

**Азарова Н.В.** (канд. техн. наук, доцент)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА И ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВЫСОТНОСТИ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА**

Определены параметры закона распределения разнорысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна на рабочей поверхности алмазных кругов, сформированной различными способами. Установлено, что разнорысотность зерен описывается распределением Вейбулла.

### **Шлифовальный круг, алмазные зерна, разнорысотность зерен**

#### **Введение**

Производительность алмазного шлифования, режимы обработки определяются параметрами рабочей поверхности круга (РПК), к числу которых относятся количество зерен на РПК, расстояние между ними, разнорысотность зерен и величина выступания зерен из связки. Характеристики РПК являются основой для определения формы и размеров среза, шероховатости обработанной поверхности.

Разнорысотность зерен алмазных кругов как после правки, так и при установившемся в процессе шлифования рельефе поверхности описывается различными законами распределения: равномерным [1]; нормальным [2, 3]; показательным [4]; Релея [5]; бета-распределением [6]; гамма-распределением [7]; распределением Вейбулла [8, 9]; комбинацией нескольких законов [10, 11, 12].

Такое многообразие мнений по вопросу о законе распределения разнорысотности зерен объясняется как различным методологическим подходом к оценке рельефа РПК, так и различным состоянием режущей поверхности исследуемого инструмента.

Целью работы является установление закона и определение параметров распределения разнорысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна на рабочей поверхности алмазного круга. Эти данные необходимы для расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности.

#### **Основная часть**

Исследования проводили на измерительном комплексе, позволяющем регистрировать рельеф рабочей поверхности кругов на металлической связке методом профилографирования с последующей записью данных на ПЭВМ [13], по разработанной нами методике [14].

Параметры разнорысотности рельефа определяли по результатам профилографирования рабочей поверхности шлифовальных кругов 1А1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01 в состоянии поставки (правка шлифованием абразивным кругом в заводских условиях), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, направленными электроэрозионным способом. Режимы правки: скорость круга 30 м/с, скорость стола равна нулю, поперечная подача – ручная, вертикальная подача 0,002...0,007 мм/ход, средняя сила тока 5...8 А, напряжение холостого хода 50 В, правящий электрод – брусок из меди М1, правка осуществлялась в рабочей зоне. Режимы

обработки: скорость круга  $v_k = 30$  м/с, скорость стола  $v_{ст} = 6$  м/мин, глубина шлифования  $t = 0,015$  мм. Выборки формировали по двум профилограммам рабочей поверхности, записанным в направлении, перпендикулярном оси круга, со смещением трасс профилографирования вдоль оси круга.

Формирование выборок осуществляли на ПЭВМ с помощью специально разработанной программы. Затем определяли статистические характеристики выборок и подбирали теоретический закон, описывающий распределение разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна.

Проверку принадлежности выборок объемом  $n_1$  и  $n_2$  одной генеральной совокупности выполняли путем сравнения средних значений  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  и дисперсий  $s_1^2, s_2^2$  выборок [15]. Сравнимые выборки считали однородными, если подтверждались гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсий выборок.

Для проверки гипотезы о равенстве выборочных средних вычисляли наблюдаемое значение критерия  $t_{набл} = \left| \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \right| / \sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}$ . По таблице критических точек распределения Стьюдента по заданному уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $f = n_1 + n_2 - 2$  находили критическую точку  $t_{кр}(\alpha, f)$ . Гипотеза о равенстве выборочных средних подтверждалась, если  $t_{набл} \leq t_{кр}$ .

Для проверки равенства дисперсий двух выборок вычисляли отношение большей выборочной дисперсии к меньшей  $F_{набл} = s_1^2/s_2^2$ . По таблице критических точек распределения Фишера – Снедекора по заданному уровню значимости  $\alpha$ , числам степеней свободы  $f_1 = n_1 - 1$  и  $f_2 = n_2 - 1$  находили критическую точку  $F_{кр}(\alpha, f_1, f_2)$ . Гипотеза о равенстве выборочных дисперсий подтверждалась, если  $F_{набл} < F_{кр}$ .

Данные сравнения выборочных средних и выборочных дисперсий разновысотности зерен на рабочей поверхности круга, сформированной различными способами правки, а также в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, значения разновысотности зерен на РПК по двум различным трассам для каждого из рассмотренных способов подготовки поверхности круга с вероятностью 0,95 принадлежат одной генеральной совокупности и не зависят от места профилографирования, что подтверждает стационарность рельефа РПК.

Статистическая проверка законов распределения (нормального, гамма-распределения, распределения Вейбулла) по критерию согласия Пирсона показала, что наиболее подходящим для описания всех возможных случаев закона распределения разновысотности зерен на рабочей поверхности круга является двухпараметрическое распределение Вейбулла, которое имеет частные случаи, представляющие собой асимметричные с право- и левосторонней асимметрией формы распределения.

Функция распределения Вейбулла имеет вид:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (1)$$

плотность распределения

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры закона.

Таблица 1. Сравнение параметров распределений разновысотности зерен на рабочей поверхности кругов 1А1 250×76×15×5 различной зернистости, сформированной различными способами

Шлифовальный круг	Способ формирования РПК		Трасса	Объем выборки	Выборочное среднее $\overline{\Delta R_i}$ , мкм	Выборочная дисперсия $S_i^2$ , мкм <sup>2</sup>	Критерий Фишера		Критерий Стьюдента				
							$F_{набл}$	$F_{сп} (\alpha=0,05)$	$t_{набл}$	$t_{сп} (\alpha=0,05)$			
АС6 100/80-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	37,62	257,14	1,04	1,64	1,25	1,26			
			2	200	39,61	246,41							
		ЭЭП 2	1	200	49,92	283,93	1,24				0,03		
			2	200	49,97	351,63							
	Правка шлифованием абразивным кругом		1	200	22,01	43,94	0,79		1,24				
			2	200	22,51	35,51							
	Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3		1	200	23,59	176,89	1,06		0,89				
			2	200	22,39	186,64							
	АС6 160/125-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	47,36	641,33		1,17		1,64	0,75	1,26
				2	200	49,19	548,08						
ЭЭП 2			1	200	61,18	843,57	1,16	0,44					
			2	200	62,42	728,54							
Правка шлифованием абразивным кругом			1	200	42,17	297,09	1,23	0,96					
			2	200	40,60	241,17							
Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3			1	200	43,80	573,71	1,16	0,38					
			2	200	42,92	493,84							

Распределение Вейбулла описывает положительные случайные величины [16]. В данном случае такая величина – разновысотность  $\Delta R$ , которая подставляется в уравнения (1) и (2) вместо аргумента  $x$ .

Для определения параметров распределения Вейбулла по экспериментальным данным воспользуемся методикой, изложенной в [17].

В соответствии с этой методикой вначале определяются оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения исследуемой величины. В качестве таких оценок принимаем выборочные среднее  $\bar{x}$  и среднее квадратическое отклонение  $s$ .

Далее рассчитывается оценка коэффициента вариации исследуемой величины  $x$ :

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}}.$$

Затем по таблице для полученного значения  $V_x$  находят параметр  $\alpha$  и промежуточная величина  $k_\alpha$ , а параметр  $\beta$  рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{k_\alpha}.$$

Параметры распределения Вейбулла разновысотности зёрен на поверхности кругов 1A1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01, подвергнутых правке электроэрозионным способом и правке шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, а также после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, приведены в таблице 2.

Проверка соответствия экспериментальных данных распределению Вейбулла выполнена с использованием критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ . Экспериментальные значения  $\chi^2$  найдены по формуле [18]

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^{\text{экс}} - p_i)^2}{p_i},$$

где  $N$  – количество значений случайной величины (объём выборки);

$k$  – число разрядов (интервалов группирования) случайной величины;

$p_i^{\text{экс}}$  – экспериментальная вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал;

$p_i$  – гипотетическая вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал, рассчитанная по теоретическому распределению (Вейбулла в нашем случае).

Теоретические значения критерия Пирсона  $\chi^2$  для различных уровней значимости найдены по таблицам [19].

Из таблицы 2 видно, что гипотеза о распределении разновысотности зерен по закону Вейбулла подтверждается для всех выборок при всех принятых уровнях значимости.

Таблица 2. Параметры распределений разновысотности зёрен на рабочей поверхности шлифовальных кругов 1А1 250×76×15×5 различной зернистости, сформированной различными способами

Шлифовальный круг	Способы формирования РПК		Трасса	Параметры распределения Вейбулла		Критерий согласия Пирсона				
				$\alpha$	$\beta$	$\chi^2_{\text{эсп}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$	Уровень значимости		
АС6 100/80-4-М2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	2,5	42,41	15,78	16,81	0,010	
			ЭЭП 2	2	2,7	44,56	11,86	12,59	0,05	
		Шлифованием абразивным кругом	ЭЭП 1	1	3,2	55,71	24,59	24,74	0,025	
			ЭЭП 2	2	2,9	56,08	16,53	16,81	0,010	
	Плоское алмазное шлифование			1	3,5	24,50	12,18	13,28	0,010	
				2	4,25	24,75	13,41	14,07	0,05	
					1	1,84	26,56	13,24	15,09	0,010
					2	1,69	25,07	5,39	9,24	0,10
	АС6 160/125-4-М2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	1,95	53,42	11,82	12,83	0,025
				ЭЭП 2	2	2,22	55,52	9,61	10,64	0,10
Шлифованием абразивным кругом			ЭЭП 1	1	2,23	69,05	5,88	9,24	0,10	
			ЭЭП 2	2	2,48	70,39	9,85	11,07	0,05	
				1	2,63	47,47	8,83	10,64	0,10	
				2	2,83	45,602	12,26	12,59	0,05	
				1	1,90	49,38	14,56	16,81	0,010	
				2	2,02	48,44	8,25	10,64	0,10	

Гистограммы распределений разноразмерности зёрен рабочей поверхности кругов 1А1 250×76×15×5 исследованных зернистостей, сформированной правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, электроэрозионной правкой и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, и аппроксимирующие их кривые распределения Вейбулла приведены на рис. 1.

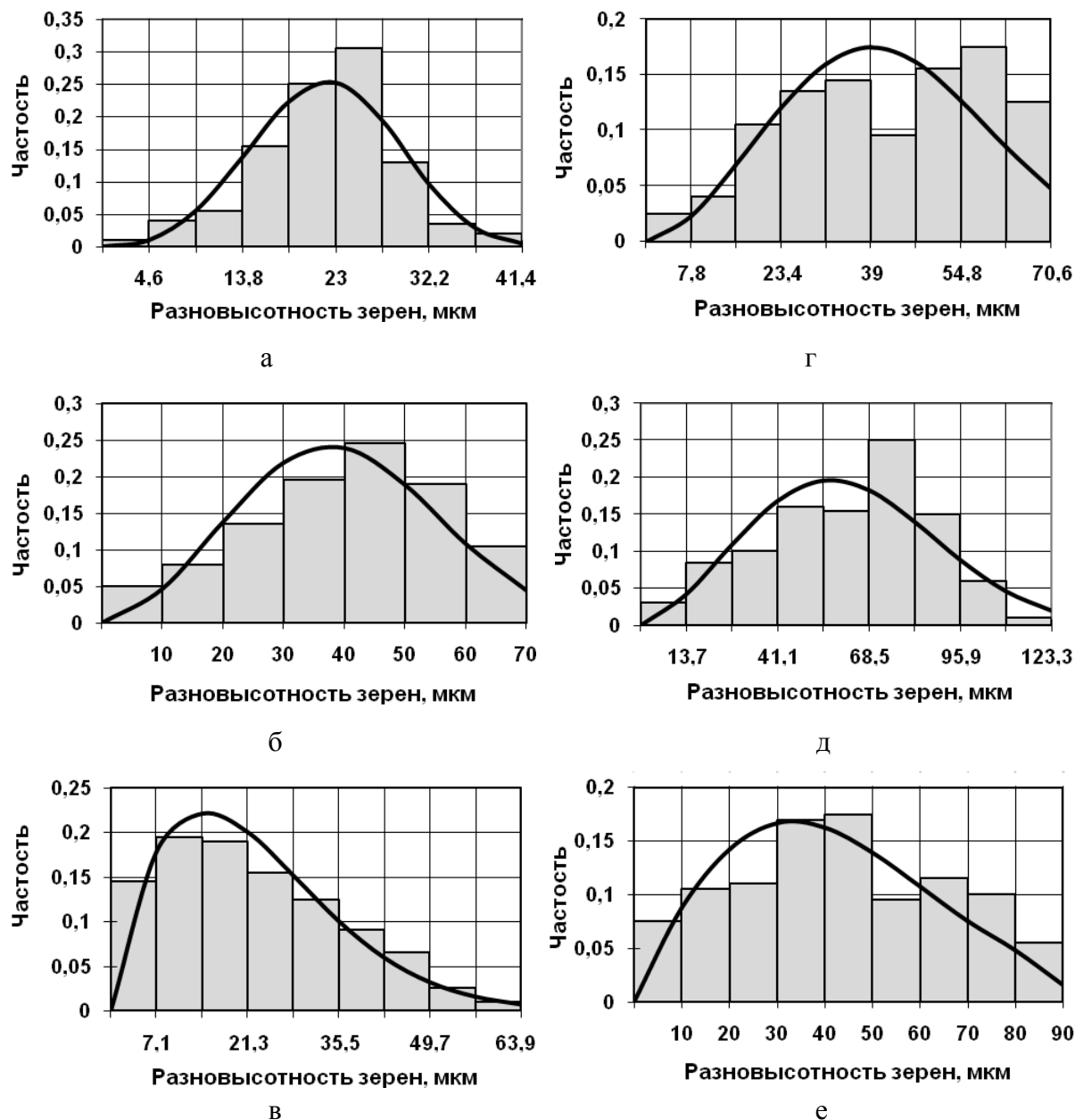
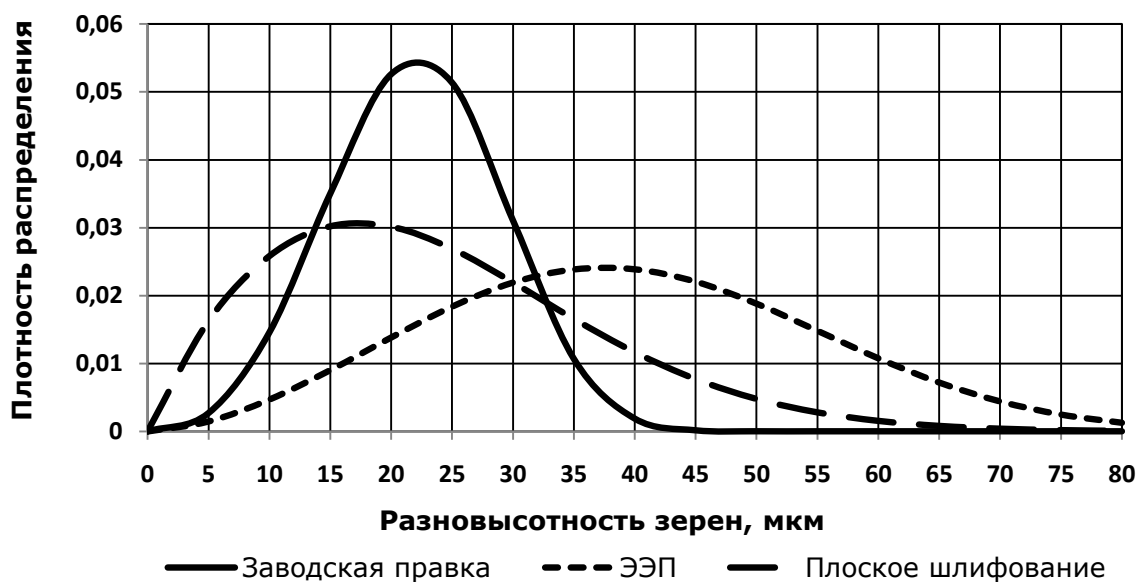


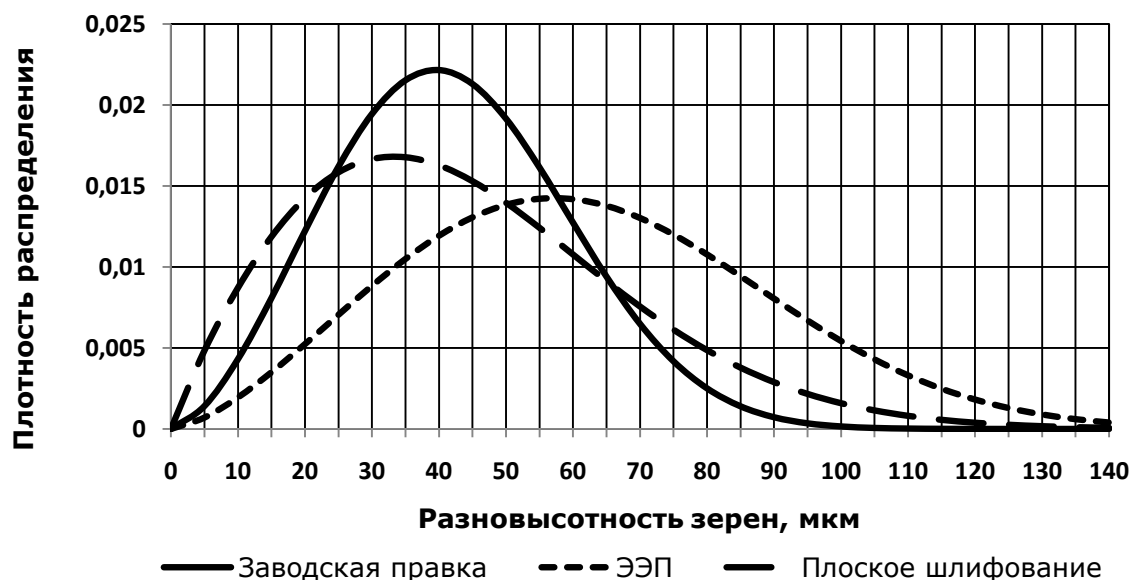
Рис. 1. Выравнивание экспериментальных распределений разноразмерности зёрен на рабочей поверхности кругов АС6 100/80-4-М2-01 (а, б, в) и АС6 160/125-4-М2-01 (г, д, е), сформированной правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях (а, г), электроэрозионной правкой (б, д) и в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом (в, е), распределением Вейбулла

Исследованные распределения разновысотности зерен на рабочей поверхности алмазных кругов в состоянии поставки (заводская правка шлифованием абразивным кругом), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, запрограммированными электроэрозионным способом, сравним между собой.

Построим графики плотности распределений разновысотности (рис. 2) с использованием параметров распределения Вейбулла (см. табл. 2).



а



б

Рис. 2. Плотность распределений Вейбулла разновысотности зерен рабочей поверхности кругов AC6 100/80-4-M2-01 (а) и AC6 160/125-4-M2-01 (б), сформированной различными способами

Рассмотрим, влияет ли способ правки на распределение разновысотности.

Графики плотности распределений разновысотности (см. рис. 2), построенные с использованием параметров распределения Вейбулла (см. табл. 2), показывают, что разновысотность зерен на рабочей поверхности кругов зернистостей АС6 100/80 и АС6 160/125 после электроэрозионной правки имеет сходное распределение с разновысотностью зерен после правки шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, однако распределения для электроэрозионной правки имеют значительно большие математическое ожидание и дисперсию. Средняя разновысотность зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает среднюю разновысотность зерен после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 1,7 раза (в 1,7 – 2,3 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,2 – 1,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Выборочная дисперсия распределения разновысотности зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 5,2 раза (в 5,6 – 9,9 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,8 – 3,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Это объясняется, по всей видимости, тем, что рельеф круга после электроэрозионной правки более выражен, что обеспечивает более высокую режущую способность круга [14].

Сравним распределения разновысотности зерен после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования.

Средняя разновысотность зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает среднюю разновысотность зерен после 30 мин плоского алмазного шлифования в среднем в 1,6 раза (в 1,6 – 2,2 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,1 – 1,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Выборочная дисперсия распределения разновысотности зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после 30 мин плоского алмазного шлифования в среднем в 1,5 раза (в 1,3 – 2,0 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,1 – 1,7 раза для круга зернистости АС6 160/125). График плотности вероятности распределения разновысотности зерен на РПК (см. рис. 2), сформированной электроэрозионной правкой симметричен, а график плотности распределения разновысотности зерен на РПК, сформированной в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, имеет явно выраженную правостороннюю асимметрию. В зоне больших разновысотностей наблюдается резкое уменьшение частостей. Это может быть обусловлено механическим истиранием зерен алмаза в процессе шлифования, выпадением наиболее выступающих зерен, засаливанием субмикрорельефа контактных площадок зерен, а также межзеренного пространства продуктами обработки и, кроме того, различным уровнем связки, в результате чего зерна закрываются связкой не на одном уровне [8, 20].

### **Выводы**

1. Статистические характеристики выборок значений разновысотности зерен на РПК, найденные для каждого из рассмотренных способов формирования поверхности круга (правка шлифованием абразивным кругом, электроэрозионная правка, алмазное шлифование), по результатам обработки профилограмм по двум различным трассам отличаются незначимо. Средняя разновысотность и выборочная дисперсия с достаточной полнотой характеризуют всю генеральную совокупность, которой является разновысотность зерен на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга.

2. Разновысотность зерен на рабочей поверхности кругов 1А1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01 в состоянии поставки



(правка шлифованием абразивным кругом в заводских условиях), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования описывается распределением Вейбулла.

3. Числовые характеристики распределений разновысотности зерен на РПК, сформированные электроэрозионной правкой и правкой шлифованием абразивным кругом, различны. Так, средняя разновысотность, сформированная электроэрозионной правкой, превышает среднюю разновысотность, сформированную правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, в 1,7 раза. При этом выборочная дисперсия после электроэрозионной правки превышает дисперсию после правки шлифованием абразивным кругом в 5,2 раза. Электроэрозионная правка обеспечивает более высокую режущую способность круга и уменьшает возможность контактирования связки с обработанной поверхностью в процессе шлифования, что в свою очередь способствует снижению сил резания. Таким образом, при подготовке алмазного круга на металлической связке предпочтение необходимо отдать электроэрозионной правке.

### Список литературы

1. Seiki Metsui. Statistical approach to grinding mechanism on a few experiments / Metsui Seiki, Syoji Katsuo // Technol. Repts Tokoku Univ. – 1975. – 40. – N 2. – P. 353-369.
2. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
3. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с.
4. Редько С.Г. Расположение абразивных зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга / С.Г. Редько, А.В. Королёв // Станки и инструменты. – 1970. – № 5. – С. 40-41.
5. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 189 с.
6. Филимонов Л.Н. Статистический анализ распределения режущих кромок на рабочей поверхности шлифовального круга / Л.Н. Филимонов, В.Г. Степаненко, Ю.П. Приймак // Абразивы. – 1976. – № 10. – С. 10-13.
7. Konig W. Three dimensional measurement of grinding wheel surface-evaluation and effect of cutting behavior / W. Konig, W. Lortz // CIRP Ann. – 1976. – 25. – N 1. – P. 197-202.
8. Матюха П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 222 с.
9. Полтавец В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: дис... канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Полтавец Валерий Васильевич – Донецк, 2000. – 319 с.
10. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 144 с.
11. Горленко О.А. К вопросу о распределении по высоте вершин абразивных зерен в рабочей поверхности шлифовального круга / О.А. Горленко, С.Г. Бишутин // Физические процессы при резании металлов: межвуз. сб. научн. тр. – Волгоград, 1997. – С. 11-14.

12. Шейко М.Н. Влияние биения круга на структуру его «кинематического» поверхностного слоя / М.Н. Шейко // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 3. – С. 44-47.

13. Пат. 75483 С2 Україна, МПК G01D 7/00. Пристрій для реєстрації рельєфу поверхні абразивних інструментів на металевій зв'язці / П.Г. Матюха, С.В. Константинов, В.П. Цокур, Н.В. Азарова, В.В. Полтавець, О.В. Литвиненко; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет. – № 20040604600; заявл. 14.06.2004; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

14. Азарова Н.В. Влияние способа правки алмазного круга на характеристики его рабочей поверхности / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – Вип. 4. – С. 16-20.

15. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

16. Теория вероятностей / [А.В. Печинкин, О.И. Тескин, Г.М. Цветкова и др.] – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999. – 456 с.

17. Груничев А.С. Таблицы для расчета надежности при распределении Вейбулла / А.С. Груничев, А.И. Михайлов, Я.Б. Шор. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 64 с.

18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

19. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

20. Азарова Н.В. Удельная себестоимость процесса плоского шлифования ванадиевой быстрорежущей стали кругами из сверхтвердых материалов / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Сверхтвердые материалы. – 2008. – №2. – С. 65-71.

**Азарова Н.В.**

Донецький національний технічний університет  
**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОМУ ТА ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ  
РІЗНОВИСОТНІСТІ АЛМАЗНИХ ЗЕРЕН  
НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА**

Визначені параметри закону розподілу різновисотності зерен відносно найбільш виступаючого зерна на робочій поверхні алмазних кругів, яка була сформована різноманітними способами. Встановлено, що різновисотність зерен може бути описана розподілом Вейбулла.

**Azarova N.V.**

Donetsk National Technical University  
**DETERMINATION OF PARAMETERS OF DISTRIBUTION LAW  
OF DIFFERENT HEIGHT OF DIAMOND GRAINS  
ON THE WORKING SURFACE OF GRINDING WHEEL**

The parameters of distribution law of different height of grains about the most overhang grain on diamond wheel working surface, which was formed by different means, are determinate. It is proved that different height of grains characterizes by Weibull distribution.