

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ

УДК 658.512:621.9

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАСЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ЗМЗ-53 В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА

*М.Л. ХЕЙФЕЦ, В.И. СЕМЕНОВ, А.В. ШАРДЫКО, М.В. ПОДОСЕТНИКОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрено влияние технологических воздействий на наследование физико-механических и геометрических параметров качества восстанавливаемых в процессе ремонта поверхностей распределительного вала. Рекомендовано обеспечивать стабильно высокую твердость после наплавки и закалки рабочих поверхностей. Предложено устранить из технологического процесса восстановления операции правки распределительного вала.

Введение. Технологическое управление - один из основных методов повышения качества машин, зачастую более эффективный, чем конструктивные решения и надежная эксплуатация. Ранее специалистами недооценивалась возможность технологической и эксплуатационной наследственности, т.е. результатов предыдущих операций на эксплуатационные свойства готовых изделий. В последнее время вопросам технологической и эксплуатационной наследственности уделяется все большее внимание. Однако наследование параметров качества восстанавливаемых поверхностей ремонтируемых изделий до сих пор не рассматривалось [1,2].

Обеспечение надежности и высокого качества продукции на этапе создания и освоения производства и ремонта изделий заключается в организации такой технологической подготовки и осуществлении производства, при которых продукция соответствовала бы требованиям конструкторской документации и не имела бы вредных последствий от технологических методов обработки. 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 [3].

Анализ механизмов наследования. 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 [1, 2]. Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов [4].

В технологической цепочке существуют своего рода «барьеры». Некоторые технологические факторы преодолеть эти «барьеры» не могут и в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [5]. Самым существенным «барьером» являются термические операции, а также операции, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микрогеометрию формируемой поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. В ходе этих операций различные пороки поверхности, такие как структурная неоднородность, поры, микротрещины, могут развиваться или «залечиваться». Следовательно, процессом технологического наследования можно управлять, с тем чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, - ликвидировать в его начале [1, 2].

Технологический процесс восстановления поверхности изделия может быть представлен в виде графа, выделяющего операции подготовки поверхности, ее восстановления и упрочнения, а также последующей обработки. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса представляет собой заготовку (З), а для ремонтного производства - исходную изношенную деталь. Конечная вершина технологического процесса - готовая восстановленная и упрочненная деталь (Д), поступающая на сборку. Ориентированные ребра графа показывают передачу эксплуатационных свойств детали при восстановлении, упрочнении и обра-

ботке. Передача ребра описывается коэффициентом наследования K , показывающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих S_j и последующих S_{j+1} значений свойства:

$$K = S_j / S_{j+1}. \tag{1}$$

Помимо прямой передачи свойств (рис. 1) при технологическом наследовании целесообразно оценивать их взаимовлияние (рис. 2).

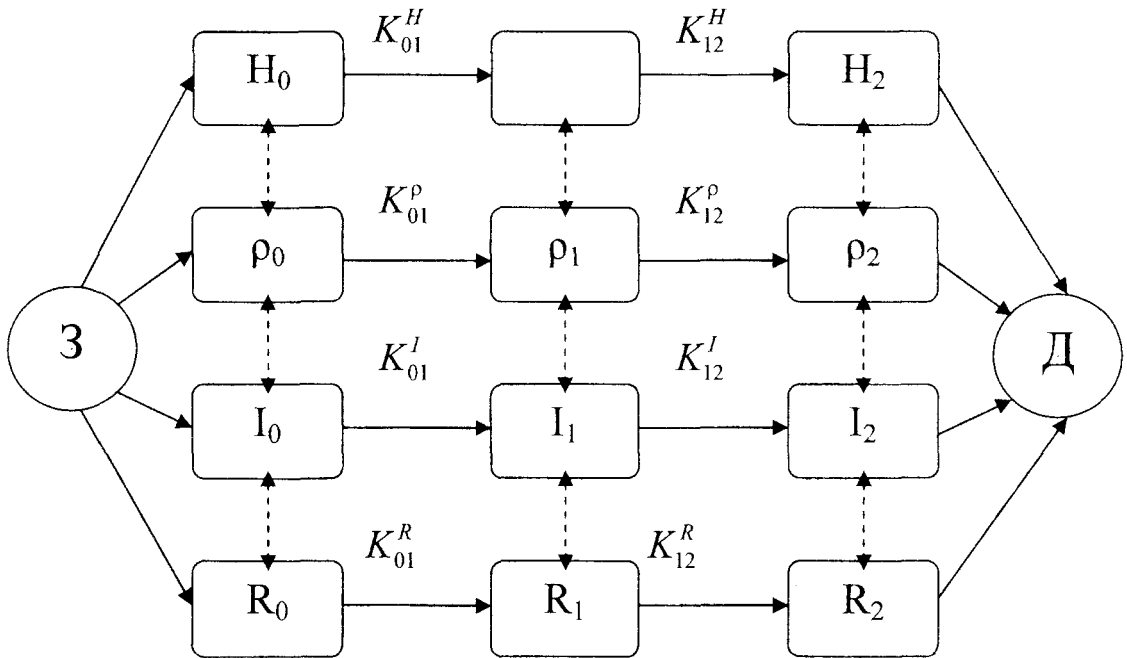


Рис. 1. Развернутый граф технологического наследования, учитывающий комплекс параметров качества в процессе подготовки, восстановления, упрочнения и обработки поверхностей детали

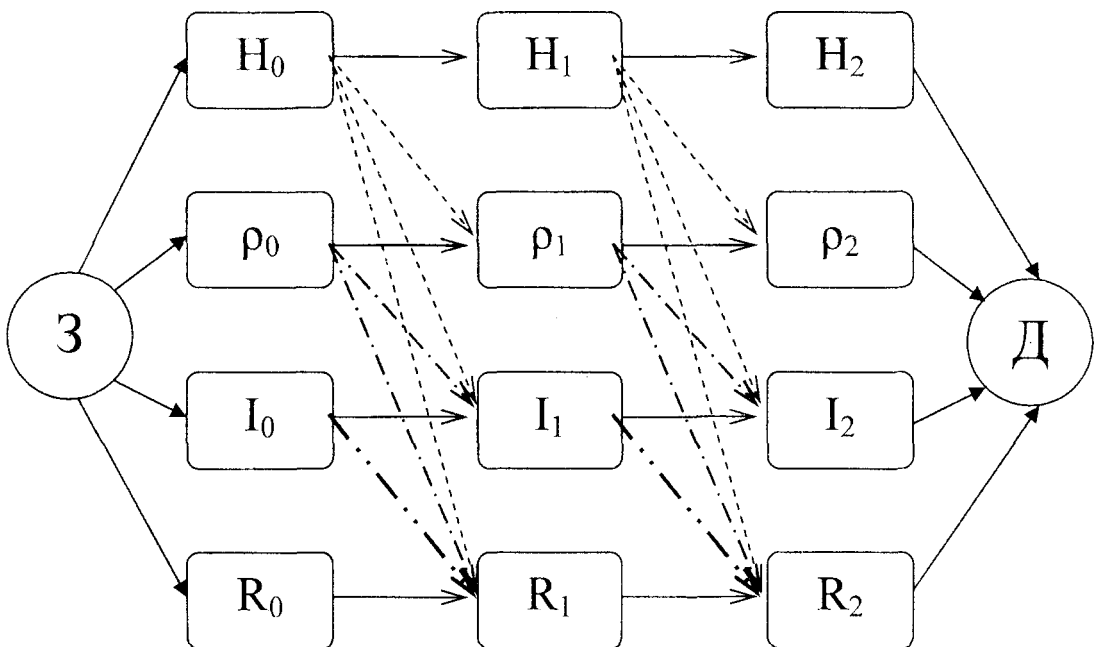


Рис. 2. Граф технологического наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических параметров качества рабочих поверхностей детали

Общую структуру технологического процесса можно представить как сложную многомерную систему, в виде последовательности изменения основных параметров качества детали [2, 5].

На вход системы поступают различные характеристики заготовки $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$, а на выходе обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для готовой детали $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности технологических $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$ факторов для каждой операции φ_i технологического процесса.

Так, для одного из параметров качества S после окончательной обработки:

$$S_p = a_p S_{p-1}^{b_p}. \quad (2)$$

Количественные связи технологической наследственности, зависящие от выбора метода обработки, определяются коэффициентами b , а основные условия обработки внутри этого метода – коэффициентами a .

Выполнив преобразования с уравнениями (2) для предшествующих операций $\varphi_{p-1}, \varphi_{p-2}, \dots, \varphi_1$, найдем общую математическую модель изменения параметра качества для всего технологического процесса:

$$S_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p-2}^{(b_p b_{p-1})} \dots a_1^{(b_p b_{p-1} \dots b_2)} S_0^{(b_p b_{p-1} \dots b_1)}. \quad (3)$$

Коэффициент наследственности a_i описывает влияние технологических факторов $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}$ на рассматриваемый параметр качества S_i для операции φ_i и может быть представлен:

$$a_i = k_{i0} t_{i1}^{k_{i1}} t_{i2}^{k_{i2}} \dots t_{in}^{k_{in}}, \quad (4)$$

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

Анализ выражений (3) и (4) показывает, что весь технологический процесс может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции и некоторой доли влияния предшествующих операций на исходное состояние заготовки (изношенной детали) S_0 , которые определяются коэффициентами наследственности b_1, b_2, \dots, b_p . Если на какой-либо операции φ_i коэффициент технологической наследственности $b_i = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данной операции, что может служить интерпретацией действия операции φ_i как непреодолимого «технологического барьера» [2, 5].

Методы исследования технологического наследования. Для описания технологического наследования эксплуатационных свойств распределительного вала двигателя ЗМЗ-53 в процессе ремонта рассматривалась совокупность физико-механических и геометрических свойств: твердости (Н), отклонений формы (р), точности размеров (I) и рельефа поверхности (R).

Для этого в качестве определяющего свойства поверхностей опорных шеек и кулачков принималась физико-механическая характеристика - твердость по Роквеллу (HRC) (табл. 1, 2), а в качестве зависимых от нее последовательно рассматривались отклонения формы поверхностей (биение р), точность размеров (кавалитет IT) и шероховатость поверхности (среднеарифметическое отклонение профиля Ra). Твердость является одним из наиболее распространенных и общедоступных интегральных критериев оценки свойств материалов, позволяющая судить о прочностных и триботехнических характеристиках материалов.

Эксплуатационные параметры измерялись как на исходных изношенных деталях (I) двигателей, поступивших на капитальный ремонт, так и после технологических операций маршрута восстановления (II) и обработки (III) детали (см. табл. 1,2).

Рассматривался типовой технологический маршрут процесса восстановления распределительного вала двигателя ЗМЗ-53, состоящий из следующих операций: 2) подготовительной; 2) мойки и очистки; 3) дефектации; 4) подрезки торцев; 5) наплавки кулачков вала; 6) правки погнутости вала по шейкам; 7) обдирочного шлифования наплавленных кулачков; 8) наплавки поверхности под шестерню и эксцентрик; 9) наплавки опорных шеек; 10) правки погнутости вала; 11) обдирочного шлифования поверхностей под эксцентрик и шестерню, опорных шеек; 12) фрезерования шпоночного паза; 13) закалки опорных шеек, шестерни и кулачков; 14) правки погнутости вала; 15) шлифования предварительного опорных шеек; 16) шлифования предварительного кулачков; 17) шлифования окончательного опорных шеек; 18) правки погнутости вала; 19) шлифования окончательного кулачков; 20) приемочного контроля; 21) мойки; 22) консервации.

Измерения твердости HRC, отклонений формы р, точности размеров IT и рельефа поверхности Ra проводились на большой партии ремонтируемых изделий (50 шт.). При этом партия разбивалась на 10 групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе. На основании расчетных результатов по формуле (1) определялись коэффициенты передачи наследования K^H, K^p, K^I, K^R для графа на рис. 1 и коэффициенты взаимовлияния технологического наследования $K^{Hp}, K^{HI}, K^{HR}, K^{pI}, K^{pR}, K^{IR}$ для графа

на рис. 2. Коэффициенты взаимовлияния рассчитывались как передача K для геометрических параметров качества K^{p1} , K^{pR} , K^{iR} или как величина обратная передаче $1/K$ для взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров.

Таблица 1

Средняя твердость (HRC) опорных шеек (№ 1...5) по группам (№ 1... 10) распределительных валов двигателя 3МЗ-53 после технологических операций (I... III)

№ шейки № группы	1	2	3	4	5	среднее
<i>I. Исходные данные заготовки</i>						
I	52,00	57,00	56,00	58,00	52,00	55,00
2	50,00	53,00	47,00	54,00	60,00	52,80
3	50,00	53,00	56,00	55,00	59,00	54,60
4	51,00	54,00	48,00	54,00	59,00	53,20
5	38,00	35,00	33,00	36,00	30,00	34,40
6	43,00	48,00	49,00	50,00	45,00	47,00
7	48,00	52,00	53,00	51,00	47,00	50,20
8	40,00	51,00	50,00	51,00	52,00	48,80
9	53,00	55,00	54,00	56,00	60,00	55,60
10	40,00	23,00	23,00	32,00	40,00	31,60
Среднее	46,50	48,10	46,90	49,70	50,40	48,32
<i>II. Наплавка, точение</i>						
1	14,00	13,00	15,00	12,00	16,00	14,00
2	14,00	16,00	17,00	21,00	13,00	16,20
3	17,00	18,00	13,00	15,00	14,00	15,40
4	15,00	14,00	17,00	16,00	17,00	15,80
5	15,00	18,00	17,00	14,00	16,00	16,00
6	18,00	19,00	21,00	17,00	19,00	18,80
7	15,00	13,00	11,00	18,00	19,00	15,20
8	14,00	18,00	14,00	16,00	18,00	16,00
9	21,00	19,00	16,00	14,00	19,00	17,80
10	15,00	15,00	16,00	18,00	17,00	16,20
Среднее	15,80	16,30	15,70	16,10	16,80	16,14
<i>III. Окончательное шлифование</i>						
1	53,00	55,00	56,00	44,00	51,00	51,80
2	54,00	55,00	52,00	53,00	57,00	54,20
3	49,00	49,00	53,00	52,00	54,00	51,40
4	50,00	48,00	47,00	53,00	51,00	49,80
5	50,00	54,00	55,00	55,00	54,00	53,60
6	55,00	51,00	55,00	53,00	54,00	53,60
7	47,00	43,00	50,00	51,00	50,00	48,20
8	53,00	49,00	52,00	50,00	56,00	52,00
9	57,00	58,00	56,00	54,00	55,00	56,00
10	50,00	52,00	53,00	55,00	51,00	52,20
Среднее	51,80	51,40	52,90	52,00	53,30	52,28

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

Таблица 2

Средняя твердость (HRC) кулачков (№ 1...16) по группам (№ 1...10) распределительных валов двигателя ЗМЗ-53

№ кулачка № группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	среднее
I. Исходные данные заготовки																	
1	55	53	52	56	56	57	57	54	58	53	53	48	56	59	55	52	54,63
2	49	51	51	57	46	52	55	59	58	56	57	52	56	50	48	55	53,25
3	53	53	55	57	50	58	58	53	56	58	55	53	54	53	54	53	54,56
4	56	52	57	52	58	55	59	53	59	61	54	57	45	39	38	54	53,06
5	15	13	15	8	9	11	14	13	12	11	12	10	8	10	13	15	11,81
6	51	50	51	52	53	53	47	56	54	58	48	52	56	52	51	54	52,38
7	49	51	53	57	53	58	54	59	53	55	58	59	56	53	52	47	54,19
8	52	50	51	53	57	53	56	54	55	52	57	58	47	49	50	51	52,81
9	53	52	56	58	54	53	48	57	54	59	59	60	53	55	56	53	55,00
10	16	15	10	11	8	12	9	11	15	13	12	9	10	15	9	9	11,50
Среднее	44,90	44,00	45,10	46,10	44,40	46,20	45,70	46,90	47,40	47,60	46,50	45,80	44,10	43,50	42,60	44,30	45,32
II. Наплавка, точение																	
1	14	16	17	15	17	18	12	13	12	22	13	14	14	15	17	14	15,19
2	17	18	13	16	11	10	17	18	13	12	16	21	19	16	11	12	15,00
3	15	14	17	16	16	19	15	14	17	14	16	15	15	16	13	12	15,25
4	16	11	16	13	15	21	15	17	21	13	14	19	22	16	21	20	16,88
5	13	11	10	7	7	9	12	11	7	11	10	9	7	9	11	9	9,56
6	14	17	14	18	13	19	21	17	16	17	16	19	15	21	17	19	17,06
7	18	13	16	13	12	16	11	15	14	16	14	15	13	11	15	14	14,13
8	13	17	16	17	16	14	16	16	16	17	19	14	18	14	21	20	16,50
9	20	17	14	16	23	14	18	14	18	21	22	21	19	16	19	16	18,00
10	11	11	10	9	6	11	9	10	13	13	5	7	8	10	7	9	9,31
Среднее	15,10	14,50	14,30	14,00	13,60	15,10	14,60	14,50	14,70	15,60	14,50	15,40	15,00	14,40	15,20	14,50	14,69
III. Окончательное шлифование																	
1	58	53	53	56	56	57	54	57	46	52	55	48	56	59	55	51	54,13
2	49	51	53	57	46	52	55	57	52	56	57	55	52	57	52	51	53,25
3	56	52	57	57	50	51	53	57	56	48	55	53	51	52	54	45	52,94
4	51	50	43	52	51	38	38	43	46	50	51	47	45	39	38	44	45,38
5	48	56	51	44	49	51	54	53	48	56	53	49	43	57	53	56	51,31
6	54	53	48	57	53	53	47	56	54	52	55	52	57	51	53	51	52,88
7	53	56	57	48	54	50	56	53	61	55	52	50	47	53	53	51	53,69
8	52	55	52	51	55	53	56	57	55	52	57	35	47	51	52	55	52,19
9	53	52	56	58	54	53	48	57	54	59	59	60	53	55	56	53	55,00
10	54	56	53	56	50	53	57	54	53	55	53	35	53	57	46	52	52,31
Среднее	52,80	53,40	52,30	53,60	51,80	51,10	51,80	54,40	52,50	53,50	54,70	48,40	51,40	53,10	51,20	50,90	52,31

Результаты и обсуждение наследования физико-механических и геометрических параметров качества. Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества распределительного вала двигателя 3МЗ-53 в процессе ремонта (табл. 3, 4).

Таблица 3

Коэффициенты передачи технологического наследования K и результирующие коэффициенты K_r твердости H , отклонений формы p , точности размеров I и рельефа поверхности R распределительного вала двигателя 3МЗ-53 (в числителе - средние коэффициенты по опорным шейкам вала, в знаменателе - по кулачкам)

Операции процесса ремонта	Коэффициенты передачи технологического наследования			
	K^H	K^p	K^I	K^R
Дефектация – восстановление: K_1	3.3/3.3	0.8/--	0.3/0.9	0.4/0.6
Восстановление – окончательная обработка: K_2	0.3/0.3	1.9/--	3.9/1.1	4.1/2.9
$K_p = K_1 \cdot K_2$	0.99/0.99	1.52 –	1.17/0.99	1.64/1.74

Таблица 4

Коэффициенты взаимовлияния K и сравнения K_s при передаче физико-механических H и геометрических p, I, R параметров поверхностей распределительного вала двигателя 3МЗ-53

Операции процесса ремонта	Коэффициенты взаимовлияния технологического наследования					
	K^{Hp}	K^{HI}	K^{HR}	K^{pI}	K^{pR}	K^{IR}
Дефектация – восстановление: K_1	1208/--	302/23.9	35.5/45.8	0.3/--	0.04/--	0.03/1.6
Восстановление – окончательная обработка: K_2	538/--	394/8.6	43.6/38.7	1.0/--	0.1/--	0.4/5
$K_s = K_1/K_2$	2.25/--	0.77/2.78	0.81/1.18	0.3/--	0.4/--	0.08/0.32

Коэффициенты передачи (см. табл. 3) показывают, что технологический процесс восстановления и упрочнения коренным образом отличается от рационального технологического процесса механической обработки. При механической обработке в процессе изготовления детали на начальных операциях устраняется вредное влияние технологической наследственности, т.е. коэффициенты велики ($K \gg 1$) для геометрических и малы для физико-механических ($1 > K > 0$) параметров качества, а на заключительных операциях они стабилизируются ($K \rightarrow 1$).

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. 4) позволяют оценить значимость как технологических операций, так и технологических факторов и параметров на отдельных операциях. Так, твердость материала существенно влияет на геометрические параметры. Для отклонений формы это влияние особенно важно на начальных операциях. В остальных случаях оно стабильно по всем технологическим переходам.

Геометрические параметры цилиндрических поверхностей опорных шеек наследуются слабо, особенно это заметно на начальных операциях. Причем для микрорельефа поверхности (шероховатости) операции восстановления являются технологическими «барьерами» (так как K^{pR} и $K^{IR} \rightarrow 0$). Дальнейшее влияние предыдущих геометрических параметров на последующие также невелико и сказывается только на точности обработки.

Графики изменения твердости опорных шеек и кулачков распределительных валов двигателя 3МЗ-53 (рис. 3, 4) показывают, что технологическими «барьерами» при восстановлении рабочих поверхностей являются операции наплавки, а окончательные геометрические параметры качества поверхностей формируются при шлифовании.

В результате исследований 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, 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.

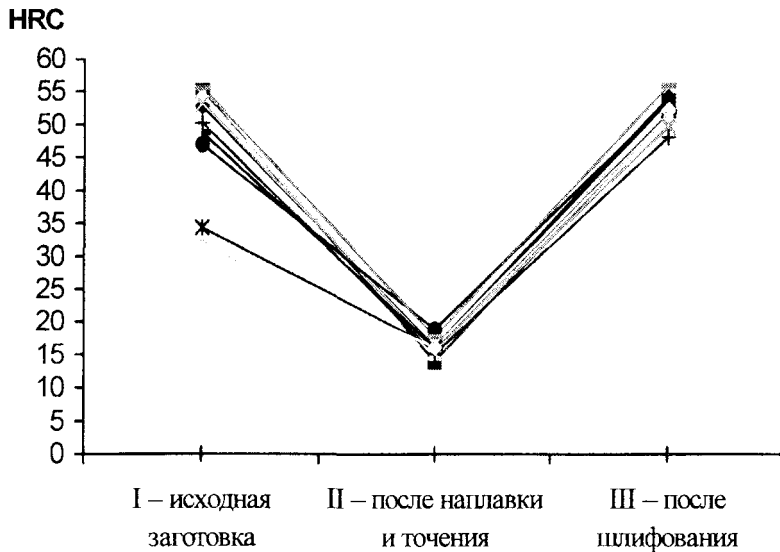


Рис. 3. Изменение твердости опорных шеек распределительных валов двигателя 3МЗ-53 в процессе ремонта

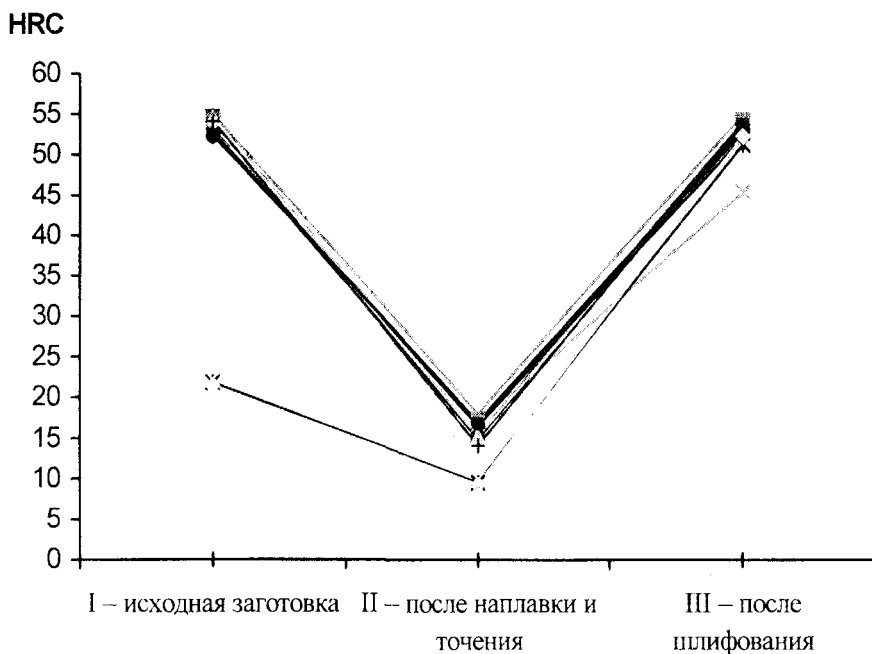


Рис. 4. Изменение твердости кулачков распределительных валов двигателя 3МЗ-53 в процессе ремонта

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества позволил выявить определяющие процессы передачи свойств при восстановлении, упрочнении и обработке изношенных поверхностей опорных шеек и кулачков распределительного вала двигателя 3МЗ-53.

В результате анализа установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволоки Нп-ЗОХГСА в среде CO_2 на твердость HRC поверхности оказывают влияние сила тока электрической дуги, диаметр наплавочной проволоки, а также скорости подачи и 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 при управлении качеством обработки главное внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

Выводы. Проведенные экспериментальные и аналитические исследования позволили выявить определяющие процессы передачи свойств при восстановлении, упрочнении и обработке изношенных поверхностей опорных шеек и кулачков распределительного вала двигателя ЗМЗ-53 и в соответствии с ними разработать регламенты для операций технологического процесса.

По результатам исследований рекомендовано:

- 1) обеспечить в процессе наплавки стабильную твердость и однородность материала покрытия, а в процессе закалки высокую твердость поверхности (54...56 HRC);
- 2) устранить операции правки из технологического процесса восстановления распределительного вала для снижения взаимного радиального биения поверхностей до 0,02 мм и обеспечения требуемой точности рабочих поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. -Новополоцк: ПГУ, 1996. - 136 с.
2. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. - М.: Машиностроение, 2003. - 256 с.
3. Иванов В.П. Основы ремонта машин. - Новополоцк: ПГУ, 2000. -256 с.
4. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин - М.: Машиностроение, 1975. - 223 с.
5. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. - Мн.: Наука и техника, 1977. - 256 с.