Технология и технологические машины

УДК 621.92-5

Сравнительные экспериментальные исследования волнистости поверхности, шлифованной стандартным и разнозернистым шлифовальными кругами

БАГИРОВ
Сахиб Абас оглы
доцент кафедры «Технологические комплексы и специальная техника»
(Азербайджанский технический университет)

С.А. Багиров

Проведены экспериментальные исследования по ортогональному плану второго порядка для установления зависимости между геометрическими параметрами поверхности, шлифованной стандартным и разнозернистым кругами, и элементами режима шлифования: поперечной подачей, скоростью перемещения детали и подачей на глубину. Анализ коэффициентов регрессии полученной модели показал, что сосредоточение на рабочей поверхности разнозернистого шлифовального круга зерен различных номеров, начиная от грубого и кончая тонким, позволяет в одном технологическом переходе совмещать черновое, получистовое, чистовое и тонкое шлифование, что способствует улучшению геометрических параметров, в частности волнистости шлифованной поверхности.

Ключевые слова: шлифование, ортогональный план второго порядка, шлифовальный круг разной зернистости, плоское шлифование, зернистость, волнистость.

Experimental researches under the orthogonal plan of the second order for a dependence establishment between geometrical parameters of the surface processed with разнозернистым around and an element of a mode of processing are spent: cross-section giving, in the speed of moving of a detail and giving on depth. The analysis of factors of regress of the received model has shown that a concentration on a working surface of a differently-granular grinding circle of 5 numbers of granularity, beginning from rough and finishing thin, allows to combine in one technological transition: draught, semifair, fair and thin grinding that certainly leads to improvement of geometrical parameters of the processed surface.

Keywords: the orthogonal plan of the second order, grinding circle of different granularity, flat grinding, granularity, sinuosity.

Выравнивание режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга обеспечивается уменьшением зернистости каждой условной полосы в зависимости от числа их повторных контактов с уже срезанной поверхностью. В соответствии с предложенной методикой [1] для режущей фронтальной полосы разнозернистого шлифовального круга выбирают высокозернистые абразивы, а по мере удаления от нее зернистость убывает при соответствующем увеличении числа фактически работающих зерен для каждой условной полосы. При этом обеспечивается равномерное абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность, а следовательно, высокая эффективность шлифования, путем уменьшения работы внешнего трения зерен и связки о поверхность металла.

Цель проведенных сравнительных экспериментальных исследований сосостояла в определении эмпирической зависимости волнистости от элементов режима резания при шлифовании стандартным и разнозернистым шлифовальными кругами.

Для проведения исследований был выбран ортогональный план второго порядка, что позволяет построить квадратичные модели. Отсеивающие исследования проведены на основе результатов теоретических исследований автора [1]. Решалась задача установления зависимости между геометрическими параметрами шлифованной поверхности и тремя элементами режима шлифования: поперечной подачей S_p (на двойной ход стола), скоростью перемещения детали V_d и подачей на глубину шлифования t.

На основе априорных данных о характере зависимости геометрических параметров шлифованной поверхности от параметров режима резания были определены основные уровни и интервалы варьирования факторов, комбинации которых дают наилучший результат (табл. 1).

Таблица 1

Интервал варьирования и уровни факторов

Уровни факторов		Обозначение уровней	Факторы		
			S_p, мм/ход,	V_d, м/мин,	t, мм/ход,
			X_1	X_2	X_3
Основной		0	8	6	0,04
Интервал варьирования		Δ	4	3	0,02
Верхний		+1	12	9	0,06
Нижний		–1	4	3	0,02
Звездные	Верхний	+1,215	12,86	9,645	0,0643
	Нижний	–1,215	3,14	2,355	0,0157

В качестве абразивного инструмента были выбраны обычный (по ГОСТ 2424—75) и разнозернистый шлифовальные круги прямого профиля типа ПП 300×40×76 с характеристикой 14А50СМ2К. Рабочая поверхность разнозернистого шлифовального круга состоит из пяти полос шириной по 8 мм. Зернистость фронтальной полосы соответствует номеру 50, а последующих — соответственно номерам 40, 32, 25, 16. Номера зернистости отдельных полос разнозернистого шлифовального круга были определены по методике, описанной в работе [1]. Для выправления геометрической формы и восстановления разнозернистости рабочей поверхности шлифовального круга использовалась правка методом врезания с применением специально изготовленного ролика на специальном правящем приспособлении. В качестве материала обрабатываемой детали была применена сталь 40Х с HRC 35. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 3%-й раствор соды в воде. Эксперименты проводились на продольном плоскошлифовальном станке модели 3Б722 (табл. 2).

Таблица 2

Ортогональный план второго порядка k = 3 с результатами исследований

v	X_1	X_2	X_3	X_1	X_1	X_3	W_o	W_y
1	—	—	—	4	3	0,02	1,14	0,68
2	+	—	—	12	9	0,02	2,07	1,18
3	—	+	—	4	9	0,02	1,99	1,38
4	+	+	—	12	9	0,02	3,42	2,18
5	—	—	+	4	3	0,06	2,44	1,58
6	+	—	+	12	3	0,06	3,97	2,43
7	—	+	+	4	9	0,06	3,89	2,68
8	+	+	+	12	9	0,06	5,42	3,48
9	–1,215	0	0	3,14	6	0,04	3,35	1,77
10	+1,215	0	0	12,86	6	0,04	3,91	2,38
11	0	–1,215	0	8	2,355	0,04	3,5	1,65
12	0	+1,215	0	8	9,645	0,04	4,87	2,5
13	0	0	–1,215	8	6	0,0157	2,81	1,53
14	0	0	+1,215	8	6	0,0643	4,65	2,63
15	0	0	0	8	6	0,04	3,17	2,08

Произведен расчет коэффициентов регрессии зависимости волнистости от элементов режима шлифования для поверхностей, шлифованных:

— стандартным кругом:

$$b_0' = 3{,}373;\ b_1 = 0{,}55678;\ b_2 = 0{,}799;$$
$$b_3 = 0{,}852;\ b_{12} = 0{,}0625;\ b_{13} = 0{,}0875;$$
$$b_{23} = 0{,}0875;\ b_1'^2 = 0{,}5135;\ b_2^2 = 0{,}546;$$
$$b_3^2 = 0{,}75257;$$

— разнозернистим кругом:

$$b_0' = 2{,}0086;\ b_1 = 0{,}33686;\ b_2 = 0{,}4457;$$
$$b_3 = 0{,}5556;\ b_{12} = 0{,}031;\ b_{13} = 0{,}04375;$$
$$b_{23} = 0{,}05625;\ b_1'^2 = 0{,}2948;\ b_2^2 = 0{,}39136;$$
$$b_3^2 = 0{,}48866.$$

Оценку коэффициента b_0, входящего в исходную модель, находили по формуле

$$b_0 = b_0' - 0{,}7303(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2).$$

При шлифовании разнозернистым кругом b_0 = 1,15, стандартным кругом — b_0 = 2,0496.

Математическая модель зависимости волнистости шлифованной поверхности от параметров режима шлифования в преобразованных переменных X_i будет:

— для стандартного круга:

$$Y = 2{,}0496 + 0{,}55687X_1 + 0{,}799X_2 + \\ + 0{,}852X_3 + 0{,}0625X_1X_2 + 0{,}0875X_1X_3 + \\ + 0{,}0875X_2X_3 + 0{,}5135X_1^2 + 0{,}546X_2^2 + \\ + 0{,}75257X_3^2; \quad (1)$$

— для разнозернистого круга:

$$Y = 1{,}15 + 0{,}33686X_1 + 0{,}4457X_2 + \\ + 0{,}5556X_3 + 0{,}031X_1X_2 + 0{,}04375X_1X_3 + \\ + 0{,}05625X_2X_3 + 0{,}2949X_1^2 + 0{,}39136X_2^2 + \\ + 0{,}48866X_3^2. \quad (2)$$

Для проверки достоверности полученных моделей проведено исследование ряда гипотез:

об однородности дисперсий, значимости коэффициентов регрессии и об адекватности модели.

Контроль правильности вычислений выполнен по формуле (203) в работе [2].

Для стандартного круга:

$$\sum_{v=1}^{15}\overline{Y}_v = 50{,}6; \quad \sum_{v=1}^{15}\overline{Y}_v = 50{,}76.$$

Для разнозернистого круга:

$$\sum_{v=1}^{15}\overline{Y}_v = 30{,}15; \quad \sum_{v=1}^{15}\overline{Y}_v = 29.$$

Таблица 3

Статистические данные результатов опытов при шлифовании стандартным кругом

Точки плана, v	Y_1	Y_2	Y_3	$\overline{Y}$	S_v^2	$\hat{Y}$	$(\overline{Y}-\hat{Y})^2$
1	0,76	2,04	0,62	1,14	0,6124	1,6	0,25
2	3,97	1,07	1,17	2,07	2,71	2,7	0,39
3	1,17	3,39	1,41	1,99	1,4844	2,27	0,078
4	2,3	5,04	2,92	3,42	2,0644	4,37	0,9
5	2,13	1,93	3,26	2,44	0,5143	2,65	0,04
6	6,09	2,85	2,97	3,97	3,3744	4,46	0,24
7	3,17	3,11	5,39	3,89	1,6924	3,66	0,053
8	7,12	4,32	4,82	5,42	2,23	6,08	0,4
9	2,73	2,57	4,75	3,35	1,4764	2,14	1,46
10	2,92	5,31	3,5	3,91	1,55	3,5	0,17
11	4,8	2,8	2,9	3,5	1,27	2,879	0,38
12	4,18	3,86	6,57	4,87	1,788	3,85	1,04
13	2,3	1,82	4,31	2,81	1,74	2,13	0,46
14	6,15	4,15	3,65	4,65	1,75	4,2	0,2
15	2,84	2,17	4,50	3,17	1,4389	2,23	0,88
				50,6	25,6956	50,76	6,888

Однородность дисперсий, характеризующих ошибку эксперимента по отдельным точкам, проверялась с помощью критерия Кохрена:

— для стандартного круга:

$$S^2Y = 1{,}713;$$

— для разнозернистого круга:

$$S^2Y = 0{,}8477.$$

Критерий Кохрена определяется отношением максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

— для стандартного круга (табл. 3):

$$G = \frac{S^2_{v_{\max}}}{\sum S_v^2} = \frac{0{,}9164}{8{,}3638} = 0{,}109;$$

— для разнозернистого круга (табл. 4):

$$G = \frac{1{,}8475}{12{,}7162} = 0{,}145.$$

По таблице [3] находим $f_{v_{\max}} = 2; f_{z_{nat}} = 15$ для степеней свободы и уровня значимости 5%-е критическое значение $G_{kv} = 0{,}61$; $G < G_{kr}$; $0{,}109 < 0{,}61$; $0{,}145 < 0{,}61$.

Таблица 4

Статистические данные результатов опытов при шлифовании разнозернистым кругом

Точки плана, v	Y_1	Y_2	Y_3	Y_v	S_v^2	Y_v	$(Y_v - Y_v)^2$
1	0,36	1,2	0,48	0,68	0,2064	1,1	0,1764
2	2	0,76	0,78	1,18	0,5042	1,6	0,1764
3	2,3	1	0,9	1,4	0,61	1,8	0,16
4	1,18	1,66	3,7	2,18	1,7902	1,93	0,0625
5	1,18	2,78	0,78	1,58	1,12	2	0,1764
6	3,63	1,63	2,03	2,43	1,12	2,7	0,0729
7	2,18	2,08	3,78	2,68	0,91	2,97	0,084
8	4,68	2,68	3,08	3,48	1,12	3,3	0,0324
9	1,5	1,54	2,27	1,77	0,1879	1,176	0,353
10	1,78	3,38	1,98	2,38	0,76	1,986	0,155
11	1,25	0,85	2,85	1,65	1,12	1,18	0,22
12	2,3	2	3,2	2,5	0,39	2,2667	0,0529
13	1,33	2,13	1,13	1,53	0,28	1,1911	0,1148
14	4,13	1,48	2,28	2,63	1,8475	2,5411	0,0079
15	1,58	3,08	1,58	2,08	0,75	1,1446	0,3136
				30,15	12,7162	28,8855	2,1582

Проверку значимости каждого коэффициента проводили по t-критерию Стьюдента:

— для стандартного круга:

$$S^2 b_i = \frac{1{,}713}{n \cdot r} = \frac{1{,}713}{45} = 0{,}038,\ Sb_i = 0{,}195;$$

— для разнозернистого круга:

$$S^2 b_i = \frac{0{,}846}{45} = 0{,}0188,\ Sb_i = 0{,}137.$$

Коэффициенты регрессии проверены на значимость:

— для стандартного круга:

$t_0 = 2{,}0496 / 0{,}195 = 10{,}5$; $t_1 = 0{,}55687 / 0{,}195 = 2{,}8$;
$t_2 = 0{,}799 / 0{,}195 = 4{,}09$; $t_3 = 0{,}852 / 0{,}195 = 4{,}36$;
$t_{12} = 0{,}0625 / 0{,}195 = 0{,}32$; $t_{13} = 0{,}0875 / 0{,}195 = 0{,}45$;
$t_{23} = 0{,}0875 / 0{,}195 = 0{,}45$; $t_1^2 = 0{,}5135 / 0{,}195 = 2{,}6$;
$t_2^2 = 0{,}546 / 0{,}195 = 2{,}8$; $t_3^2 = 0{,}75257 / 0{,}195 = 3{,}8$;

— для разнозернистого круга:

$t_0 = 1{,}15 / 0{,}137 = 13{,}9$; $t_1 = 0{,}33686 / 0{,}137 = 2{,}45$;
$t_2 = 0{,}4457 / 0{,}137 = 3{,}25$; $t_3 = 0{,}5556 / 0{,}137 = 4{,}055$;
$t_{12} = 0{,}031 / 0{,}137 = 0{,}22$; $t_{13} = 0{,}0433 / 0{,}137 = 0{,}31$;
$t_{23} = 0{,}05625 / 0{,}137 = 0{,}41$; $t_1^2 = 0{,}2949 / 0{,}137 = 2{,}15$;
$t_2^2 = 0{,}39136 / 0{,}137 = 2{,}86$; $t_3^2 = 0{,}48866 / 0{,}137 = 3{,}57$.

Критические значения t_{kr} находили по таблице работы [3] при $n(r-1) = 30$ степенях свободы и заданном уровне значимости $\alpha = 5\%$, $t_{kr} = 1{,}697$. В рассматриваемом случае коэффициенты b_{12}, b_{13}, b_{23} моделей (1) и (2) являются незначимыми.

Математические модели, включающие только значимые коэффициенты:

— для стандартного круга:

$$Y = 2{,}0496 + 0{,}55687X_1 + 0{,}799X_2 + \\ + 0{,}852X_3 + 0{,}5135X_1^2 + 0{,}546X_2^2 + \\ + 0{,}75257X_3^2; \quad (3)$$

— для разнозернистого круга:

$$Y = 1{,}15 + 0{,}33686X_1 + 0{,}4457X_2 + \\ + 0{,}5556X_3 + 0{,}2949X_1^2 + 0{,}39136X_2^2 + \\ + 0{,}48866X_3^2. \quad (4)$$

Для получения уравнения в натуральных значениях параметров режима шлифования S_p, V_d и вместо X_i в уравнениях (1) и (2) подставили их значения из формулы преобразования.

Таким образом, математическая модель зависимости волнистости от параметров режима резания при шлифовании:

— для стандартного круга:

$$Y = 4{,}8819 - 0{,}3745S_p - 0{,}4617V_d - \\ - 107{,}9t + 0{,}032S_p^2 + 0{,}061V_d^2 + 1881{,}3t^2;$$

— для разнозернистого круга:

$$Y = 3{,}697 - 0{,}2484S_p - 0{,}4313V_d - \\ - 79{,}95t + 0{,}0184S_p^2 + 0{,}0435V_d^2 + 1221{,}65t^2. \quad (6)$$

Полученные модели проверили на адекватность. Определили расчетные значения волнистости поверхности по полученным моделям для различных точек матрицы планирования:

— при шлифовании стандартным кругом:

$\hat{Y}_1 = 1{,}65$; $\hat{Y}_2 = 2{,}754$; $\hat{Y}_3 = 3{,}276$; $\hat{Y}_4 = 4{,}376$;
$\hat{Y}_5 = 3{,}35$; $\hat{Y}_6 = 4{,}458$; $\hat{Y}_7 = 4{,}98$; $\hat{Y}_8 = 6{,}08$;
$\hat{Y}_9 = 2{,}14$;
$\hat{Y}_{10} = 3{,}478$; $\hat{Y}_{11} = 1{,}8789$; $\hat{Y}_{12} = 3{,}8489$;
$\hat{Y}_{13} = 2{,}1296$; $\hat{Y}_{14} = 4{,}2$; $\hat{Y}_{15} = 2{,}23$;

— при шлифовании разнозернистым кругом:

$\hat{Y}_1 = 1{,}1$; $\hat{Y}_2 = 1{,}6$; $\hat{Y}_3 = 1{,}8336$; $\hat{Y}_4 = 1{,}929$; $\hat{Y}_5 = 2{,}02$;
$\hat{Y}_6 = 2{,}7$; $\hat{Y}_7 = 2{,}97$; $\hat{Y}_8 = 3{,}3$; $\hat{Y}_9 = 1{,}176$;
$\hat{Y}_{10} = 1{,}986$; $\hat{Y}_{11} = 1{,}18$; $\hat{Y}_{12} = 2{,}2667$;
$\hat{Y}_{13} = 1{,}191$; $\hat{Y}_{14} = 2{,}541$; $\hat{Y}_{15} = 1{,}146$.

Определена дисперсия адекватности:

— при шлифовании стандартным кругом:

$$S_{ad}^2 = 2{,}583;$$

— при шлифовании разнозернистым кругом:

$$S_{ad}^2 = 0{,}809;\ S_{ad}^2 = 0{,}809.$$

Определено соотношение между дисперсией адекватности и дисперсией воспроизводимости:

— при шлифовании стандартным кругом:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)} = \frac{2{,}583}{1{,}713} = 1{,}5;$$

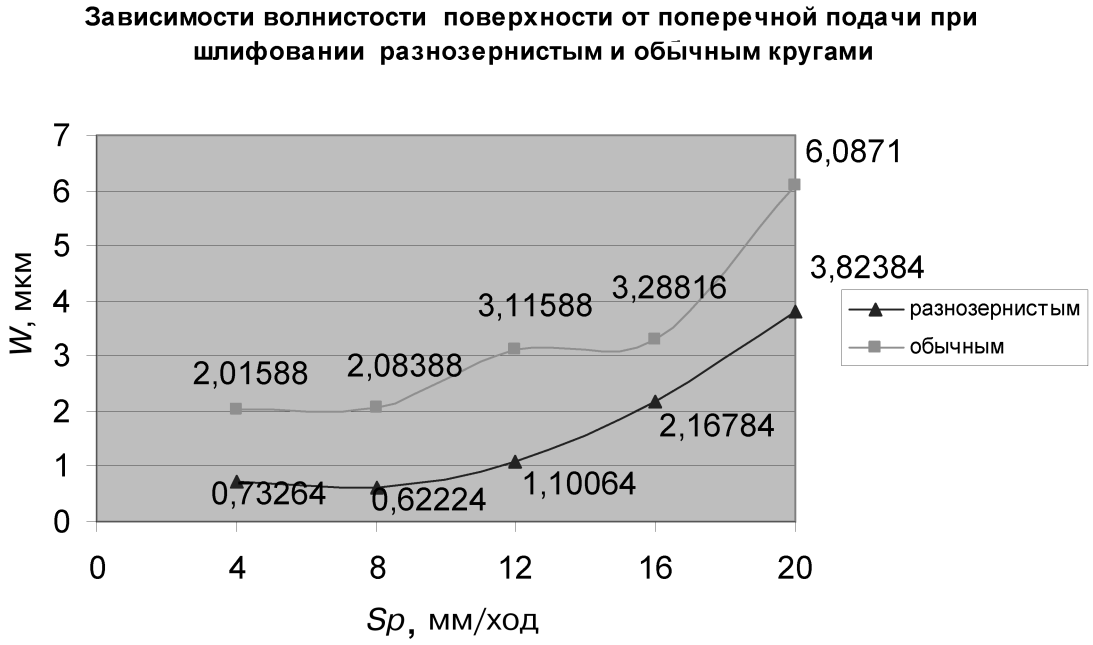
— при шлифовании разнозернистым кругом:

$$F = \frac{0{,}809}{0{,}8478} = 0{,}95.$$

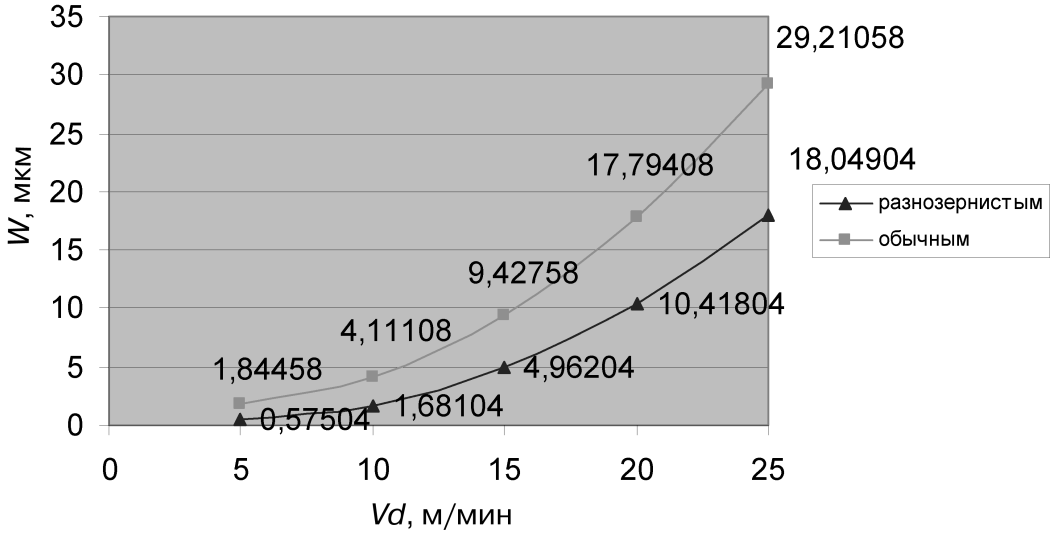
Табличное значение критерия Фишера равно $F_{kr} = 1{,}6$. Поскольку $F \prec F_{kr}$, полученные модели являются адекватными реальным процессам.

На основе полученных эмпирических моделей (4) и (5) построены графические зависимости $W = \varphi(S_p)$, $W = \varphi(V_d)$, $W = \varphi(t)$, представленные на рис. 1, *а*, *б*, *в*).

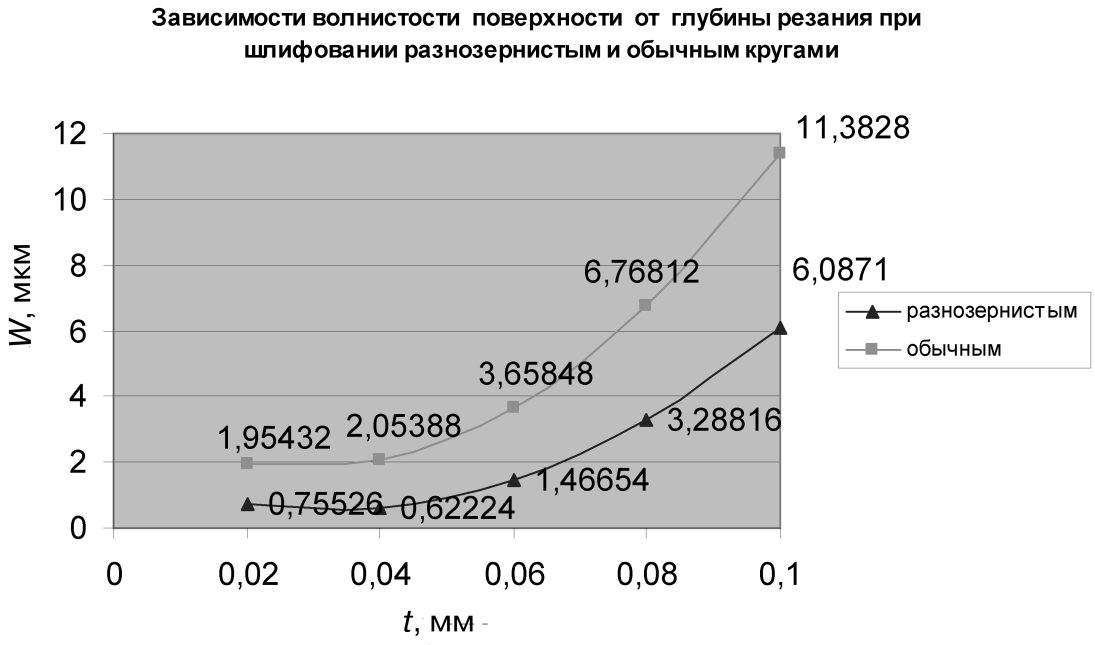
Анализ полученных моделей показывает, что при соответствующем подборе рационального сочетания элементов режима шлифования можно добиться уменьшения волнистости поверхности, шлифованной как стандартным, так и разнозернистым шлифовальным кругом.



а



б



в

Волнистость поверхности, шлифованной разнозернистым шлифовальным кругом, значительно ниже, чем волнистость поверхности, шлифованной стандартным кругом. Сосредоточение на рабочей поверхности разнозернистого шлифовального круга зерен различных номеров, начиная с грубого и кончая тонким, позволяет в одном технологическом переходе совмещать черновое, получистовое, чистовое и тонкое шлифование.

Список литературы

1. *Гусейнов Г.А., Багиров С.А.* Разнозернистый шлифовальный круг // Вестник машиностроения. 2009. № 7. С. 11—14.
2. *Кацев П.Г.* Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1974. 274 с.
3. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Математическая статистика. М.: Высшая школа, 1984. 374 с.

Статья поступила в редакцию 10.11.2010 г.