

УДК 621.923.2

## КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКОВ ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ

© 2020 В.А. Дмитриев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 10.06.2021

Изложены и уточнены результаты исследований параметров качества поверхности и точности колец подшипников после финишной абразивной обработки дорожек качения (шлифования и суперфиниша) и после гидродробеструйного (ГДУ) упрочнения или упрочнения микрошариками (УМШ) с применением смазочно-охлаждающих жидкостей.

**Ключевые слова:** качество, долговечность, подшипники, дробеструйная обработка.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-24-28

Повышение надежности и долговечности опор качения наряду с конструкторскими решениями может быть достигнуто путем рационального воздействия на поверхностные слои деталей технологическими методами. Использование традиционных способов ППД, основанных на вдавливании деформирующего инструмента в обрабатываемую поверхность (обкатывание шариком, роликом, алмазное выглаживание) нетехнологично при обработке маложестких тонкостенных кольцевых деталей со сложной конфигурацией поверхности, имеющих малоразмерные конструктивные элементы в виде галтелей и канавок. Поэтому получила распространение схема обработки, при которой отсутствует жесткая кинематическая связь деформирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью. К подобной схеме относятся способы дробеструйной обработки с применением СОЖ на пневмодробеструйных и гидродробеструйных установках [1, 2].

Процессы ГДУ и УМШ принято оценивать постоянными параметрами, зависящими от конструкции установок, и изменяемыми параметрами режима обработки – размерами деформирующих элементов, рабочим давлением на выходе сопла-эжектора и продолжительностью обработки поверхности детали. Контроль режима обработки осуществлялся по результатам измерения стрелы прогиба контрольных пластин после их односторонней обработки на выбранном режиме. В целях установления количественных связей параметров качества поверхности дорожек качения с режимами дробеструйных способов обработки применен статистический метод планируемых экспериментов с логарифмическим преобразованием функции отклика и факторов. Форма искомой

Дмитриев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: dmitriev\_v\_a@mail.ru

зависимости шероховатости поверхности от режимов обработки:

$$R_a = C \cdot p^{\beta_1} \cdot d^{\beta_2} \cdot t^{\beta_3} \cdot R_{a \text{ исх}}^{\beta_4}, \text{ мкм}$$
 где  $p$  – рабочее давление на выходе сопла-эжектора, МПа;  $d$  – диаметр дроби, мм;  $t$  – время обработки участка поверхности, с;  $R_{a \text{ исх}}$  – параметр исходной шероховатости, мкм.

После логарифмирования получим линейное уравнение регрессии в виде:

$$Y = \lg R_a = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{14} X_4,$$
 где  $Y$  – истинное значение шероховатости поверхности в логарифмическом масштабе;  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – логарифмы соответственно  $p, d, t, R_{a \text{ исх}}$ ;  $\beta_0 \dots \beta_4$  – искомые коэффициенты, оценка которых должна быть определена.

В результате эксперимента будет получена эмпирическая модель вида:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4,$$

где  $\hat{Y}$  – оценка  $Y = \lg R_a$ ,  $b_0 \dots b_4$  – оценки коэффициентов  $\beta_0 \dots \beta_4$ .

В табл. 1 указаны основные уровни и интервалы варьирования контролируемых факторов режима при обработке дорожек качения колец радиальных роликоподшипников по плану ДФ 2<sup>4-1</sup>.

Используя встроенные статистические функции пакета MS Excel, в табл.2 приведены результаты статистического оценивания линейного уравнения регрессии и его коэффициентов.

Из анализа уравнения следует, что в принятой локальной области определения факторов (см. табл.1) фактор  $X_3$  – время обработки поверхности – оказался статистически незначим, что не получило отражения в ранее выполненной работе [3]; повышение рабочего давления и, следовательно, возрастание кинетической энергии деформирующего тела приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности вследствие увеличения глубины остаточного отпечатка; увеличение диаметра дроби способствует уменьшению

**Таблица 1.** Уровни факторов и интервалы их варьирования

Уровни факторов	Обозначение	p, МПа	d, мм	t, с	R <sub>a</sub> исх
Основной	0	0,28	1,25	37,5	0,29
Интервал варьирования	Δx <sub>i</sub>	0,12	1,15	22,5	0,21
Верхний	1	0,4	2,4	60	0,5
Нижний	-1	0,16	0,1	15	0,085

**Таблица 2.** Оценка параметров уравнения регрессии

№	X0	X1	X2	X3	X4	X1X3=X2X4	X1X4=X2X3	Y <sub>r</sub> эксп	Y <sub>reg</sub>	(Y <sub>r</sub> эксп - Y <sub>reg</sub> ) <sup>2</sup>	(Y <sub>reg</sub> cp - Y <sub>reg</sub> ) <sup>2</sup>
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-0,6198	-0,6033	0,0003	0,0059
2	1	1	-1	1	-1	1	-1	-0,4437	-0,4602	0,0003	0,0044
3	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-0,3187	-0,3022	0,0003	0,0502
4	1	-1	1	-1	1	1	-1	-0,3468	-0,3633	0,0003	0,0266
5	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-0,8239	-0,8074	0,0003	0,0790
6	1	1	-1	-1	1	-1	1	-0,3279	-0,3444	0,0003	0,0331
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-0,9208	-0,9373	0,0003	0,1689
8	1	1	1	1	1	1	1	-0,4089	-0,3924	0,0003	0,0179
<b>Y = -0,5263+0,0252X1-0,0988X2+0,1757X4+0,0715X1X3-0,043X1X4</b>								Y <sub>reg</sub> cp = -0,5263	0,0022	0,3860	
bi	<b>-0,0430</b>	<b>0,0715</b>	<b>0,1757</b>	<b>0,0033</b>	<b>-0,0988</b>	<b>0,0252</b>	<b>-0,5263</b>	S <sup>2</sup> (y) = 0,0467			
σi	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	0,0165	S(bi) = 0,0165	<b>Коэффициенты корреляции</b>		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,9944</b>	0,0467	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д		X1X2	0	
F <sub>расч</sub>	29,4964	1,0000	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д		X1X3	0	
SS	0,3860	0,0022	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д		X1X4	0	
<b>Оценка достоверности коэффициентов уравнения регрессии</b>								X1Y	0,114		
ti = bi/σi	2,61	4,33	10,64	0,20	5,98	1,53	31,87	<b>Оценка R<sup>2</sup></b>		X2Y	-0,448
β	0,2332	0,1445	0,0596	0,8749	0,1054	0,3691	0,0200	α	1-α	X3Y	<b>0,015</b>
1-β	<b>0,7668</b>	<b>0,8555</b>	<b>0,9404</b>	<b>0,1251</b>	<b>0,8946</b>	<b>0,6309</b>	<b>0,9800</b>	0,14	<b>0,86</b>	X4Y	0,798

шероховатости. Наибольшее влияние на формирование шероховатости оказывает исходная шероховатость поверхности качения, что отражает проявление технологической наследственности и накладывает ограничения на область применения дробеструйных способов обработки.

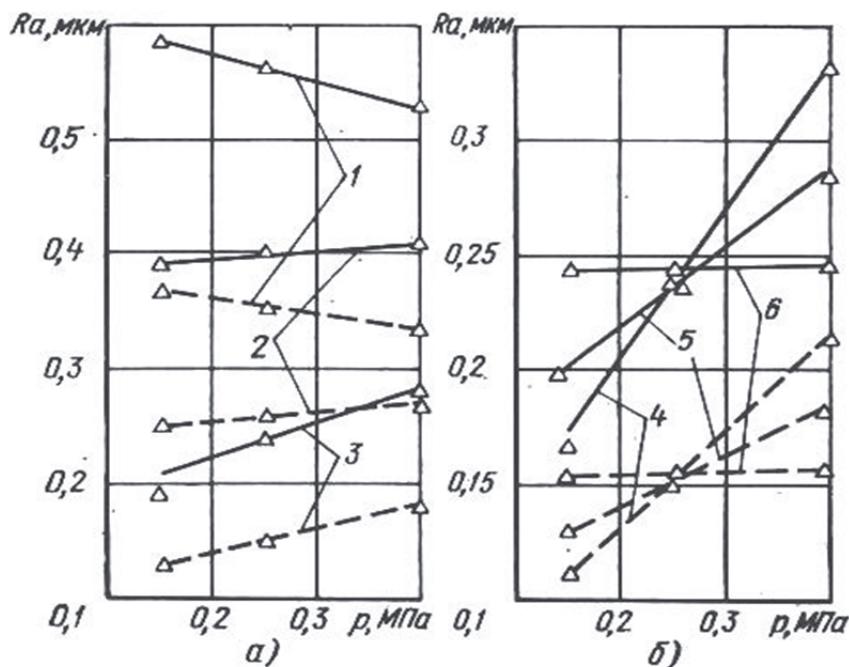
Переходя от уравнения регрессии в кодированном виде к выражению с натуральными значениями переменных и потенцируя, получим искомую зависимость:

$$R_a = \frac{10^{-1,46} \cdot R_{a\text{ исх}}^{(0,13-0,56lgp)} \cdot t^{(0,69+1,16lgp)}}{p^{2,02} \cdot d^{0,143}}, \text{ мкм.}$$

Приведенные на рис. 1 графики изменения параметра шероховатости поверхности дорожки качения колец показывают, что в пределах применяемых режимов упрочняющей обработки достигается уменьшение шероховатости лишь шлифованных поверхностей с  $R_a_{\text{исх}} = 0,32...0,63$  мкм. Минимальные значения параметра Ra составляют 0,17...0,19 мкм после УМШ и 0,11...0,13 мкм после ГДУ.

Результаты измерений (табл.3) высотных и шаговых параметров шероховатости  $R_{\max}$ ,  $R_z$ ,  $R_a$ , волнистости  $H_v$ , огранки  $H_{\text{ог}}$ , отклонений от прямолинейности образующей дорожки качения  $h$ , а также значений параметров начального участка опорной кривой свидетельствуют о том, что чем ниже исходная шероховатость и интенсивнее режимы дробеструйной обработки, тем в большей степени возрастают высотные параметры шероховатости обработанной поверхности и погрешности формы в поперечном и продольном сечениях кольца.

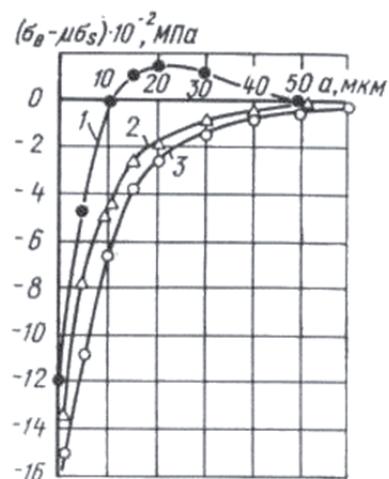
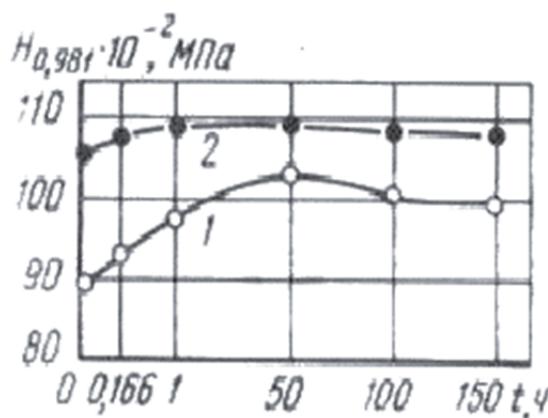
При переходе от шлифования к суперфинишированию наряду с уменьшением высотных параметров шероховатости наблюдается снижение относительной опорной длины профиля поверхности дорожки качения на начальных уровнях сближения, особенно характерное для  $R_a \leq 0,08$  мкм. Известно, что такие поверхности с остроконечными вершинами выступов и низкой опорной способностью слабо сопротивляются контактным нагрузкам,



**Рис. 1.** Зависимости параметра Ra после УМШ (сплошные линии) и ГДУ (штриховые линии) от давления  $p$  на выходе сопла-эжектора:  
а – при  $t = 30$  с и  $Ra_{исх} = 0,5$  мкм (1);  $Ra_{исх} = 0,25$  мкм (2);  $Ra_{исх} = 0,08$  мкм (3);  
б – при  $Ra_{исх} = 0,08$  мкм и  $t = 60$  с (4);  $t=30$  с (5);  $t = 15$  с (6)

плохо удерживают смазку и характеризуются повышенным износом приработки. Применение для этих поверхностей УМШ или ГДУ, несмотря на некоторое увеличение высотных параметров шероховатости, значительно уменьшает следы абразивной обработки, формирует характерный микрорельеф с наличием масляных карманов, удерживающих смазку, повышает опорную способность профиля и контактную жесткость поверхности качения, что способствует увеличению сопротивляемости различным видам износа и сохранению заданных зазоров в подшипнике.

На рис. 2 приведены результаты исследований микротвердости  $H_{0,981} \cdot 10^{-2}$  МПа и остаточных напряжений  $(\sigma_\theta - \mu\sigma_s)$  в поверхностном слое дорожек качения внутренних колец подшипников 6-32205Д1 в зависимости от способов обработки и длительности стендовых испытаний при максимальных контактных напряжениях  $\sigma_{z max} = 2200$  МПа. При исследовании остаточных напряжений использовался метод колец и полосок, а напряжения в кольцах подшипников рассчитывали по формулам, приведенным в работе [4], полученным на основе авторского свидетельства [5]; здесь  $(\sigma_\theta - \mu\sigma_s)$  – компо-



**Рис. 2.** Влияние способов обработки и продолжительности стендовых испытаний подшипника на изменение физико-механических характеристик:  
1 – суперфиниширование; 2 – суперфиниширование + УМШ ( $p=0,2$  МПа;  $t=40$  с);  
3 – суперфиниширование + УМШ + 50 ч стендовых испытаний

Таблица 3. Параметры шероховатости поверхности дорожки качения колец

Способ обработки дорожки качения внутреннего кольца подшипника	Параметры микропрофилля, мкм					Относительная опорная длина профиля $t_p$ при относительном сближении $\varepsilon$			Отклонение от прямолинейности образующей дорожки качения $h$ , мкм
	$R_{\max}$	$R_z$	$R_a$	$H_b$	$H_{\text{ог}}$	0,1	0,2	0,3	
Шлифование УМШ ( $p = 0,4$ МПа; $t = 15$ с)	4,3 3,4	3,4 2,4	0,6 0,47	1,5 2	1,3 1,5	0,18 0,2	0,3 0,3	0,4 0,5	1 3,5
Суперфиниширование УМШ ( $p = 0,4$ МПа; $t = 60$ с)	0,9 3	0,75 2,2	0,1 0,36	0,2 0,6	0,2 0,5	0,16 0,15	0,29 0,2	0,42 0,38	0 4,5
Суперфиниширование УМШ ( $p = 0,18$ МПа; $t = 30$ с)	0,8 2	0,62 1,5	0,08 0,17	0,18 0,3	0,2 0,4	0,15 0,2	0,28 0,36	0,42 0,52	0 2
Шлифование ГДУ ( $p = 0,4$ МПа; $t = 60$ с)	4 3,8	3,2 2,7	0,45 0,39	2 1,4	1,5 1	0,18 0,25	0,32 0,4	0,41 0,58	0,5 4
Суперфиниширование ГДУ ( $p = 0,4$ МПа; $t = 15$ с)	0,78 1,3	0,55 0,8	0,09 0,15	0,2 0,4	0,2 0,3	0,15 0,3	0,3 0,48	0,45 0,69	-2 4
Суперфиниширование ГДУ ( $p = 0,2$ МПа; $t = 60$ с)	0,55 1,2	0,42 0,9	0,07 0,11	0,1 0,4	0,2 0,4	0,17 0,2	0,35 0,45	0,58 0,66	1 2

нента напряжений, снимаемых при электрополировании кольца, где  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_s$  – соответственно окружные и осевые остаточные напряжения;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Из приведенных данных следует, что величина и градиент остаточных напряжений и микротвердости, возникающих при упрочняющей обработке, не претерпевают существенных изменений в процессе многократных циклических нагрузений при качении. Стабилизация напряжений и микротвердости происходит вследствие ограничения дополнительного наклена во время испытаний в связи с интенсив-

ной пластической деформацией при предварительном упрочнении. При этом достигается эффект «тренировки» рабочих поверхностей, приводящий к сокращению продолжительности приработки и уменьшению её негативного влияния на работу опоры.

Критерием эффективности выбранного способа и режима обработки являются результаты стендовых испытаний подшипников. Приведенные в табл.4 результаты сравнительных стендовых испытаний роликоподшипников типа 32118Р2 после суперфиниша и дополнительного упрочнения микрошариками показывают, что

**Таблица 4.** Результаты стендовых испытаний подшипников 32118Р2

Способ обработки дорожки качения колец	Долговечность			Коэффициент рассеяния долговечности	
	Наименьшая, ч	% к расчетной			
		$L_{90}$	$L_{50}$		
Суперфиниш	484	1894	3031	4,58	
Упрочнение микрощариками ( $p = 0,2 \text{ МПа}$ ; $t = 40 \text{ с}$ )	2172	6070	7170	1,79	

долговечность упрочненных подшипников при 10%-ной вероятности повреждения в 3,2 раза, а при 50%-ной вероятности повреждения в 2,53 раза выше соответствующей долговечности подшипников после абразивной обработки. При этом коэффициент рассеяния долговечности в пределах испытуемых партий, определяемый отношением наибольшего времени работы к наименьшему, составил для серийных подшипников 4,58, а для упрочненных подшипников 1,79.

## ВЫВОДЫ

Выбор способа и режимов упрочняющей обработки маложестких кольцевых деталей следует осуществлять с учетом их конструктивных особенностей, технологических требований к параметрам микрогеометрии, точности размеров и формы.

Стабилизация качества поверхности дорожек качения колец, достигаемая дополнительной упрочняющей обработкой, обусловливает повышение и стабилизацию эксплуатационных характеристик опор качения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
2. Петросов В.В. Гидродробоструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
3. Кузнецов Н.Д., Волков В.И., Дмитриев В.А. Влияние дробоструйных способов обработки на качество поверхности и долговечность подшипников // Вестник машиностроения. – 1984. №3. – С. 14-18.
4. Букатый С.А., Дмитриев В.А. Определение остаточных напряжений в кольцах подшипников качения после механической обработки // В кн.: Прогрессивные технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин и инструментов: Межвуз. сб., Куйбышев: КнТИ, 1980. С. 99-103.
5. А. с. 996855 СССР, МКИЗ G 01 В 5/30. Способ определения остаточных напряжений в кольцевых деталях / С.А. Букатый, В.А. Дмитриев, Д.Д. Папшев (СССР). - № 3332266/25-28; заявл. 19.08.81; опубл. 15.02.83, Бюл. № 6. – 4 с.

## SURFACE QUALITY AND DURABILITY OF BEARINGS AFTER SHOT BLASTING

© 2021 V.A. Dmitriev

Samara State Technical University

The results of studies of surface quality parameters and accuracy of bearing rings after finishing abrasive machining of raceways (grinding and superfinishing) and after hydroblasting (HDB) hardening or microbead hardening with the use of cutting fluids are presented and refined.

*Keywords:* quality, durability, bearings, shot blasting.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-24-28

Vladimir Dmitriev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, machine tools and tools.  
E-mail: dmitriev\_v\_a@mail.ru