

# Технология и технологические машины



**ГУСЕЙНОВ**

**Гасан Ахмед оглы**

доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой  
«Технологические  
комплексы и специальная  
техника»

(Азербайджанский  
технический университет)



**БАГИРОВ**

**Сахиб Абас оглы**

кандидат технических  
наук, доцент кафедры  
«Технологические  
комплексы и специальная  
техника»

(Азербайджанский  
технический университет)

УДК 621.92-5

## Исследование условий повышения точности геометрической формы поверхностей, шлифованных разнозернистым и стандартным кругами

**Гусейнов Гасан Ахмед оглы,  
Багиров Сахиб Аббас оглы**

*Установлены функциональные зависимости между точностью геометрической формы плоских поверхностей высокоточных деталей, обработанных с применением разнозернистого и стандартного шлифовальных кругов, и режимными параметрами процесса плоского шлифования периферией круга. Выявлено что, при шлифовании разнозернистым шлифовальным кругом точность геометрической формы значительно выше, чем при шлифовании стандартным кругом.*

**Ключевые слова:** шлифование, плоское шлифование, разная зернистость, эмпирическая модель, абразивное воздействие, площадь контакта, сила резания.

*The functional relationships between an accuracy of the geometry of precision parts flat surfaces, processed by different grain size grinding wheels and standard ones, and operating conditions of the process of flat grinding by a wheel periphery have been established. The precision of geometry was found to be significantly higher when grinding by a different grain size grinding wheel than a standard one.*

**Keywords:** Grinding, surface grinding, different grain size, empirical model, abrasive action, contact area, cutting force.

При шлифовании плоских поверхностей периферией круга по ширине обработки в зонах входа шлифовального круга в контакт с обрабатываемой поверхностью и выхода из него имеют место характерные погрешности геометрической формы в виде неплоскостности. Образование погрешностей формы в поперечных сечениях обработанной поверхности объясняется тем, что с изменением текущей площади контакта после каждой поперечной подачи в зоне входа до процесса установившегося шлифования происходит неравномерное повышение силы резания. На участке выхода происходит обратное явление, т. е. после каждого рабочего хода с выходом круга из контакта неравномерно уменьшаются сила резания и упругие отжатия технологической системы от значений, соответствующих установившемуся шлифованию.

В работе [1] теоретически доказано, что при шлифовании стандартным кругом процессы, происходящие в зонах входа и выхода, значительно отличаются друг от друга, поскольку первая полоса шлифовального круга с шириной, равной поперечной подаче, выполняет в основном режущую функцию, а последующие полосы, в зависимости от их встреч с уже повторно срезанной поверхностью, являются выхаживающими. При этом между изменениями текущих значений силы резания и площади контакта как в зоне входа, так и в зоне выхода возникают соответствующие диспропорции. В результате неравномерного распределения удельной силы на единицу площади контакта возникает неравномерное абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность, что приводит к соответствующим отклонениям от правильной геометрической формы.

Обеспечения стационарности макропрофиля шлифованной поверхности по ширине обработки можно достичь путем компенсации предполагаемого уменьшения числа фактически работающих абразивных зерен из-за попадания части их в уже срезанные канавки при повторных контактах. Разнозернистый шлифовальный круг способствует восстановлению режущей способности рабочей поверхности путем адекватного уменьшения зернистости

и увеличения количества режущих зерен соответствующих условных полос в зависимости от числа их повторных встреч с уже срезанной поверхностью. В соответствии с предложенной методикой [1] для режущей фронтальной полосы выбирают высокозернистые абразивы, а по мере удаления от нее зернистость убывает при соответствующем увеличении числа фактически работающих зерен для каждой условной полосы. При этом также обеспечивается высокая эффективность шлифования в результате уменьшения работы внешнего трения зерен и связки о поверхность металла, а также снижения температурного воздействия на обрабатываемую поверхность.

Целью проведенных экспериментальных исследований является проверка вышеуказанных теоретических предпосылок и определение эмпирической зависимости между точностью геометрической формы плоских поверхностей высокоточных деталей, шлифованных с применением разнозернистого и стандартного кругов, и режимными параметрами процесса плоского шлифования периферией круга. Для проведения экспериментальных исследований был выбран ортогональный план второго порядка, что позволяет построить квадратичные модели (1). Для сравнительной оценки точности геометрической формы шлифованных поверхностей эксперименты были проведены с применением стандартного и разнозернистого шлифовальных кругов, при одних и тех же условиях шлифования.

В качестве абразивного инструмента были выбраны обычный по ГОСТ 2424—75 и разнозернистый шлифовальные круги прямого профиля типа ПП 300×40×76 с характеристикой 14A50CM2K. Рабочая поверхность разнозернистого шлифовального круга состоит из пяти полос шириной по 8 мм. Номера зернистости отдельных полос разнозернистого шлифовального круга были определены в соответствии с методикой, приведенной в работе [1]. В качестве материала обрабатываемой детали была применена сталь 40X с HRC 35. Эксперименты были проведены на продольном плоскошлифовальном станке модели 3Б722.

Математическая модель второго порядка представляется в виде [2]

$$M\{Y\} = \eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i>j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i^2, \quad (1)$$

где  $\beta_0$  — свободный член;  $\beta_1$  — коэффициенты при линейных членах;  $\beta_{ij}$  — коэффициенты при взаимодействии факторов.

Кодирование значений факторов произведено с помощью формулы преобразования [2]

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i_0}}{\Delta \tilde{X}_i}. \quad (2)$$

Оценка коэффициентов регрессии производится по формуле [2] с учетом численных значений моментов и вспомогательных коэффициентов из табл. 1 и табл. 2.

$$\left. \begin{aligned} b'_0 &= \frac{\sum_{v=1}^n r_v \bar{Y}_n}{N}, \\ b_{i_i} &= \frac{\sum_{v=1}^n r_v X_{i_v}^2 Y_n}{\sum_{g=1}^n (X_{i_g}^4 - X_{i_g}^2 X_{i_g}^2)}, \\ b_{i_i} &= \frac{\sum_{v=1}^n r_v X_{i_v} \bar{Y}_n}{\sum_{g=1}^n X_{i_g}^2}, \quad i \neq 0 \\ b_{i_i} &= \frac{\sum_{v=1}^n r_v X_{j_u} \bar{Y}_n}{\sum_{g=1}^n X_{i_g}^2 X_{j_g}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $N$  — общее число опытов;  $r_v$  — число повторных опытов в  $v$ -й точке плана;  $n$  — число разных точек в плане;  $v$  — порядковый номер точки плана;  $\bar{Y}_v$  — средний отклик по  $r$  опытам в точке с номером  $r$ ;  $k$  — число факторов;  $\tilde{Y}$  —

оценка математического ожидания отклика  $M\{Y\} = \eta$ ;  $X_i$  — переменные факторы;  $\bar{Y}_n$  — параметр оптимизации, подлежащий изучению;  $i$  — номер повторения испытания;  $j$  — номер уровня фактора.

Оценка коэффициента  $b_0$ , входящего в исходную модель, производится по формуле [2]

$$b_0 = b_0^1 - \lambda_2^1 \sum_{i=1}^k b_{i_i},$$

где  $\lambda_2$  — момент второго порядка;

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{g=1}^N X_{i_g}^2}{N}; \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

Построчные дисперсии подсчитываются по формуле

$$S_v^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (Y_{v_j} - \bar{Y}_n)^2}{r-1}; \quad (5)$$

объединенная дисперсия параметра оптимизации — по формуле

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_{j=1}^r (Y_{v_j} - \bar{Y}_n)^2}{r-1}. \quad (6)$$

Дисперсия коэффициента регрессии  $S^2\{b_i\}$  при равномерном дублировании опытов по точкам с числом повторных опытов  $r$  определяется по формуле

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{Y\}}{nr}. \quad (7)$$

Дисперсия адекватности  $S_{ag}^2$  определяется по формуле

$$S_{ag}^2 = \frac{SS_{ag}}{f_{ag}} = \frac{\sum_{v=1}^n (\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2}{n-m}, \quad (8)$$

где  $m$  — число коэффициентов в модели;  $SS_{ag}$  — сумма квадратов отклонений;  $f_{ag}$  — число степеней свободы для дисперсии неадекватности.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

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	$\Delta$	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

Матрица ортогонального плана второго порядка для  $k = 3$ , со значениями погрешностей геометрической формы  $\Delta_{f_c}$  и  $\Delta_{f_n}$  поверхностей, шлифованных с применением разнозернистого и стандартного кругов.

Оценка коэффициентов регрессии произведена по формулам (3) с учетом результатов опытов, приведенных в табл. 2, и вспомогательных коэффициентов, определенных исходя из условий проведения экспериментов; при шлифовании.

При шлифовании:  
разнозернистым кругом:

$$b'_0 = 13,06; b_1 = 3,4; b_2 = 3,058; b_3 = 3,4; \\ b_{12} = 0,125; b_{13} = 0,125; b_{23} = 0,125; \\ b_1^2 = 3,015; b_2^2 = 2,7089; b_3^2 = 3,015;$$

стандартным кругом:

$$b'_0 = 17,73; b_1 = 4,87; b_2 = 3,26; b_3 = 4,03; \\ b_{11} = -0,5; b_{12} = -0,25; b_{13} = -0,25; \\ b_1^2 = 4,3; b_2^2 = 2,9; b_3^2 = 3,58.$$

Оценка коэффициента  $b_0$ , входящего в исходную модель, произведена по формуле (4):

$$b_0 = b'_0 - 0,7303(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2).$$

При шлифовании:  
разнозернистым кругом:

$$b_0 = 6,67798;$$

стандартным кругом:

$$b_0 = 9,857.$$

Математическая модель зависимости погрешности геометрической формы поверхности от параметров режима резания в преобразованных переменных  $X_i$  будет:

Таблица 2

Матрица ортогонального плана второго порядка,  $k = 3$

$v$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\Delta_{f_c}$	$\Delta_{f_n}$
1	-	-	-	4	3	0,02	6	
2	+	-	-	12	9	0,02	15	10
3	-	+	-	4	9	0,02	12	9
4	+	+	-	12	9	0,02	24	17
5	-	-	+	4	3	0,06	13	10
6	+	-	+	12	3	0,06	26	18
7	-	+	+	4	9	0,06	22	17
8	+	+	+	12	9	0,06	28	24
9	-1,215	0	0	3,14	6	0,04	12	9
10	+1,215	0	0	12,86	6	0,04	23	16
11	0	-1,215	0	8	2,355	0,04	13	9
12	0	+1,215	0	8	9,645	0,04	21	16
13	0	0	-1,215	8	6	0,0157	12	9
14	0	0	+1,215	8	6	0,0643	22	16
15	0	0	0	8	6	0,04	17	12

при шлифовании разнотерным кругом:

$$Y = 6,678 + 3,4X_1 + 3X_2 + 3,4X_3 + 0,125X_1X_2 + 0,125X_1X_3 + 0,125X_2X_3 + 3X_1^2 + 2,7X_2^2 + 3X_3^2; \quad (9)$$

при шлифовании стандартным кругом:

$$Y = 9,857 + 4,87X_1 + 3,26X_2 + 4,03X_3 - 0,5X_1X_2 - 0,25X_1X_3 - 0,25X_2X_3 + 4,3X_1^2 + 2,9X_2^2 + 3,58X_3^2.$$

Для проверки достоверности полученных моделей был проведен статистический анализ. С этой целью осуществлена проверка ряда гипотез: об однородности дисперсий, значимости коэффициентов регрессии и об адекватности модели.

Контроль правильности вычислений выполнен по формуле [2]:

для разнотерного шлифовального круга:

$$\sum_{v=1}^{15} \bar{Y}_v = 196; \sum_{v=1}^{15} \hat{Y}_v = 2000;$$

для стандартного шлифовального круга:

$$\sum_{v=1}^{15} \bar{Y}_v = 266; \sum_{v=1}^{15} \hat{Y}_v = 265,547.$$

Однородность дисперсий, характеризующих ошибку эксперимента по отдельным точкам, проверена с помощью критерия Кохрена. Дисперсии оказались однородными при уровне значимости 5%. Объединенная оценка дисперсии, связанная с чистой ошибкой, вычислена по формуле [6]:

для разнотерного шлифовального круга:

$$S^2\{Y\} = 31,53;$$

для стандартного шлифовального круга:

$$S^2\{Y\} = 35.$$

По формуле (8) подсчитана дисперсия, характеризующая неадекватность модели:

для разнотерного шлифовального круга:

$$S_{ad}^2 = 41;$$

для стандартного шлифовального круга:

$$S_{ad}^2 = 48,285.$$

Определена дисперсия, характеризующая ошибку опыта.

Построчные дисперсии подсчитаны по формуле (5) и занесены в табл. 3 и табл. 4.

Дисперсия параметра оптимизации  $S^2\{Y\}$  подсчитана на основе данных табл. 3 и табл. 4 по формуле (6):

для разнотерного шлифовального круга:

$$S^2\{Y\} = 31,53;$$

для стандартного шлифовального круга:

$$S^2\{Y\} = 35.$$

Учитывая, что число повторных опытов во всех точках матрицы плана эксперимента одинаково, проверка однородности дисперсий произведена с помощью критерия Кохрена, т. е. путем определения отношения максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий (табл. 3 и табл. 4):

$$G = \frac{S_{v_{\max}}^2}{\sum_{v=1}^{15} S_v^2}.$$

При шлифовании разнотерным кругом  $G = 0,1$ , стандартным кругом —  $G = 0,144$ .

По таблице, представленной в работе (3), найдено для  $f_{v_{\max}} = 2$ ,  $f_{\text{знам}} = 15$  степеней свободы и уровня значимости 5% критическое значение  $G_{kr} = 0,61$ . Гипотеза об однородности дисперсий принимается, так как экспериментальное значение критерия Кохрена меньше табличного ( $G < G_{kr}$ ).

Следовательно,  $0,144 < 0,61$ ;  $0,1 < 0,61$ .

Проверка значимости каждого коэффициента проведена по  $t$ -критерию Стьюдента. При равномерном дублировании опытов по точкам с числом повторных опытов  $r$  дисперсия коэффициента регрессии  $S^2\{b_i\}$  определена по формуле (7). При шлифовании:

разнотерным кругом:

$$S^2\{b_i\} = 0,7; S^2\{b_i\} = 0,837;$$



стандартным кругом:

$$S^2\{b_i\} = 0,78; S\{b_i\} = 0,8.$$

Определены значения  $t$ -критерия по формуле

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}};$$

для разнозернистого шлифовального круга:

$$t_0 = 7,978; t_1 = 4,06; t_2 = 3,58; t_3 = 4,06; \\ t_{12} = 0,149; t_{13} = 0,149; t_{23} = 0,149; t_1^2 = 3,58; \\ t_2^2 = 3,22; t_3^2 = 3,58;$$

для стандартного шлифовального круга:

$$t_0 = 12,3; t_1 = 6,08; t_2 = 4,075; t_3 = 5; \\ t_{12} = 0,6; t_{13} = 0,3; t_{23} = 0,3; t_1^2 = 5,37; \\ t_2^2 = 3,6; t_3^2 = 4,47.$$

Критическое значение  $t_{kr}$  найдено по таблице работы [3] при  $n(r-1) = 30$  степенях свободы и заданном уровне значимости  $\alpha = 5\%$ ,  $t_{kr} = 1,697$ . Если  $t > t_{kr}$ , гипотеза отвергается, и коэффициент  $b_i$  признается значимым. В рассматриваемых примерах коэффициенты  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  являются незначимыми.

Статистическая незначимость коэффициентов  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  вызвана следующими причинами:

— шаг варьирования факторов скорости изделия и подачи на глубину выбран малым исходя из технических возможностей плоскошлифовального станка модели ЗБ722;

— из-за наличия неуправляемых и неконтролируемых параметров при проведении опытов и измерении погрешностей геометрической формы;

— в рассматриваемом случае незначимость коэффициентов, оценивающих взаимодействия поперечной подачи, скорости детали и подачи на глубины вызвана слабостью этих эффектов.

Построен доверительный интервал длиной  $\delta b_i$ , где

$$\delta\{b_i\} = t_{kr} S\{b_i\};$$

для разнозернистого шлифовального круга:

$$\delta\{b_i\} = 1,42,$$

для стандартного шлифовального круга:

$$\delta\{b_i\} = 1,3576.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше половины длины доверительного интервала.

Математические модели рассмотренных задач составлены в виде уравнений связи выходного параметра и переменных, включающих только значимые коэффициенты. При шлифовании:

разнозернистым кругом:

$$Y = 6,678 + 3,4X_1 + 3X_2 + 3,4X_3 + \\ + 3X_1^2 + 2,7X_2^2 + 3X_3^2; \quad (10)$$

стандартным кругом:

$$Y = 9,857 + 4,87X_1 + 3,26X_2 + \\ + 4,03X_3 + 4,3X_1^2 + 2,9X_2^2 + 3,58X_3^2.$$

Для получения уравнений (10) в натуральных значениях параметров режима шлифования  $V_k$ ,  $V_d$  и  $t$  вместо  $X_i$  в уравнениях поставлены их значения из формулы преобразования (2). При шлифовании:

разнозернистым кругом:

$$\Delta_{fr} = 21,878 - 2,15S_p - 2,6V_d - 430t + \\ + 0,1875S^2 + 0,3V_d^2 + 7500t^2; \quad (11)$$

стандартным кругом:

$$\Delta_{fr} = 28,657 - 3,08S_p - 2,77V_d - 514,5t + \\ + 0,26875S^2 + 0,32V_d^2 + 8959t^2.$$

Полученные модели проверены на адекватность. Для этого была проведена оценка отклонения значений погрешностей геометрической формы, полученных на основе расчетов по формуле (11), от результатов, полученных экспериментальным путем в различных точках факторного пространства (табл. 2). Определены расчетные значения погрешностей геометрической формы по полученным математическим моделям (11) при шлифовании разнозернистым и стандартным шлифовальными кругами для различных точек матрицы плани-

рования. Полученные значения  $\Delta_f$  и  $\Delta_s$  занесены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Статистические данные экспериментов с применением разнозернистого шлифовального круга

Точки плана, v	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}_v$	$S_v^2$	$\hat{Y}_v$	$(\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2$
1	2	7	3	4	7	5,6	2,56
2	16	6	8	10	28	12,4	5,76
3	6	6	15	9	27	11,6	6,76
4	25	13	13	17	48	18,3	1,69
5	7	17	6	10	37	12,4	5,76
6	26	13	15	18	49	19,1	1,21
7	14	24	13	17	37	24	49
8	21	19	32	24	49	25,2	1,44
9	7	5	12	8	13	7	1
10	13	22	10	15	39	15,2	0,04
11	15	6	6	9	27	7	4
12	13	23	12	16	37	14,3	2,89
13	7	8	15	10	19	6	16
14	23	13	15	17	28	15,4	2,56
15	8	18	10	12	28	6,7	28,09
				196	473	200,2	128,76

Таблица 4

Статистические данные экспериментов с применением стандартного шлифовального круга

Точки плана, v	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}_v$	$S_v^2$	$Y_v$	$(Y_v - \bar{Y}_v)^2$
1	4	4	10	6	12	8,5	6,25
2	11	12	22	15	37	18,2	10,24
3	18	8	10	12	28	14,9	8,41
4	19	32	21	24	49	24,677	0,4
5	11	10	18	13	19	13,7	0,49
6	35	21	22	26	61	26,3	0,09
7	19	18	29	22	25	22,9	0,81
8	38	22	24	28	76	32,7	22,09
9	10	17	9	12	19	10,3	2,89
10	19	20	30	23	37	25	4
11	11	18	10	13	19	10,23	7,67
12	28	16	19	21	39	18,05	8,7
13	10	8	18	12	19	10,24	3,09
14	19	30	17	22	49	20	4
15	23	15	13	17	28	9,857	50,4
				266	527	265,547	129,5

Проверка гипотезы об адекватности модели проведена с использованием  $F$ -критерия Фишера. Определены соотношения между дисперсией адекватности и дисперсией воспроизводимости. При шлифовании:

разнозернистым кругом:

$$F_r = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)} = \frac{41}{35} = 1,18;$$

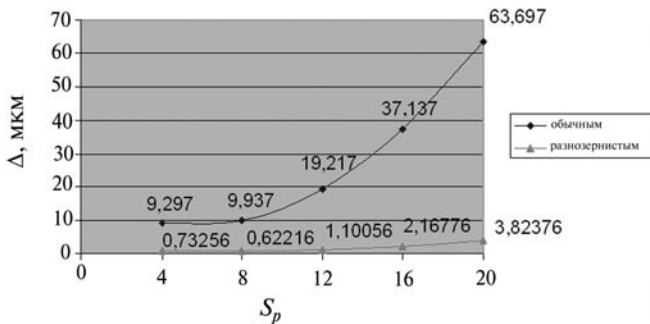
стандартным кругом:

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)} = \frac{48,285}{31,53} = 1,53.$$

Табличное значение критерия Фишера для числа степеней свободы  $f_{fd} = 5$ , общего числа степеней свободы для объединенной дисперсии  $S^2\{Y\}$ ,  $f_e = 30$  и уровня значимости  $\alpha = 10\%$  равно  $F_{kr} = 1,6$ . Поскольку  $F_r$  и  $F_c < F_{kr}$ , полученные модели погрешностей геометрической формы при шлифовании разнозернистым и стандартным шлифовальными кругами (11) являются адекватными реальным процессам. На основе полученных математических моделей построены графические зависимости  $\Delta = f(S_p)$ ;  $\Delta = f(V_d)$ ;  $\Delta = f(t)$  (см. рис. 1).

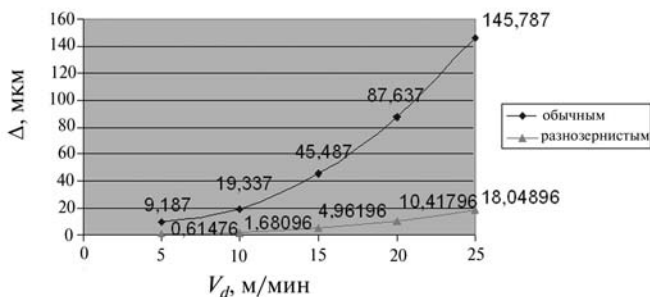
Анализ полученных моделей и графических зависимостей показывает, что первоначальные технологические предпосылки влияния параметров режима шлифования на точность геометрической формы шлифованных поверхностей с применением разнозернистого и стандартного шлифовальных кругов нашли свое экспериментальное подтверждение. Из этих зависимостей следует, что при соответствующем подборе рационального сочетания элементов режима шлифования можно добиться повышения точности геометрической формы. У образцов, шлифованных с применением стандартного шлифовального круга, повышение точности геометрической формы наблюдается при минимальных значениях элементов режима шлифования. При шлифовании с применением разнозернистого шлифовального круга, по сравнению со стандартным кругом, точность геометрической формы значительно повышается. По степени влияния на точность геометрической формы шлифованных поверх-

Зависимости погрешности формы поверхности от поперечной подачи при шлифовании разнозернистым и обычным кругами



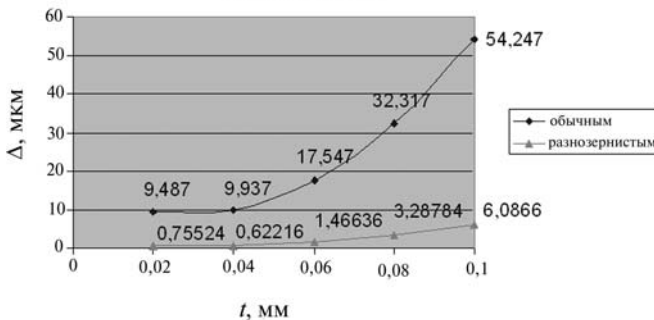
а

Зависимости погрешностей формы поверхности от скорости детали при шлифовании разнозернистым и обычным кругами



б

Зависимости погрешностей формы поверхности от глубины резания при шлифовании разнозернистым и обычным кругами



в

Графические зависимости точности геометрической формы от параметров режима шлифования:

а — от поперечной подачи; б — от продольной скорости детали; в — от глубины резания

ностей параметры режима обработки располагаются следующим образом:  $V_d > t > S_p$ .

Полученные эмпирические зависимости позволяют установить высокую эффективность разнозернистого шлифовального круга и определить рациональное сочетание элементов режима шлифования для выявления базовых условий их внедрения.

## Выводы

1. Установлена функциональная эмпирическая связь между параметрами режима шлифования и неплоскостностью шлифованных поверхностей. Выявлено, что при шлифовании с применением разнозернистого шлифовального круга точность геометрической формы значительно выше, чем с применением стандартного круга.

2. Зависимости точности геометрической формы шлифованной поверхности от поперечной подачи, скорости круга и глубины резания описываются кривыми второго порядка.

3. Высокая эффективность разнозернистого круга объясняется тем, что при шлифовании с изменением текущего значения площади контакта прямо пропорционально изменяется и сила резания. В результате равномерного распределения удельной силы на единицу площади контакта возникает равномерное абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность в зонах входа шлифовального круга в контакт и выхода из него, что приводит к соответствующему повышению точности геометрической формы.

## Литература

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

Статья поступила в редакцию 19.01.2011 г.