

оптимальных параметров геометрических погрешностей и, как следствие, улучшения эксплуатационных качеств подшипника рекомендуется применять средства автоматического контроля.

Таблица 1. Результаты проверки гипотезы по критерию Пирсона

Операция	Контролируемый параметр	№ партии	Рассчитанное значение $q = \chi^2$	Степень свободы	Критическое значение $q_{кр}$
Торце-шлифовальная	Непостоянство ширины	первая	13,04	4	9,49
		вторая	12,69	4	9,49
Бесцентрово-шлифовальная	Непостоянство диаметра	первая	13,63	3	7,82
		вторая	14,86	3	7,82
	Средняя конусность	первая	68,41	3	7,82
		вторая	43,05	4	9,49
	Огранка	первая	9,41	3	7,82
		вторая	8,23	3	7,82
Внутри-шлифовальная	Непостоянство диаметра	первая	20,38	4	9,49
		вторая	27,51	4	9,49
	Отклонение диагонали	первая	23,54	3	7,82
		вторая	18,58	2	5,99
	Положение сферы	первая	12,42	3	7,82
		вторая	15,77	3	7,82
	Радиальное биение	первая	53,22	4	9,49
		вторая	44,91	2	5,99

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г.П.Кривко. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. –Мн.: Технопринт, 2001. –219 с. 2. Статистические методы в инженерных исследованиях: Учебн. пособие. Под общ. ред. Г.К. Круга. –М.: Высшая школа, 1983. –216 с. 3. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Контроль качества. –М.: Мир, 1970. –261 с. 4. Ящерицын П.И., Рыжков Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. –Мн.: Наука и техника, 1977. –256 с. 5. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных поверхностей. –Мн.: Наука и техника, 1971. –233 с.

УДК 621.923

Кривко Г.П., Черей Д.А.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ БОЧКООБРАЗНЫХ РОЛИКОВ ДВУХРЯДНЫХ РОЛИКОВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Общая долговечность подшипников качения в значительной степени зависит от шероховатости рабочих поверхностей его деталей. По данным ВНИПП снижение шероховатости рабочих поверхностей шариковых п/ш с 0,32 до 0,08 повышает его долговечность в 2,4 раза. В результате совместных работ, проведенных ЕкатеринбургНИПТИМАШем и «Уральским подшипниковым заводом» по усовершенствованию технологии обработки роликов и колец сферических двухрядных подшипников за счет снижения шероховатости рабочих поверхностей с  $R_a 0,63$  до  $Ra 0,04$ , получено повышение долговечности подшипников типа 3614 при стендовых испытаниях в 3,5 раза (771 час вместо 216-230 часов).

В настоящее время всеобщее признание получила идея о существовании оптимальной шероховатости, определяемой конструктивно-эксплуатационными показателями работы пары трущихся поверхностей. Для подшипников качения оптимальным является  $R_a 0,16...0,02$ . Как правило, в массовом производстве шлифование устойчиво обеспечивает  $R_a 0,63...0,32$ , поэтому изыскание методов финишной обработки для последующего снижения шероховатости имеет в подшипниковой промышленности очень важное значение. В этом плане наибольший интерес представляет суперфиниширование.

При суперфинишировании значительно уменьшаются шероховатость (до  $R_a 0,16...0,02$ ), волнистость (менее 0,1 мкм) и огранка (менее 1 мкм) обрабатываемой поверхности. При суперфинишировании также могут быть несколько уменьшены отклонения от правильной геометрической формы детали: овальность, конусность, бочкообразность, седлообразность. Существенное исправление этих погрешностей при суперфинишировании затруднено вследствие упругого характера прижима бруска к обрабатываемой детали. После суперфиниширования в поверхностном слое металла образуются остаточные напряжения сжатия, что способствует повышению износостойкости деталей.

Исследуем кривизну бочкообразной поверхности ролика двухрядного сферического подшипника (рис. 1).

В любом поперечном сечении ролика, удаленном от плоскости наибольшего диаметра на расстояние  $x_i$  (рис. 2) уменьшение его радиуса составляет величину:

$$\Delta y_{обр} = R_{обр}(1 - \cos \alpha_i), \quad (1)$$

где  $R_{обр}$  – радиус образующей.

$$\alpha_i = \arcsin \frac{x_i}{R_0}.$$

Радиус сечения соответственно составит:

$$R_i = \frac{D_0}{2} - \Delta y_{обр}. \quad (2)$$

В результате расчета по (1) и (2) при  $x_i = 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18$  мм получаем следующие величины  $R_i$  (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета радиуса ролика и его уменьшение в зависимости от расстояния до диаметральной плоскости

	Номера поперечных сечений						
	0	1	2	3	4	5	6
$x_i$ , мм	0	3	6	9	12	15	18
$\Delta y_{обр}$ , мм	0	0,038	0,150	0,337	0,600	0,939	1,354
$R_i$ , мм	17,5	17,462	17,350	17,163	16,900	16,561	16,146

Приращение координат  $\Delta y_{сеч}$ . Точек в продольных сечениях I, II, ...V относительно сечения 0-0 составит:

$$\Delta y_{сеч.} = R_i(1 - \cos \beta_i), \quad (3)$$

где  $\beta_i = \arcsin \frac{z_k}{R_i}$ ,

$z_k$  – расстояние до диаметральной плоскости.

Координата  $y_i$  в принятой системе координат для любой точки составит:

$$y_i = \Delta y_{обр} + \Delta y_{сеч.} \quad (4)$$

Результаты расчета координат по (1, 3, 4) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значение координаты  $y_i$  в соответствующих сечениях

	Номера поперечных сечений							
	0	1	2	3	4	5	6	
Номера продольных сечений	0	0	0,0375	0,150	0,337	0,6	0,939	1,3540
	I	0,1146	0,1524	0,2656	0,4540	0,7187	1,0602	1,4783
	II	0,4632	0,5018	0,6158	0,8095	1,0802	1,4293	1,8573
	III	1,0607	1,1006	1,2205	1,4099	1,7010	2,0641	2,5102
	IV	1,9356	1,9778	2,1045	2,3155	2,6134	2,9994	3,4752
	V	3,1386	3,1836	3,3217	3,5512	3,8761	4,2990	4,8235

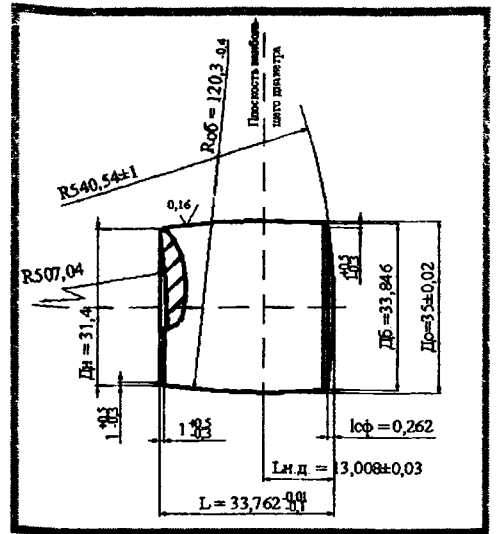


Рисунок 1. Ролик 73727

В продольном сечении 0–0 радиус образующей равен (согласно чертежа)  $R_{обр} = 120,3$  мм. Радиусы кривизны поверхности в продольных сечениях I, II ... V определяются из уравнений аналитической геометрии по известным координатам точек (табл. 2) или по приближенной формуле, дающей погрешность менее 1%:

$$R_n = \frac{x_i^2 + \Delta y^2}{\Delta y}, \quad (5)$$

где  $\Delta y$  – стрелка хорды рассматриваемой точки в соответствующем сечении 0–V.

Результаты расчета усредненных радиусов кривизны поверхности в различных продольных сечениях представлены на рис. 2, откуда следует, что по мере удаления от диаметральной плоскости радиус кривизны значительно уменьшается. Кроме этого, его величина не является постоянной по профилю (к концам ролика кривизна увеличивается). Из этого следует, что теоретически невозможно обеспечить кинематически правильное формообразование бочкообразной поверхности суперфинишированием, т.к. каждое продольное и поперечное сечение имеет свою кривизну. Это приводит к тому, что резание протекает по контактными линиям, изменяющим свое место на поверхности резания за каждый двойной ход бруска.

Положительное свойство контактных площадок в том, что осуществляется прерывистое резание, а это явление приводит к уменьшению температуры в зоне обработки.

Вследствие переменной кривизны бочкообразного ролика вдоль его оси, он подвергается абразивному воздействию сечениями бруска, кривизна которых не соответствует кривизне ролика. Для описания этих явлений примем ширину бруска  $h_6 = 16$  мм, а величину амплитуды колебания  $2A = 3$  мм.

Предположим, что при крайнем правом положении бруска, он приработался полностью по всей поверхности ролика. После перемещения бруска влево на величину амплитуды  $2A = 3$  мм (при неизнашиваемом бруске) произойдет контактирование следующих сечений ролика и бруска (рис. 3).

Данные о характере контакта сечений ролика и бруска сведем в табл. 3.

Таблица 3. Величина зазора в различных сечениях контакта ролика и бруска

Положение сечения $x$ , мм	-12	0	15
Радиус ролика, мм	16,900	17,500	16,561
Радиус кривизны сечения бруска, мм	17,163	17,462	16,146
Зазор $\Delta$ , мм	0,036	0,005	0,056

При принятых выше условиях величина зазора составляет:

$$\Delta_1 = 0,036 \text{ мм}, \Delta_2 = 0,005 \text{ мм}, \Delta_3 = 0,056 \text{ мм}.$$

С учетом упругих деформаций и износа бруска в действительности контактирование происходит не в точках, а по линиям.

Величина контактных деформаций бруска может быть ориентировочно оценена по величине давления на брусок и его упругим свойствам – модулю упругости. Замер модуля упругости, произведенный по известным формулам сопротивления материалов по величине деформации бруска длиной 150 мм, сечением 13x13 мм, характеристик К36М10СМ1К при изгибе и сжатии дали его значение  $(3,0 - 3,5) \times 10^4$  кг/см<sup>2</sup>.

При сжатии модуль упругости определяется по формуле:

$$E = \frac{Pl}{F \cdot \Delta l},$$

а при изгибе бруска по схеме двухопорной балки:

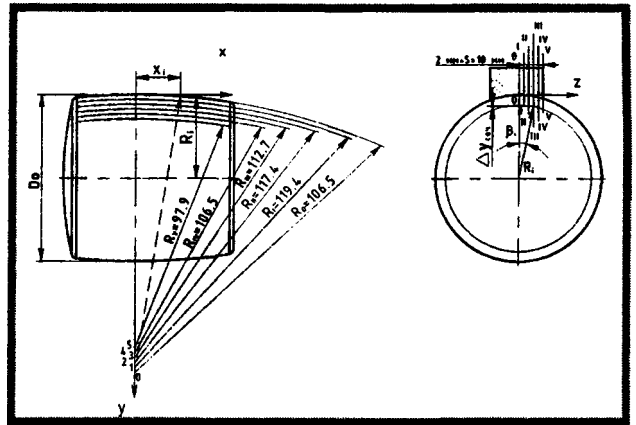


Рисунок 2. Кривизна поверхности бочкообразного ролика в различных продольных сечениях бруска

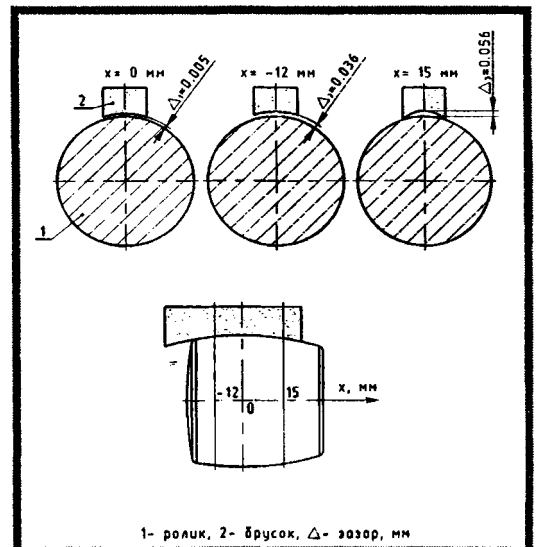


Рисунок 3. Теоретическая форма зоны контакта бруска с роликом в различных сечениях при его крайнем левом положении

$$E = \frac{Pl \cdot \rho}{4I},$$

где  $P$  – приложенная нагрузка, кг;  
 $l$  – длина деформируемого участка бруска, см;  
 $F$  – площадь сечения бруска, см<sup>2</sup>;  
 $\Delta l$  – удлинение (при сжатии) или прогиб (при изгибе) бруска;  
 $I$  – Осевой момент инерции сечения бруска, см<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – радиус кривизны изогнутой балки (бруска), см.

$$\rho \approx \frac{(\Delta l)^2 + \frac{l^2}{4}}{2\Delta l}.$$

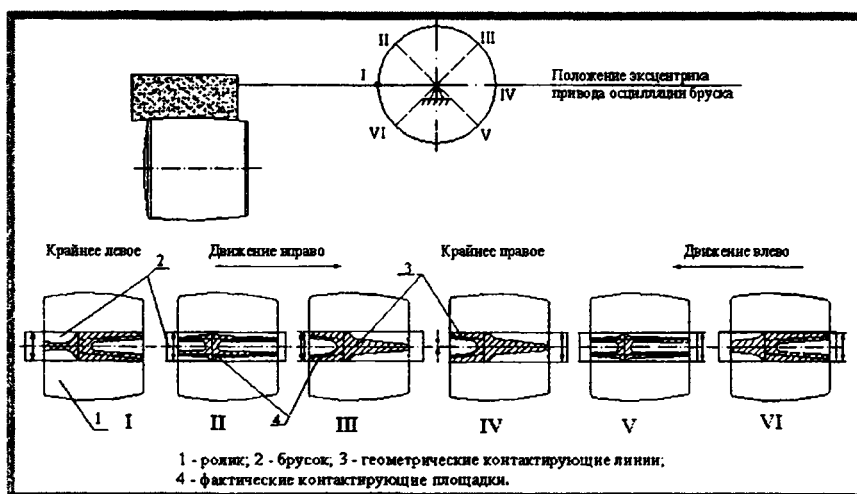
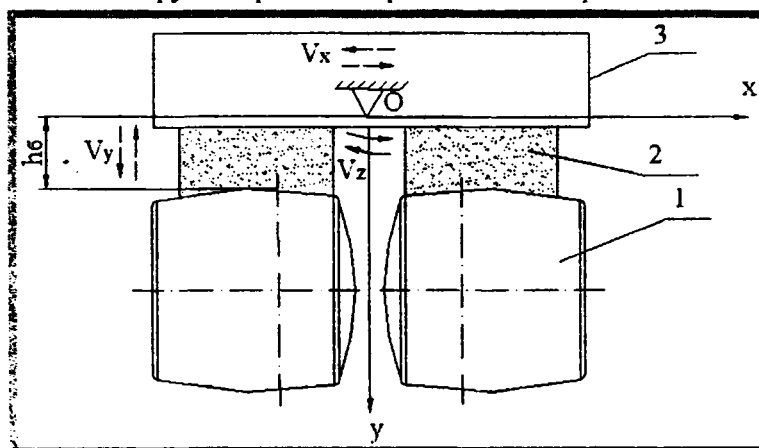


Рисунок 4. Форма линий (площадок) контакта бруска с бочкообразным роликом

Среднее давление бруска на обрабатываемую поверхность составляет 3-7 кг/см<sup>2</sup>. В условиях обработки бочкообразной поверхности мгновенные ее значения по площадкам контакта в несколько раз превышают среднюю величину, поэтому величина упругих деформаций бруска на контактной поверхности может быть оценена величиной 0,002-0,010 мм.

Величина износа за один двойной ход бруска составляет менее 0,001 мм.

С учетом упругих деформаций и износа бруска мгновенное его контактирование с роликом происходит не по контактными линиями, а по площадкам. Причем, непрерывное контактирование происходит только в зоне плоскости наибольшего диаметра, здесь наиболее стабильные условия резания и следует ожидать наибольшего съема припуска. Качественная картина изменения мгновенных контактных площадок бруска с роликом представлена на рис. 4.



1 – ролик; 2 – брусок; 3 – державка.

Рисунок 5. Схема движения шарнирно закрепленного бруска при обработке бочкообразного ролика.

При этом геометрические контактные линии, полученные без учета упругих деформаций и износа бруска, представляют собой зоны расположения максимальных удельных давлений.

При движении осцилляции брусок совершает качательное движение относительно оси, совпадающей с центром кривизны образующей. Для схемы суперфиниширования с шарнирно закрепленным бруском это движение получается как сумма трех движений (рис. 5):

1. Прямолинейное принудительное перемещение шарнира в пределах  $2A=3$  мм по оси  $x$  от механизма осцилляции со скоростью:

$$V_x \approx A\omega_\varphi \cos\varphi.$$

2. Прямолинейное движение шарнира по оси  $y$  вследствие криволинейной образующей, обеспечиваемое упругим поджимом бруска к ролику (гидравликой или пружиной). Однако для ролика с образующей радиуса 120,3 мм при амплитуде 3 мм величина перемещения по оси  $y$  при горизонтальном расположении хорды АВ составляет порядка 0,01 мм. Поэтому перемещение шарнира по оси  $y$  для этих условий можно опустить.

3. Вращательное (качательное) движение бруска относительно оси шарнира с угловой скоростью  $\omega_z$ . Из теоретической механики известно, что угловая скорость вращательного движения твердого тела в плоско-параллельном движении не зависит от выбранного полюса приведения (оси вращения). Поэтому угловая скорость бруска при движении вокруг оси  $O$  равна той скорости, которую он совершает относительно центра кривизны образующей ролика  $O_p$ , которая определяется зависимостью:

$$\omega_{o_p} = \omega_o = \frac{V_x}{R_0 + h_a} = \frac{A\omega_\varphi \cos\varphi}{R_0 + h_a},$$

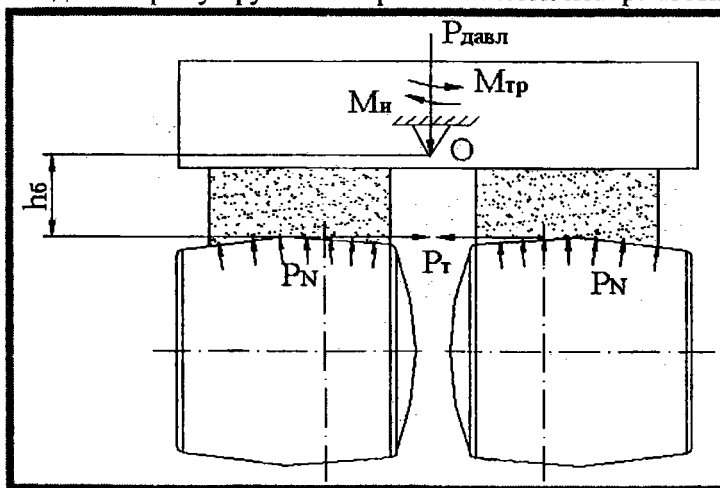
где  $h_6$  – расстояние от образующей ролика до оси качания бруска, приблизительно равное высоте бруска  $h_6 = 10-40$  мм;

$\omega_\varphi$  – угловая скорость вала привода механизма осцилляции.

Приняв  $h_6 = 40$  мм,  $R_0 = 120,3$  мм,  $A = 1,5$  мм, получим:

$$\omega_{o_p} = \omega_o = \frac{0,0015 \cdot \omega_\varphi \cos\varphi}{0,1203} = 0,0125\omega_\varphi \cdot \cos\varphi.$$

Вращательное движение бруска относительно оси  $O$  приводит к неравномерному его давлению на обрабатываемую поверхность и может служить причиной неравномерного съема припуска по образующей или даже отрыву бруска от обрабатываемой поверхности.



$P_{\text{давл}}$  – усилие прижима бруска;

$M_{\text{тр}}$  – момент трения в цапфе;

$M_{\text{и}}$  – момент сил инерции;

$P_N$  – рассредоточенная реакция ролика;

$P_T$  – суммарная осевая сила резания.

Рисунок 6. Схема действия сил на шарнирно закрепленный брусок.

Уравнение движения бруска относительно оси  $O$  (рис. 6) запишется:

$$(I_{\text{бр}} + I_{\text{д}})\varepsilon + M_{\text{тр}} + M_N + M_T = 0, \quad (6)$$

где  $I_{бр} + I_{д}$  – момент инерции бруска и державки относительно оси качания;  
 $\varepsilon$  – угловое ускорение бруска с державкой;  
 $M_{тр}$  – момент трения в цапфе (шарнире);  
 $M_N$  – момент от действия реакций (распределенного давления) ролика на брусок;  
 $M_T$  – момент от действия осевой силы трения.  
 При массе державки  $m_d = 0,2$  кг, массе бруска  $m_{бр} = 0,05$  кг по конструктивному исполнению момент инерции составит:

$$I = I_{ax} + I_{\delta} \approx 0,54 \cdot 10^{-4} + 0,31 \cdot 10^{-4} \approx 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2.$$

Угловое ускорение бруска с державкой определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{d\omega_0}{dt} = -0,0125\omega_0^2 \cdot \text{Sin}\varphi.$$

Приняв угловую скорость вала механизма осцилляции  $n = 1000$  об/мин получим:

$$\omega_{\varphi} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{6,28 \cdot 1000}{60} = 104,6 \text{ рад/с},$$

$$\varepsilon_{max} = -0,0125 \cdot 104,6^2 = 136 \text{ рад/с}^2.$$

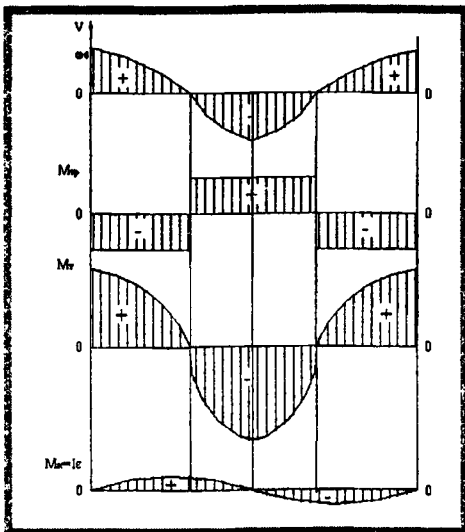


Рисунок 7.

Уравнение 6 позволяет решить задачу о характере распределения давления вдоль образующей ролика (при некотором допущении о ее характере).

На рис. 7 представлены графики изменения крутящих моментов, действующих на шарнирно закрепленный брусок за двойной его ход.

Момент трения в шаровой цапфе принят 0,5-1,0 Н·м (исходя из конструкции державки).

Момент от осевой силы резания:

$$M_T = P_T \cdot h_6.$$

Так как максимальная скорость осцилляции одного порядка со скоростью вращения детали, то можно допустить, что  $P_T = 0,5 \cdot P_N$ , где 0,5 – коэффициент трения (резания) при суперфинишировании.

Для ролика 73727 площадь бруска  $F = 6 \text{ см}^2$ , тогда при давлении  $P = 20-40 \text{ Н/см}^2$ , получим:

$$P_{T \max} = 0,5 \cdot 6 \cdot 30 = 90 \text{ Н},$$

а характер изменения  $P_T$  соответствует скорости колеба-

тельного движения.

Принимая высоту бруска  $h_6 = 1-4$  см, получаем:

$$M_T = 0,9-3,6 \text{ Н·м}.$$

Максимальный момент инерции:

$$M_{и \max} = I \cdot \varepsilon_{\max} = 0,85 \cdot 10^{-4} \cdot 136 = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ Н·м}.$$

В любой момент времени реакция ролика должна создавать относительно оси качания бруска крутящий момент:

$$M_N = M_{тр} - M_T - M_{и}.$$

Это может быть обеспечено только различной реакцией ролика (а значит и давлением бруска) на обоих концах ролика. Теоретический характер распределения давления на поверхность ролика при суперфинишировании шарнирно закрепленным бруском в различные периоды представлен на рис. 8.

**Выводы:**

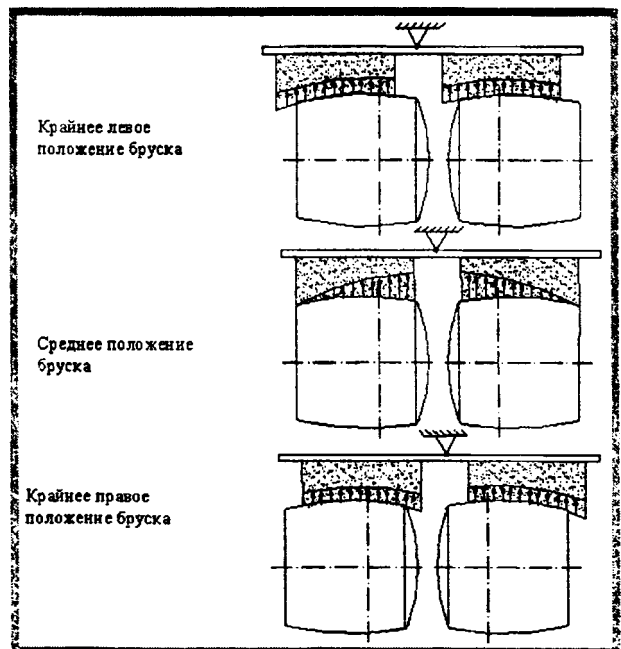


Рисунок 8.

Процесс суперфиниширования поверхностей деталей с переменным поперечным сечением носит неустойчивый характер по равномерному съему припуска. Теоретически невозможно обеспечить кинематически правильное формообразование бочкообразной поверхности ролика при суперфинишировании.

Процесс резания протекает по контактными площадкам. Положительное свойство контактных площадок, изменяющихся за каждый двойной ход бруска, в том, что осуществляется прерывистое резание, приводящее к уменьшению температуры резания в зоне обработки

При суперфинишировании шарнирно-закрепленным бруском дополнительное влияние на неравномерность давления вдоль образующей оказывает момент трения  $M_{тр}$  в цапфе поворота и момент  $M_T$  от действия осевой силы резания. Момент сил инерции на порядок – два меньше этих величин и не может оказать заметного влияния на характер давления.  $M_{тр}$  и  $M_T$  действуют в противоположных направлениях, поэтому регулируя  $M_{тр}$  и подбирая высоту бруска, можно частично обеспечить их взаимную компенсацию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Билик Ш.М., Ройтерштейн Э.Х., Голев А.А. «Микродоводка внутренних и наружных поверхностей сложного профиля», «Вестник машиностроения», №4, 1970. 2. Зыков Е.И., Китаев В.И., Кулин Л.Г. Студенский Е.И. «Повышение надежности и долговечности роликоподшипников», «Машиностроение», 1969. 3. Кривко Г.П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. - Мн.: УП «Технопринт», 2001.-220с. 4. Патент 5473 ВУ. МПК: В 24В 5/37, 35/00. Способ финишной групповой обработки рабочих поверхностей бочкообразных несимметрических роликов и устройство для его осуществления/ Кривко Г.П., Филонов И.П., Пенза В.Н. и др.– №19981151; Заявлено 22.12.1998; Опубликовано /Афіцыйны бюлетэнь. Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь – 2003. – №3. – 4с.

УДК 621.833.1

*Благодарный В.М., Джачовский Ф.*

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Барановичский государственный университет, Барановичи, Белоруссия  
Фирма «Регада», Прешов, Словакия*

Volts articles representation productive technology mode of production toothed wheel little modulus, rest myself in cooling sheeting semi-product and consecutive magneto-abrasive machined for cancel beard.

### **Введение**

Мелкомодульные зубчатые передачи широко применяются в различных механизмах: сумматорах, счетчиках, измерителях скоростей, давления, сил, в приводах вентилях и других механизмах [1]. Поэтому изготавливается их большое множество, причем различных типоразмеров и конструкций. Для нарезания зубчатых колес применяются известные методы: зубофрезерование, зубодолбление, зубострогание, и в качестве отделочных: зубошлефование, зубошлифование. Эти методы требуют специального оборудования, высококвалифицированных специалистов, много труда и времени. Поэтому проблема повышения производительности изготовления мелкомодульных зубчатых колес является важной и актуальной.

### **1. Технология изготовления мелкомодульных зубчатых колес**

Для мелкомодульных зубчатых колес применяются различные стали (Ст.45, 35, 20Х, 40Х, 20Х13, 38Х2МЮА и др.), бронзы (Бр КМц3-1Т, БрАЖМц10-3, БрАЖ9-4, БрОФ6,5-0,15 и др.), латуни (ЛА67-2,5, ЛАЖМц66-6-3-2 и др.), сплавы (В95, МЛ6 пластмассы. Процесс изготовления зубчатых колес содержит следующие операции: Заготовительная (штамповка или разрезка прутка), сверление и растачивание внутреннего отверстия, токарная наружных поверхностей (черновая), токарная или фрезерная (подрезка торцев), токарная наружных поверхностей (чистовая), зубофрезерование, термообработка (поверхностная), зубошлифование, плоскошлифовальная (торцев), сверление отверстия и нарезание резьбы в ступице колеса, сверление и растачивание отверстия под штифт в ступице колеса.