

УДК 621.787.4

Р. Н. Шадуро, канд. техн. наук, доц., В. Е. Панкратов, С. Н. Михеенко**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАСЛЯНОГО НАСОСА СПОСОБАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

В работе приведены результаты исследований повышения качества обработки поверхностей дисков масляного насоса плоскошлифовального станка, работающих в режиме трения скольжения, различными способами поверхностного пластического деформирования (ППД). Применение группового дорнования позволило обеспечить точность отверстий подшипников скольжения по 6-му качеству. Накатывание торцовых поверхностей дисков позволило улучшить их геометрические и физико-механические показатели качества и повысить износостойкость более чем в 2 раза.

Введение

В машиностроении Республики Беларусь эксплуатируется большой парк металлорежущего оборудования, эффективность работы которого точностные и экономические показатели, надежность и долговечность в значительной степени зависят от нормальной работы пар трения их агрегатов. Износ пар трения отдельных агрегатов станков часто не обеспечивает их требуемую надежность в условиях эксплуатации, в цехах машиностроительных заводов.

Непрерывно возрастающие требования к эксплуатационным свойствам деталей машин требуют постоянного совершенствования технологических процессов их обработки с целью повышения качества. Среди различных способов повышения эксплуатационных свойств деталей наиболее эффективным является ППД.

Анализ различных способов обработки ППД показывает, что наиболее подходящими для окончательной обработки поверхностей подшипников скольжения является дорнование, а для торцовых поверхностей, работающих в режиме трения скольжения, накатывание роликом.

Методика исследования

Задний и передний диски масляного насоса представляют собой детали типа фланец, состоящие из стального корпуса, в центральное отверстие которого запрес-

сована втулка из бронзы БР010Ф1, выполняющая роль подшипника скольжения, и наплавленной торцовой вставки толщиной 5 мм из бронзы БР010Ф1, торцовая поверхность которой работает в режиме трения скольжения.

Подшипник скольжения должен иметь точность отверстия $\varnothing 36H6$, шероховатость поверхности $Ra = 0,32$ и допуск цилиндричности – 0,008 мм. В заводском техпроцессе указанные требования обеспечивались шлифованием отверстия.

Учитывая, что традиционное дорнование может повысить точность на один квалитет ($\varepsilon = 1,4-1,6$) [1], в работе предложено групповое дорнование. При групповом дорновании, за счёт повышения исходной точности отверстий, значительно снижается суммарная погрешность дорнования [1]. При этом повышение исходной точности осуществляется не за счёт предварительной механической обработки, а в результате сортировки предварительно обработанных деталей на группы по размерам отверстий.

Для испытаний группового дорнования были отобраны 15 комплектов дисков и втулок. Диаметры отверстий втулок до запрессовки соответствовали 7-му качеству по ГОСТ 25376–82. После запрессовки рассеяние размеров отверстий втулок увеличилось и достигло 8-го качества точности.

Для расчёта точности процесса дорнования и размеров дорнов, в результате эксперимента, была получена зависимость остаточных деформаций от натягов в следующем виде:

$$\delta_{ост} = 0,65i - 0,003.$$

Расчёты, сделанные согласно методике [2], показывают, что для обеспечения точности групповым дорнованием по 6-му качеству необходимо, чтобы отверстия, имеющие исходную точность по 8-му качеству, подверглись сортировке на две группы. При этом следует ожидать расчетный коэффициент уточнения $\varepsilon_p = 2,6$.

Размеры инструментов для группового дорнования рассчитывались по методике [3] с учётом, что два дорна обеспечивают натяги, при которых будет формироваться оптимальная шероховатость в процессе дорнования.

Накатывание поверхностей производилось на токарно-винторезном станке 16К20 при обильной смазке машинным маслом. Обработка осуществлялась инструментом с упругим контактом между деформирующим инструментом и обрабатываемой деталью.

Измерение шероховатости поверхностей торцов производилось при помощи профилографа-профилометра модели 201 завода «Калибр». Оценка шероховатости осуществлялась при помощи критерия Ra.

Сначала были проведены исследования по выявлению влияния некоторых технологических и конструктивных факторов на шероховатость после накатывания, так как имеющейся априорной информации оказалось недостаточно для проведения многофакторного эксперимента. Для выявления влияния некоторых технологических и конструктивных параметров на формирование шероховатости поверхностей были проведены многофакторные эксперименты (МФЭ) с получением уравнения регрессии типа

$$Ra = a \cdot R^b a_{i-1}. \quad (1)$$

Переход от кодированных значений факторов к натуральным проводили при помощи формулы

$$\bar{x}_i = \frac{2(\ln x_i - \ln x_i^b)}{\ln x_i^b - \ln x_i} + 1. \quad (2)$$

Проверку гипотезы однородности дисперсии производили с помощью критерия Кохрена G. Оценка значимости коэффициентов уравнений осуществлялась с помощью критерия Стьюдента. Гипотеза адекватности модели подтверждалась критерием Фишера.

Применение многофакторного планирования позволило получить математическую модель, позволяющую управлять формированием оптимальной шероховатости при накатывании.

В процессе обработки накатыванием происходит упрочнение поверхностного слоя металла, что увеличивает микротвёрдость и другие характеристики, определяющие механические свойства детали.

С целью выявления упрочняющего эффекта при накатывании были проведены исследования по определению глубины и степени упрочнения. Степень упрочнения определялась как

$$\Delta H = \frac{H_{пов} - H_0}{H_0} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $H_{пов}$ – твёрдость, измеренная на накатанной поверхности; H_0 – твёрдость основного металла.

Глубина упрочнения определялась как толщина зоны металла с повышенной твёрдостью.

Для определения глубины и степени упрочняющего слоя, полученного при накатывании, из исследуемых объектов вырезались образцы. На рабочей поверхности образца сошлифовывалась плоскость под углом 3^0 . Доводка образцов осуществлялась по известной методике.

Замер микротвердости производился на микротвердомере модели

ПМТ-3 при вдавливании алмазной пирамиды с нагрузкой 50 г.

Исследование износостойкости заключалось в сравнении износостойкости торцовых поверхностей дисков, накатанных роликами и подвергнутых шлифованию в производственных условиях.

Для этого накатанные и шлифованные образцы подвергались износу в сопряжении с контртелами – прототипами детали статора насоса – на специальном стенде для определения износа.

Величина износа замерялась через определённые промежутки времени в соответствии с методикой определения износа. Затем по полученным значениям износа в зависимости от времени изнашивания строились графики износа.

Из анализа методов определения величины износа следует, что наиболее удобным, простым и достаточно точным является метод определения величины износа с помощью профилографирования.

Измерение величины износа по этому методу осуществляется путем нанесения на торцевой поверхности каждого образца кольцевой выточки глубиной 50...60 мкм с помощью острого резца; изменение глубины этой выточки определяет величину износа.

Торцы дисков подвергались токарной обработке и накатыванию с конструктивными и технологическими параметрами, обеспечивающими оптимальную шероховатость ($P = 900 \text{ Н}$, $S = 0,06 \text{ мм/об}$, $r = 3 \text{ мм}$, $Ra_{исх} = 1,6 \text{ мкм}$, $\alpha = 45^\circ$)

Контртела изготавливались из стали 40Х. После термической обработки до HRC 48...50 образцы шлифовались ($Ra = 0,32 \text{ мкм}$).

Время испытания между двумя контрольными замерами составляет 4 часа. Общая продолжительность испытания составляет 24 часа.

Результаты исследований и их обсуждение

При исследовании точности, обеспечиваемой групповым дорнованием, произ-

водились измерения размеров отверстий втулок до запрессовки, после запрессовки и группового дорнования, результаты которых подвергались статистическим исследованиям и корреляционному анализу. Ставилась задача оценить точность группового дорнования и роль технологической наследственности в формировании точности отверстий.

Для количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование точности при обработке отверстий с применением группового дорнования использовались коэффициенты M и N .

Коэффициент M , определяющий долю дисперсии собственной погрешности в дисперсии выходной, определяется зависимостью

$$M = \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = (1 - r_{xy}^2) \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где S_{yx}^2 – дисперсия собственной погрешности; S_y^2 – дисперсия выходной погрешности.

Доля дисперсии, унаследованной от исходной погрешности, в дисперсии выходной определяется коэффициентом N :

$$N = \frac{b^2 \cdot S_x^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = \frac{S_y^2 \cdot S_x^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = r_{xy}^2 \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $b^2 S_x^2$ – доля дисперсии, унаследованная от входной S_x^2 ; r_{xy} – коэффициент корреляции.

Учитывая, что исследованиям подвергались отверстия 15 комплектов из двух дисков (переднего и заднего), то объём выборки отверстий составил 30 штук.

Результаты статистических исследований и корреляционного анализа точности отверстий после группового дорнования представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные статистические параметры выборочных распределений погрешностей размеров отверстий

Наименование операции	Размах выборки	S_1 , мкм	\bar{X}_1 , мкм	T_1 , мкм	ε_{σ}	r_{xy}	M, %	N, %
Растачивание	23	4,0	0	24	–	–	–	–
Запрессовка	38	6,6	35,96	39,6	0,63	0,62	61,6	38,4
Сортировка	19	3,3	35,97	19,8	2,00	–	–	–
	19	3,3	35,95	19,6	2,00	–	–	–
Групповое дорнование	14	2,5	36,007	15	2,64	0,65	57,7	42,3

Как видно из табл. 2, для обеспечения заданной точности $36H6^{(+0,016)}$ необходимо провести сортировку заготовок на две группы с групповыми допусками $\delta_{исх}^{GP} = 19$ мкм.

После дорнования заготовок по группам получено общее уточнение $\varepsilon_{\sigma} = 2,64$, которое мало отличается от расчётного $\varepsilon_p = 2,6$, т. е. подтвердилось высказанное выше предположение о повышении точности, обеспечиваемой групповым дорнованием при сортировке деталей на две группы.

Таким образом, операция «Сортировка деталей на группы» выполняет роль «технологического барьера», т. е. не позволяет погрешностям, образовавшимся при запрессовке и имеющим значительную величину, наследоваться при дорновании отверстий по группам. Это подтверждается малым значением коэффициента $N = 42,3$ %, определяющего долю, унаследованную от исходной погрешности.

В [4] показано, что при традиционном дорновании этот коэффициент превышает 60 %. При запрессовке втулок образуются значительные собственные погрешности в результате усадки, определяемые коэффициентом $M = 61,6$ %.

Таким образом, групповое дорнование позволяет за счёт повышения исходной точности, не прибегая к дополнительной предварительной обработке отверстий, а сортируя детали по размерам отверстий на группы, повысить в 2 и бо-

лее раз точность дорнования.

Формирование шероховатости при накатывании торцов диска определяется следующими технологическими и конструктивными факторами: сила деформирования P ; подача деформирующего ролика S ; радиус рабочей поверхности ролика r ; угол наклона деформирующего ролика к обрабатываемой поверхности α ; исходная шероховатость поверхности $Ra_{исх}$.

Основным технологическим фактором, влияющим на шероховатость поверхности, является сила деформирования.

На рис. 1 представлены зависимости шероховатости от усилия накатывания при различных радиусах профиля ролика.

Как видно из рис. 1, уже при малых значениях сил деформирования происходит значительное снижение высоты исходных неровностей. По мере увеличения сил деформируются всё большие объёмы металла, сминаются микронеровности и упрочняется поверхностный слой. При этом сопротивление деформации в процессе накатывания увеличивается, а уменьшение шероховатости замедляется, и она достигает оптимальной величины при определённых усилиях деформирования.

При усилиях, значительно превышающих оптимальное усилие деформирования, происходит некоторое увеличение шероховатости вследствие пере-

наклёпа поверхностных слоёв детали.

Изменение радиуса профиля деформирующего ролика изменяет площадь зоны контакта инструмента с деталью, что приводит к изменению значения оптимального усилия накатывания. Наименьшая шероховатость поверхности соответствует радиусу профиля ролика $r = 3$ мм.

Значительное влияние на шероховатость поверхности оказывает подача. За-

висимости шероховатости поверхности от подачи имеют плавный характер (рис. 2).

Как видно из графиков (см. рис. 2), при увеличении подачи шероховатость поверхности сглаживается в меньшей степени, что объясняется уменьшением краткости приложения усилия деформирования.

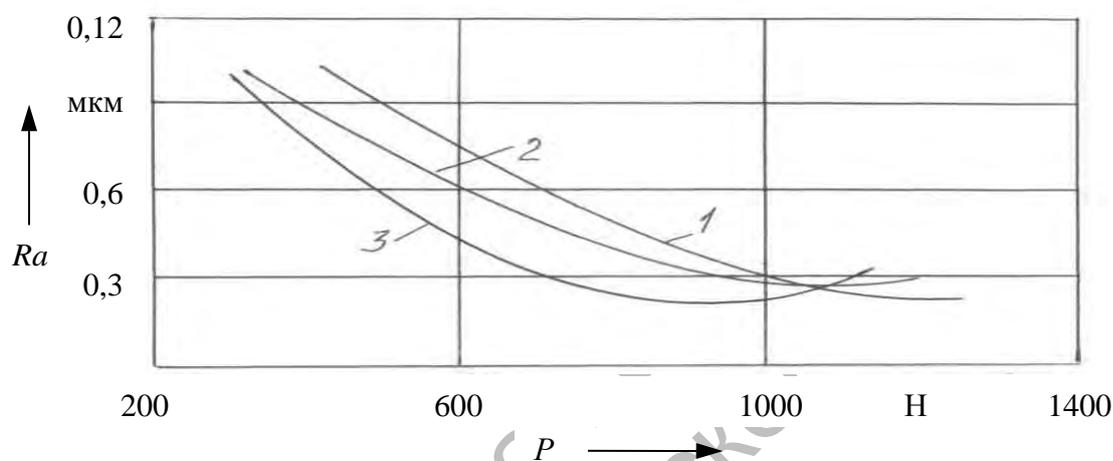


Рис. 1. Зависимости шероховатости поверхности от усилия накатывания: 1 – $r = 6$ мм; 2 – $r = 4$ мм; 3 – $r = 3$ мм ($V = 120$ м/мин; $S = 0,06$ мм/об; $Ra_{исх} = 2,5$ мкм)

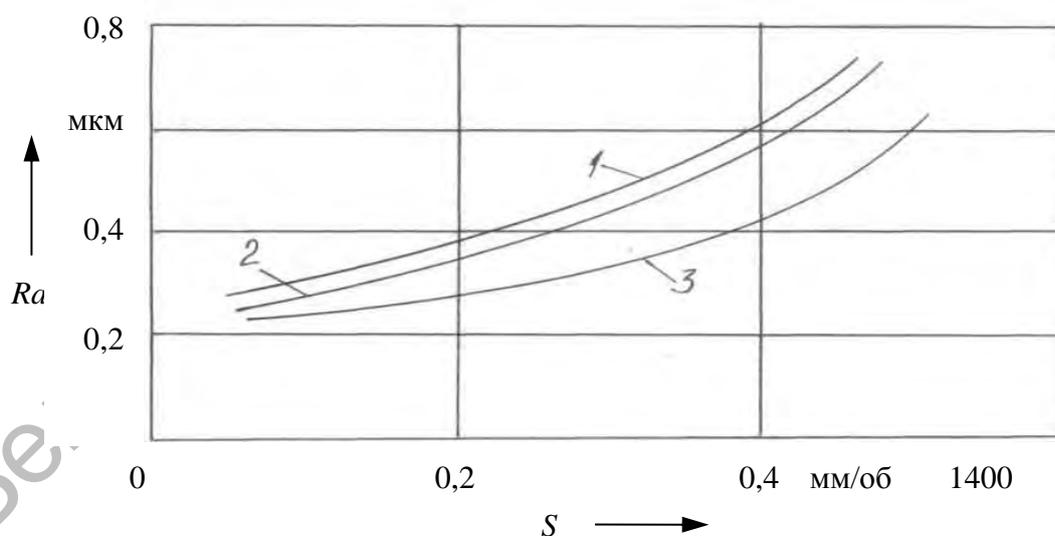


Рис. 2. Зависимости шероховатости поверхности от подачи: 1 – $r = 6$ мм; 2 – $r = 4$ мм; 3 – $r = 3$ мм ($V = 120$ м/мин; $P = 900$ Н; $Ra_{исх} = 2,5$ мкм; $\alpha = 45^\circ$)

Для выявления роли технологических и конструктивных факторов в формировании шероховатости поверхностей торцов был реализован многофакторный эксперимент типа 2⁵.

На основе априорной информации [5] и результатов вышеприведенных опытов была выбрана область экспериментов и установлены уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 2).

Табл. 2. Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	P, Н	S, мм/об	R, мм	α, град	Ra _{исх.} , мкм
1 Код	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
2 Основной уровень x ₁ = 0	650	0,15	4,5	35	2,4
3 Интервал варьирования	250	0,09	1,5	10	0,8
4 Нижний уровень x ₁ = -1	400	0,06	3	25	1,6
5 Нижний уровень x ₁ = 1	900	0,24	6	45	3,2

В результате проведенного МФЭ после стандартной математической обработки и статистической проверки коэффициентов при помощи критерия Стьюдента было получено уравнение регрессии. После перехода от кодированных значений факторов к натуральным при помощи формулы (2) и последующего потенцирования было получено уравнение регрессии мультипликативного вида:

$$Ra = \frac{2,826 \cdot S^{0,311} \cdot r^{0,910} \cdot Ra_{исх}^{1,420}}{P^{0,725} \cdot \alpha^{0,411}} \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает исходная шероховатость, радиус профиля деформирующего ролика, усилие деформирования.

Среднее значение отклонения расчётных значений шероховатости по формуле (4) от опытных не превышает 10 %. Таким образом, можно считать, что уравнение отражает данные, полученные в результате экспериментов, и позволяет управлять формированием оптимальной шероховатости накатных торцевых поверхностей.

На рис. 3 представлены результаты исследований микротвёрдости и глубины наклёпанного слоя.

Как видно из рис. 3 (кривая 1), при усилии деформирования P = 400 Н мик-

ротвёрдость поверхностного слоя повышалась на глубине 0,3 мм. Степень наклёпа составила 32 %. Увеличение усилия деформирования до P = 900 Н обеспечило более значительное увеличение микротвёрдости (53 %) при глубине залегания упрочнённого слоя – 0,45 мм. Значения других технологических и конструктивных параметров процесса накатывания принимались такими, чтобы обеспечивалась оптимальная шероховатость поверхности торца.

Зависимости величины износа поверхности образцов от времени изнашивания, полученные на основании проведенных исследований, приведены на рис. 4. Видно, что у шлифованных образцов (кривая 1) интенсивность износа значительно выше, чем у накатанных. В течение первых 4 часов протекает период приработки, затем наступает интенсивный нормальный износ. За 24 часа исследований величина износа достигла 54 мкм.

У образцов, накатанных роликами, период приработки длится 2 часа, что объясняется более близкой по форме и размерам шероховатости к оптимальной. После 24 часов изнашивания накатанных образцов износ достиг 24 мкм. Это объясняется тем, что в результате обработки накатыванием роликами, об-

разцы получили поверхностное упрочнение, которое и обеспечивает менее интен-

сивное изнашивание поверхностного слоя.

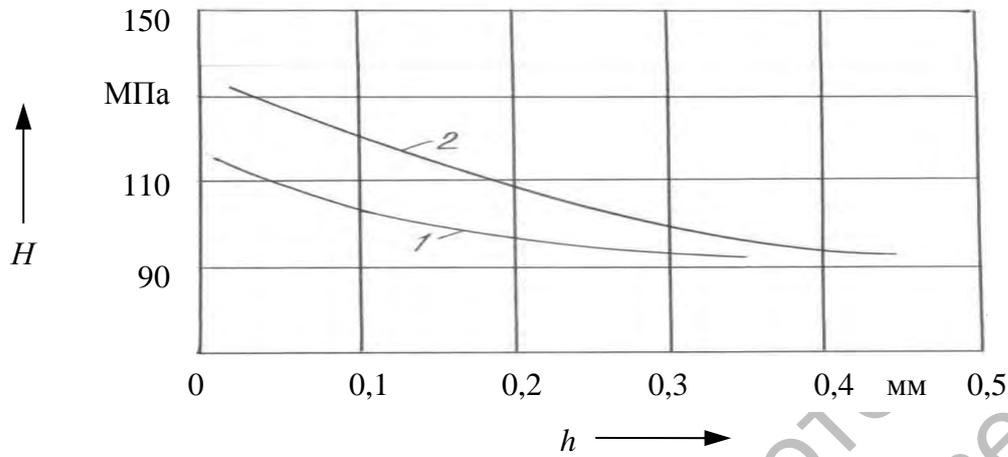


Рис. 3. Микротвёрдость упрочнённых поверхностей образцов: 1 – $P = 400$ Н; 2 – $P = 900$ Н, $S = 0,06$ мм/об; $Ra_{исх} = 2,5$ мкм; $\alpha = 45^\circ$; $r = 3$ мм

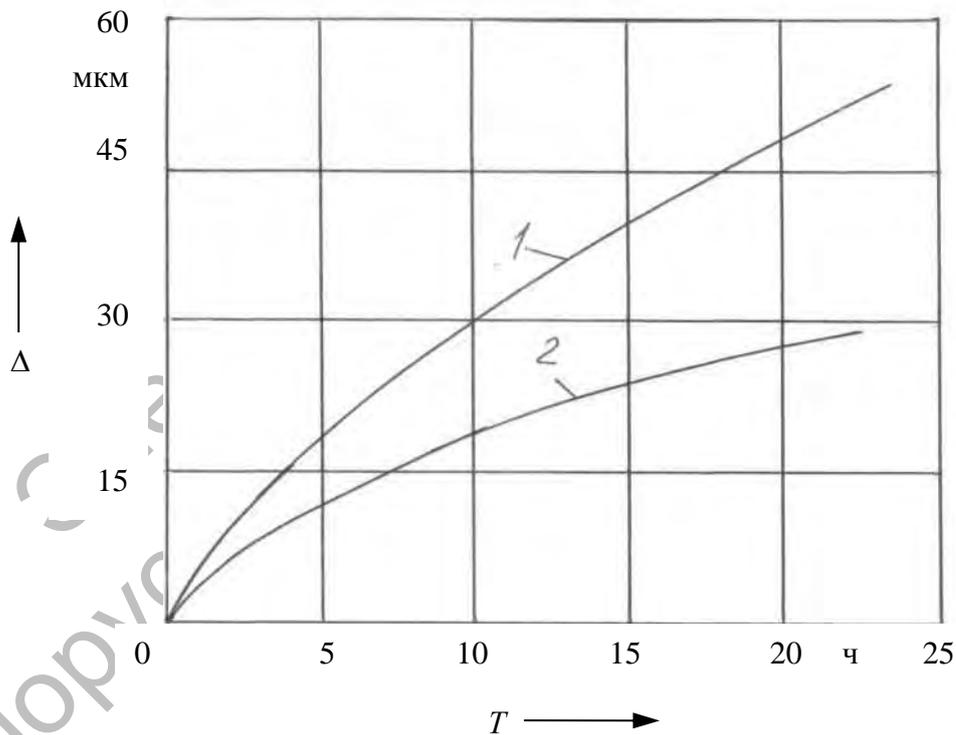


Рис. 4. Износ торцевой поверхности диска: 1 – после шлифования, 2 – после обкатывания

Таким образом, установлено, что величина износа и длительность приработки зависят не только от высоты, формы

штрихов и характера микропрофиля, но и от степени упрочнения поверхностного слоя, т. е. обработка поверхностей

трения накатыванием обеспечивает шероховатость, оптимальную для пар трения, и упрочнение поверхностного слоя, присутствующие процессу трения.

Выводы

Производственные испытания процессов дорнования и накатывания поверхностей трения переднего и заднего дисков масляного насоса показали, что:

– для обеспечения точности подшипников скольжения дисков $\varnothing 36H6$ необходимо применять групповое дорнование;

– накатывание рабочих торцов дисков обеспечило шероховатость поверхностей $Ra 0,16-0,20$ мкм, поверхностный слой получил упрочнение на глубине 0,45 мм при степени налёпа 53 %;

– износостойкость накатанных поверхностей оказалась более чем в 2 раза выше по сравнению со шлифованными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шадуро, Р. Н.** Способы повышения точности дорнования отверстий / Р. Н. Шадуро, П. А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 282–286.

2. **Шадуро, Р. Н.** Повышение качества подшипников скольжения поверхностным пластическим деформированием / Р. Н. Шадуро, В. Е. Панкратов, С. Н. Михеенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 2. – С. 49–55.

3. **Шадуро, Р. Н.** Инструментальное обеспечение при различных способах дорнования / Р. Н. Шадуро, В. Е. Панкратов, П. А. Шацкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 142–149.

4. **Шадуро, Р. Н.** Прогнозирование и обеспечение точности отверстий при дорновании / Р. Н. Шадуро, П. А. Шацкий // Инновации в науке и образовании как основа в развитии экономики : сб. науч. тр. – 2006. – № 5. – С. 178–181.

5. **Парфиянович, В. С.** Руководство по проектированию процессов чистового накатывания поверхностей / В. С. Парфиянович. – Минск : Польша, 1983. – 88 с.

Белорусско-Российский университет
РУПП «Станкозавод «Красный Борец»
РУП «Могилевтрансмаш»
Материал поступил 08.05.2007

R. N. Shaduro, V. E. Pankratov, S. N. Micheenko
Quality increase of friction of oil pump parts
by surface plastic deformation
Belarusian-Russian University
RUPE «Machine-tool plant «Krasny Borets»
RUE «Mogilevtransmash»

The paper provides for the results of investigation into quality increase in machining of the oil pump disk surfaces of the face-grinding machine by different methods of surface plastic deformation, the disks working in the mode of sliding friction. The application of group mandrelling enabled the accuracy of plain bearing holes to be provided on the sixth grade.

Roll forming of disk faces allowed to improve their geometric and physical and mechanical quality characteristics and to increase the wear resistance more than twice compared to grinding.