

УДК 658.512:621.7:621.9+388.94  
DOI: 10.30987/article\_5cf7bd2fec77a9.13115279

**М.Л. Хейфец**, д.т.н.  
(Президиум НАН Беларуси, Беларусь, 220072, Минск, пр. Независимости, 66),  
**Н.Л. Грецкий**, начальник сектора  
(ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Беларусь, 220018, Минск, ул. Шаранговича, 19),  
**Г.Б. Премент**, начальник цеха  
(ООО «Фелокт-сервис», Беларусь, 220086, Минск, ул. Куприянова, 2а)  
E-mail: mlk-z@mail.ru

## Технологическое наследование эксплуатационных параметров качества в жизненном цикле деталей двигателя внутреннего сгорания

*Предложена методология статистического анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей. Анализ наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатых и распределительных валов двигателей позволил пересмотреть последовательность технологических переходов и регламентировать технологические воздействия.*

**Ключевые слова:** технологическое и эксплуатационное наследование; параметры качества; восстановление; механическая обработка; двигатель внутреннего сгорания; коленчатый вал; распределительный вал.

**M.L. Heifetz**, Dr.Sc.Tech.  
(Presidium of NAS of Belarus, 6, Independence Avenue, Minsk, 220072, Belarus)  
**N.L. Gretsky**, head of sector  
(PC "SPC Center" of NAS of Belarus, 19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Belarus)  
**G.B. Prement**, foreman  
(PC "Felokt-Service", 2a, Kupriyanov Str., Minsk, 220086)

## Technological succession of quality operation parameters in life cycle of internal combustion engine parts

*A methodology for a statistic analysis of a technological and operation succession of parts quality values is offered. The analysis of the succession at working surfaces restoration in crankshafts and camshafts of engines allowed revising the sequence of machining steps and regulating technological impacts.*

**Keywords:** technological and operation succession; quality parameters; restoration; machining; internal combustion engine; crankshaft; camshaft.

### 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 [8]. В результате обеспечивается возможность описания многократных циклов «производство – эксплуатация», которым подвергаются детали машин при их технологическом обслуживании и ремонте.

Поэтому целью работы является формирование методологии статистического анализа сквозного технологического и эксплуатационного наследования и изучение особенностей передачи параметров качества в жизненном цикле детали, обеспечивающих ресурс машины, для структурно-параметрической

оптимизации технологических процессов.

### 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).

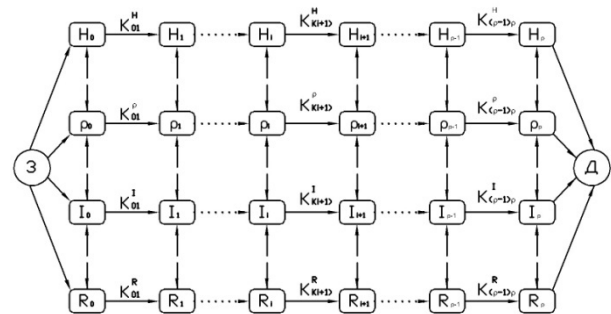


Рис. 1. Развернутый граф технологического и эксплуатационного наследования, учитывающий комплекс показателей качества

Начальная вершина графа в технологическом процессе представляет собой заготовку (З), а конечная вершина – предельно 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  $\varphi_i$  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  $\varphi_i$  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  $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}\}$  на каждой операции и стадии  $\varphi_i$ .

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.

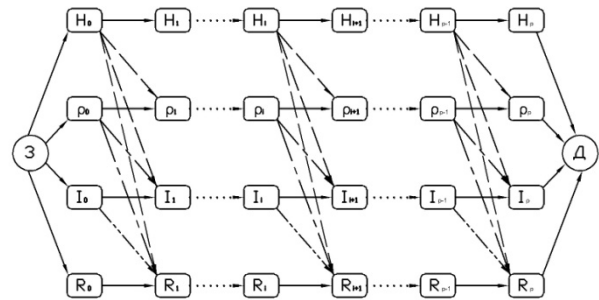


Рис. 2. Граф технологического и эксплуатационного наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических показателей качества

Если на какой-либо операции или стадии  $\varphi_i$  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  $\varphi_i$  как непреодолимого «барьера» [2, 3].

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился ABC-анализ (рис. 3) изменения в процессе эксплуатации [9] начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала [2].

ABC-анализ показал, что в большинстве случаев уже в период приработки (I) существенно меняется шероховатость (1) и структура поверхностного рельефа (2). Волнистость (3) и структура поверхностных слоев (4) изменяются при установившемся изнашивании (II). Точность размеров (5) и геометрическая форма поверхности (6) остаются в пределах допустимых значений даже в начале стадии катастрофического изнашивания (III). Только остаточные напряжения (7) и структура основного материала (8) могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей [2]. Поэтому для изучения наследования выбирались оперативно и наименее трудоемко контролируемые физико-механические геометрические показатели качества из началь-

ной и конечной групп (0...С). При этом особое внимание уделялось показателям (5, 6), претерпевающим существенные изменения в начале катастрофического износа (В) и связанным как с физико-механическими характеристиками материала (7, 8), так и с геометрическими параметрами рельефа поверхности (1, 3).

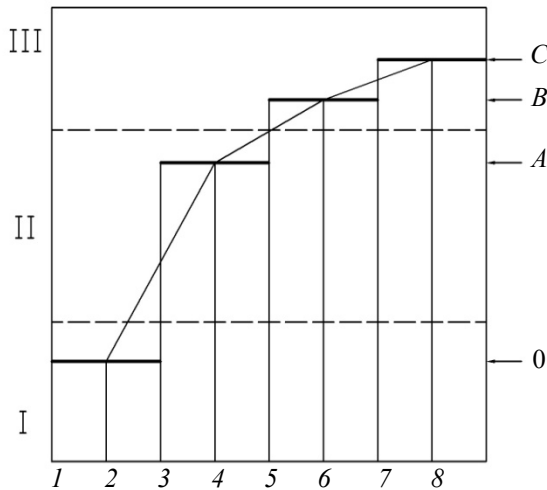


Рис. 3. ABC-анализ изменения в процессе эксплуатации (I...III) начальных показателей качества (1...8):

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

Изучение технологического наследования по предложенной методологии проводилось для наиболее часто восстанавливаемых и упрочняемых деталей, отвечающих за ресурс ремонтируемых двигателей внутреннего сгорания – коленчатых и распределительных валов [10].

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  $\rho$ , точности размеров  $IT$  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  $\rho$ ; точность размеров (5) – квалитет  $IT$ ; шероховатость поверхности (1) – среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$ .

Эксплуатационные параметры качества рабочих поверхностей детали (HRC,  $\rho$ ,  $IT$  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  $\rho$ , точности размеров  $IT$  и рельефа поверхности  $Ra$  проводились на партии из 50 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  $K^H$ ,  $K^\rho$ ,  $K^{IT}$ ,  $K^R$  и коэффициенты взаимовлияния наследования свойств  $K^{H\rho}$ ,  $K^{HI}$ ,  $K^{HR}$ ,  $K^{\rho I}$ ,  $K^{\rho R}$ ,  $K^{IR}$ .

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.

### Технологическое наследование параметров качества коленчатого вала двигателя

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

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) улучшаются (см. табл. 1 и 2).

**1. Коэффициенты передачи технологического наследования  $K$  и результирующие коэффициенты  $K_p$  твердости  $H$ , отклонений формы  $\rho$ , точности размеров  $I$  и рельефа поверхности  $R$  коренных шеек коленчатого вала двигателя**

Операции механической обработки	Коэффициенты передачи технологического наследования при восстановлении коренных шеек			
	$K^H$	$K^p$	$K^I$	$K^R$
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

**2. Коэффициенты передачи технологического наследования  $K$  и результирующие коэффициенты  $K_p$  твердости  $H$ , отклонений формы  $\rho$ , 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

**3. Коэффициенты взаимовлияния  $K$  и сравнения  $K_c$  при передаче физико-механических  $H$  и геометрических  $\rho, I, R$  параметров качества поверхностей коренных шеек коленчатого вала двигателя**

Операции механической обработки	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования при восстановлении коренных шеек					
	$K^{Hp}$	$K^{HI}$	$K^{HR}$	$K^{pI}$	$K^{pR}$	$K^{IR}$
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

**4. Коэффициенты взаимовлияния  $K$  и сравнения  $K_c$  при передаче физико-механических  $H$  и геометрических  $\rho, I, R$  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

Коэффициенты взаимовлияния (см. табл. 3 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. 2). 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 «барье-

рами», так как  $K^{pR}$  и  $K^{IR} \rightarrow 0$ . Влияние предыдущих геометрических параметров на последующие их значения невелико. Наиболее заметно происходит изменение коэффициентов передачи для погрешности форм и точности обработки от черновых к чистовым операциям (см. табл. 1 и 2).

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 и шероховатость поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготов-

ки. 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 упрочнения стабильную твердость и однородность материала, а также равномерную толщину покрытия.

### Технологическое наследование параметров качества распределительного вала двигателя

Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества распределительного вала двигателя в процессе его восстановления (табл. 5 – 8).

#### 5. Коэффициенты передачи технологического наследования $K$ и результирующие коэффициенты $K_p$ твердости $H$ , отклонений формы $\rho$ , точности размеров $I$ и рельефа поверхности $R$ опорных шеек распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты передачи технологического наследования			
	$K^H$	$K^\rho$	$K^I$	$K^R$
Изношенная 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

#### 6. Коэффициенты передачи технологического наследования $K$ и результирующие коэффициенты $K_p$ твердости $H$ , отклонений формы $\rho$ , точности размеров $I$ и рельефа поверхности $R$ кулачков распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты передачи технологического наследования			
	$K^H$	$K^\rho$	$K^I$	$K^R$
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

#### 7. Коэффициенты взаимовлияния $K$ и сравнения $K_c$ при передаче физико-механических $H$ и геометрических $\rho, I, R$ параметров качества поверхностей опорных шеек распределительного вала двигателя

Операции восстановления и ремонта	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования					
	$K^{Hp}$	$K^{HI}$	$K^{HR}$	$K^{pI}$	$K^{pR}$	$K^{IR}$
Изношенная 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

#### 8. Коэффициенты взаимовлияния $K$ и сравнения $K_c$ при передаче физико-механических $H$ и геометрических $\rho, I, R$ 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 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) 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 процессе 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 являются 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-30 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  $Ra$ ; радиальное биение  $r$ ) 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-30 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).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. **Технологические** основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
3. **Ящерицын, П.И., Рыжов, Э.В., Аверченков, В.И.** Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
4. **Ящерицын, П.И., Скоринин, Ю.В.** Работоспособность узлов трения машин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с.
5. **Дальский, А.М.** Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
6. **Combined** phisico-chemical treatment: synergetic aspects / A.I. Gordienko, M.L. Kheifetz, L.M. Kozhouro [et al.]. – Minsk: Technoprint, 2004. – 200 p.
7. **Хейфец, М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
8. **Васильев, А.С., Кондаков, А.И., Клименко, С.А., Хейфец, М.Л., Гайко, В.А.** Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 32-38.
9. **Корешков, В.Н.** Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков, Н.А. Кусакин, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец. – Минск: Экономика и право, 2003. – 224 с.
10. **Кусакин, Н.А.** Менеджмент качества автотракторного ремонтного предприятия / Н.А. Кусакин, В.С. Точило, М.Л. Хейфец. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2009. – 180 с.

**REFERENCES**

1. *Theoretical Fundamentals of Technological Complex Design* / A.M. Rusetsky, P.A. Vityaz., M.L. Heifets [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belorussian Science, 2012. – pp. 239.
2. *Technological Fundamentals of Machinery Quality Control* / A.S. Vasiliev, A.M. Dalsky, S.A. Klimenko [et al.]. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 256.
3. Yashcheritsyn, P.I., Ryzhov, E.V., Averchenkov, V.I. Technological succession in mechanical engineering. – Minsk: *Science and Engineering*, 1977. – pp. 256.
4. Yashcheritsyn, P.I., Skorinin, Yu.V. Working capacity of machinery friction units. – Minsk: *Science and Engineering*, 1984. – pp. 288.
5. Dalsky, A.M. Technological Support of Machinery Units Precision. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 233.
6. Combined phisico-chemical treatment: synergetic aspects / A.I. Gordienko, M.L. Kheifetz, L.M. Kozhouro [et al.]. – Minsk: Technoprint, 2004. – 200 p.
7. Heifets, M.L. *Design of Combined Processing*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 272.
8. Vasiliev, A.S., Kondakov, A.I., Klimenko, S.A., Heifets, M.L., Gaiko, V.A. Technological control of strengthened surface quality operation values succession // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2011. – No.1. – pp. 32-38.
9. Koreshkov, V.N. Quality management at engineering enterprises / V.N. Koreshkov, N.A. Kusakin, Zh.A. Mrochek, M.L. Heifets. – Minsk: *Economy and Law*, 2003. – pp. 224.
10. Kusakin, N.A. *Quality Management of Auto-Tractor Repair Company* / N.A. Kusakin, V.S. Tochilo, M.L. Heifets. – Novopolotsk: Polotsk State University, 2009. – pp. 180.

*Рецензент д.т.н. А.А. Ситников*

УДК 621.92

DOI: 10.30987/article\_5cf7bd300bb206.32507323

**В.Ф. Макаров, д.т.н.**  
 (Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
 614090, Пермь, Комсомольский проспект, 29),

**А.С. Горбунов, аспирант**  
 (АО «Редуктор-ПМ», г. Пермь, Комсомольский пр., 93)  
 E-mail: makarovv@pstu.ru; gorbunov-as@reductor-pm.com

**Применение различных методов локального ППД для снижения влияния технологического концентратора напряжений на профильных поверхностях деталей транспортных машин**

*Установлено, что в процессе механической обработки поверхностей сложного профиля деталей, работающих в эксплуатации при больших знакопеременных нагрузках, в критических переходных зонах сопряженных поверхностей профиля образуются локальные технологические концентраторы напряжений, способствующие зарождению, росту усталостных трещин и последующему разрушению деталей в эксплуатации. Разработаны и внедрены методы снижения величины таких концентраторов напряжений на основе применения различных методов локального поверхностно пластического деформирования.*

**Ключевые слова:** технологические концентраторы напряжений; профильные поверхности; локальные переходные зоны; усталостные трещины; сопротивление усталости; резьба; шестерни; турбинные лопатки.