K^R
Износенная поверхность – точение после наплавки (K_1)	3,3	0,8	0,3	0,4
Точение после наплавки – окончательное шлифование (K_2)	0,3	1,9	3,9	4,1
$K_p = K_1 K_2$	0,99	1,52	1,17	1,64

Таблица 6

Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_p твердости H , отклонений формы p , точности размеров I и рельефа поверхности R кулачков распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты передачи технологического наследования			
	K^H	K^p	K^I	K^R
Дефектация – восстановление (K_1)	3,3	–	0,9	0,6
Восстановление – окончательная обработка (K_2)	0,3	–	1,1	2,9
$K_p = K_1 K_2$	0,99	–	0,99	1,74

Таблица 7

Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических p, I, R параметров качества поверхностей опорных шеек распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	K^{pI}	K^{pR}	K^{IR}
Износенная поверхность – точение после наплавки (K_1)	1208	302	35,5	0,3	0,04	0,03
Точение после наплавки – окончательное шлифование (K_2)	538	394	43,6	1,0	0,1	0,4
$K_c = K_1/K_2$	2,25	0,77	0,81	0,3	0,4	0,08

Таблица 8

Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_c при передаче физико-механических H и геометрических p, I, R параметров качества поверхностей кулачков распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	K^{pI}	K^{pR}	K^{IR}
Дефектация – восстановление (K_1)	–	23,9	45,8	–	–	1,6
Восстановление – окончательная обработка (K_2)	–	8,6	38,7	–	–	5
$K_c = K_1/K_2$	–	2,78	1,18	–	–	0,32

Коэффициенты передачи (см. табл. 5 и 6) показывают, что технологический процесс восстановления и упрочнения коренным образом отличается от рационального технологического процесса механической обработки.

При восстановлении в процессе ремонта как геометрические, так и физико-механические параметры сначала ухудшаются, затем улучшаются. Однако в целом по всему технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические (особенно связанные с микрорельефом поверхности) даже улучшаются. Коэффициенты взаимовлияния (см. табл. 7 и 8) позволяют оценить значимость технологических операций, а также технологических факторов и параметров отдельных операций. Твердость материала, так же как и в процессах изготовления детали, существенно влияет на геометрические параметры. Особенно сильно это влияние на начальных операциях для отклонений формы. В остальных случаях оно стабильно по всем технологическим переходам.

Геометрические параметры цилиндрических поверхностей опорных шеек наследуются слабо, особенно это видно на начальных операциях. Для микрорельефа поверхности операции восстановления яв-

ляются технологическими «барьерами» (K^{pR} и $K^{IR} \rightarrow 0$). Дальнейшее влияние предыдущих геометрических параметров на последующие также невелико и сказывается только на точности обработки.

Изменение твердости опорных шеек и кулачков распределительных валов двигателя показывает, что технологическими «барьерами» при восстановлении рабочих поверхностей являются операции наплавки, а окончательные геометрические параметры качества поверхностей формируются при шлифовании.

В результате анализа технологических операций установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволоки Нп-30ХГСА в среде CO_2 твердость поверхности стабилизируется (колебания в пределах 3...5 HRC), в то время как исходные детали имели существенный разброс (до 20 HRC). После наплавки проволоки заданная в технической документации твердость обеспечивается последующей термической обработкой.

Геометрические параметры поверхности (точность размеров IT , шероховатость поверхности Ra и радиальное биение ρ) после черновой обработки наследуются на чистовых операциях шлифования шеек и кулачков распределительного вала. Геометрические отклонения поверхностей после правки сохраняются на последующих операциях обработки и сборки.

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе ремонта дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при восстановлении, упрочнении и обработке изношенных поверхностей опорных шеек и кулачков распределительного вала двигателя. В результате анализа установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволоки Нп-30ХГСА в среде CO_2 на твердость HRC поверхности оказывают влияние сила тока электрической дуги, диаметр наплавочной проволоки, а также скорость подачи главного движения обработки. Определяющим параметром для управления качеством наплавки является сила тока.

При окончательном шлифовании на твердость HRC и шероховатость Ra поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому для управления качеством обработки главное внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

По результатам исследований разработаны регламенты для операций технологического процесса, позволяющие обеспечить в процессе наплавки стабильную твердость и однородность материала покрытия, а в процессе закалки высокую твердость поверхности (54...56 HRC). Устранены операции правки из технологического процесса восстановления распределительного вала для снижения взаимного радиального биения поверхностей до 0,02 мм и обеспечения требуемой точности рабочих поверхностей.

Заключение. Предложена методология анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин. Показано, что технологический процесс восстановления по коэффициентам передачи эксплуатационных свойств коренным образом отличается от рационального процесса механической обработки. Анализ технологического и эксплуатационного наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатого вала и распределительного вала двигателя позволил пересмотреть последовательность технологических переходов (устранить операцию правки), регламентировать технологические воздействия (на операциях наплавки, закалки и шлифования) и обеспечить качество восстановления (стабильную твердость и точность рабочих поверхностей).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын, П.И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении / П.И. Ящерицын, Л.М. Акулович, М.Л. Хейфец. – Минск: Технопринт, 2006. – 248 с.
2. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
3. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
4. Ящерицын, П.И. Работоспособность узлов трения машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скоринин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с.
5. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
6. Combined phisico-chemical treatment: synergetic aspects / A.I. Gordienko [et al.]. – Minsk: Technoprint, 2004. – 200 p.
7. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
8. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: Экономика и право, 2003. – 224 с.
9. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 112 с.

Поступила 29.06.2007