

УДК 621.923

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА И ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ВЫСТУПАНИЯ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН ИЗ СВЯЗКИ НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Азарова Н.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)  
Тел.: (062) 3010901; E-mail: math@dgту.donetsk.ua

*Аннотация:* Определены параметры закона распределения величины выступания зерен из связки на рабочей поверхности алмазных кругов, сформированной различными способами. Установлено, что величина выступания зерен из связки описывается гамма-распределением

*Ключевые слова:* шлифовальный круг, алмазные зерна, связка

### 1. Введение

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

Распределение величины выступания зерен из связки алмазных кругов как после правки, так и при установившемся в процессе шлифования рельефе поверхности описывается различными законами: параболическим [1], нормальным [2], гамма-распределением [3], степенной зависимостью [4], композицией нескольких законов [5].

Такое многообразие мнений по вопросу о законе распределения величины выступания зерен из связки 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 величины выступания зерен из связки на рабочей поверхности алмазного круга. Эти данные необходимы для расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Исследования проводили по разработанной нами методике [6] на измерительном комплексе, позволяющем регистрировать рельеф рабочей поверхности кругов на металлической связке методом профилографирования с последующей записью данных на ПЭВМ [7].

Параметры распределения величины выступания зерен из связки 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, заправленными 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  $v_{cm} = 6$  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 величины выступления зерен из связки.

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 [8]. 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  $t_{набл} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}}$ . 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 величины выступления зерен из связки 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 величины выступления зерен из связки 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 рабочей поверхности круга.

Статистическая проверка законов распределения (нормального, логнормального, гамма-распределения) по критерию согласия Пирсона показала, что наиболее подходящим для описания всех возможных случаев закона распределения величины выступления зерен из связки на рабочей поверхности круга является двухпараметрическое гамма-распределение, которое используется для описания асимметрично распределенных величин.

Плотность гамма-распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры закона ( $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ),  
 $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция Эйлера.

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

Шлифовальный круг	Способ формирования РПК		Трасса	Объем выборки	Выборочное среднее $\overline{\Delta h_i}$ , мкм	Выборочная дисперсия $S_f^2$ , мкм <sup>2</sup>	Критерий Фишера		Критерий Стьюдента				
							$F_{набл}$	$F_{кр}(\alpha=0,05)$	$t_{набл}$	$t_{кр}(\alpha=0,05)$			
АС6 100/80-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	3,57	25,46	1,25	1,64	1,23	1,26			
			2	200	2,98	20,44							
		ЭЭП 2	1	200	2,97	21,79	1,35						
			2	200	3,24	29,49							
	Правка шлифованием абразивным кругом		1	200	2,81	11,63	1,09						
			2	200	2,63	12,63							
	Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3		1	200	2,00	10,51	1,03						
			2	200	2,40	10,86							
	АС6 160/125-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	6,84	165,63		1,35		1,64	0,03	1,26
				2	200	7,22	122,47						
ЭЭП 2			1	200	7,77	146,44	1,62						
			2	200	7,66	90,59							
Правка шлифованием абразивным кругом			1	200	3,89	23,59	1,11						
			2	200	4,77	26,20							
Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3			1	200	3,47	105,03	1,06						
			2	200	4,85	99,11							

Гамма-распределение описывает положительные случайные величины. В данном случае такая величина – выступание зерен из связки  $\Delta h$ , которая подставляется в уравнение (1) вместо аргумента  $x$ .

Для определения параметров гамма-распределения по экспериментальным данным воспользуемся следующей методикой.

Вначале определяем оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения исследуемой величины. В качестве таких оценок принимаем выборочное среднее  $\bar{x}$  и выборочную дисперсию  $s^2$ .

Далее определяем параметр  $\beta$  по формуле:

$$\beta = \frac{s^2}{\bar{x}}.$$

Затем находим параметр  $\alpha$ :

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

Параметры гамма-распределения величины выступления зёрен из связки на поверхности кругов 1A1 250×76×15×5 с характеристиками AC6 100/80-4-M2-01 и AC6 160/125-4-M2-01, 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 гамма-распределению выполнена с использованием критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ . Экспериментальные значения  $\chi^2$  найдены по формуле [9]

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

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 (гамма-распределению в нашем случае).

Теоретические значения критерия Пирсона  $\chi^2$  для различных уровней значимости найдены по таблицам [9].

Из таблицы 2 видно, что гипотеза о распределении величины выступления зерен из связки по закону гамма-распределения подтверждается для всех выборок при всех принятых уровнях значимости.

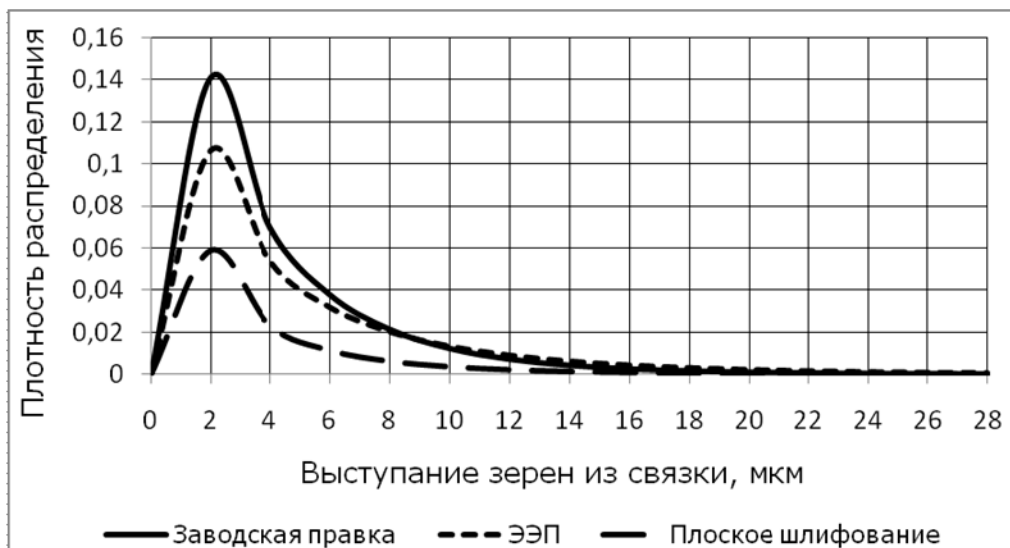
Исследованные распределения величины выступления зёрен из связки на рабочей поверхности алмазных кругов в состоянии поставки (заводская правка шлифованием абразивным кругом), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным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

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

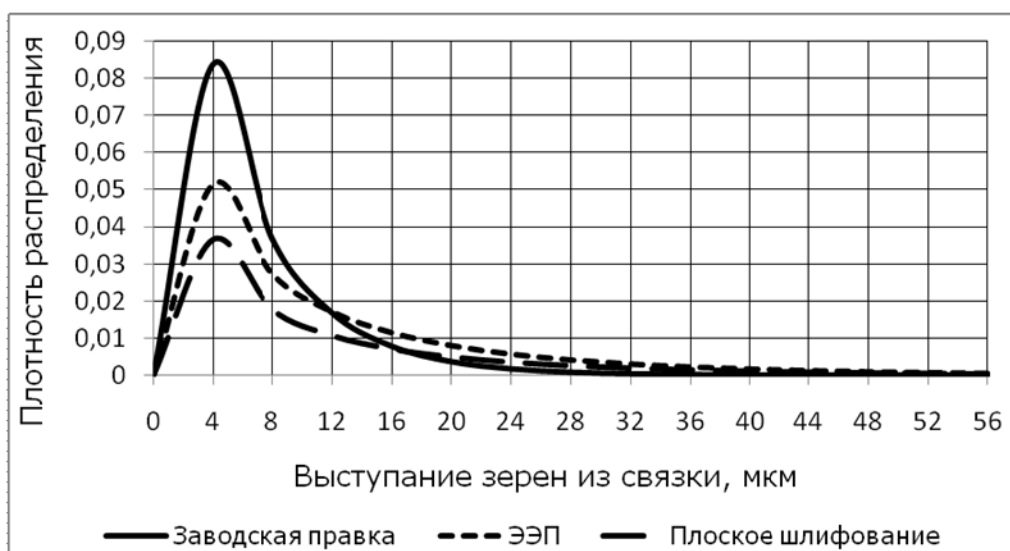
Шлифовальный круг	Способы формирования РПК		Трасса	Параметры гамма-распределения		Критерий согласия Пирсона				
				$\alpha$	$\beta$	$\chi^2_{\text{эсп}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$	Уровень значимости		
АС6 100/80-4-М2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	0,50	7,13	15,42	16,81	0,010	
			ЭЭП 2	2	0,43	6,86	13,32	14,07	0,05	
		Шлифованием абразивным кругом	ЭЭП 1	1	0,40	7,34	23,77	24,74	0,025	
			ЭЭП 2	2	0,36	9,10	11,76	12,59	0,05	
	Плоское алмазное шлифование	ЭЭП 1	1	0,68	4,14	10,58	10,64	0,10		
		ЭЭП 2	2	0,55	4,80	14,04	14,07	0,05		
	Плоское алмазное шлифование	ЭЭП 1	1	0,38	5,26	15,69	16,81	0,010		
		ЭЭП 2	2	0,53	4,53	12,54	12,83	0,025		
	АС6 160/125-4-М2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	0,28	24,21	11,12	12,59	0,05
				ЭЭП 2	2	0,43	16,96	9,27	10,64	0,10
Шлифованием абразивным кругом			ЭЭП 1	1	0,41	18,85	14,76	15,09	0,010	
			ЭЭП 2	2	0,65	11,83	12,77	12,83	0,025	
Плоское алмазное шлифование		ЭЭП 1	1	0,64	6,06	15,03	15,09	0,010		
		ЭЭП 2	2	0,87	5,49	10,69	11,07	0,05		
Плоское алмазное шлифование		ЭЭП 1	1	0,11	30,27	12,05	12,59	0,05		
		ЭЭП 2	2	0,24	20,44	24,72	24,74	0,025		

Построим графики плотности распределений величины выступления зёрен из связки (рис. 1) с использованием параметров гамма-распределения (см. табл. 2).

Рассмотрим, влияет ли способ правки на распределение величины выступления зерен из связки.



а



б

Рис. 1. Плотность гамма-распределения величины выступания зерен из связки на рабочей поверхности кругов AC6 100/80-4-M2-01 (а) и AC6 160/125-4-M2-01 (б), сформированной различными способами

Графики плотности распределений величины выступания зерен из связки (см. рис. 1), построенные с использованием параметров гамма-распределения (см. табл. 2), показывают, что величина выступания зерен из связки на рабочей поверхности кругов зернистостей AC6 100/80 и AC6 160/125 после электроэрозионной правки имеет сходное распределение с величиной выступания зерен из связки после правки шлифованием абразивным кругом в заводских условиях (графики имеют явно выраженную правостороннюю асимметрию, в зоне больших величин наблюдается резкое уменьшение частостей), однако распределения для электроэрозионной правки имеют бóльшие математическое ожидание и дисперсию. Средняя высота выступания зерен из связки (см. табл. 1) после правки электроэрозионным способом превышает аналогичный параметр после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 1,5 раза (в 1,1 – 1,4 раза для круга зернистости AC6 100/80 и в 1,4 – 2,0 раза для круга зернистости AC6

160/125). Выборочная дисперсия распределения величины выступания зерен из связки (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 3,7 раза (в 1,6 – 2,5 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 3,5 – 7,0 раз для круга зернистости АС6 160/125). При этом максимальная высота выступания зерен из связки после электроэрозионной правки превышает аналогичный параметр после правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 2,3 раза (табл. 3).

Таблица 3. Максимальная высота выступания зерен из связки, мкм, на рабочей поверхности кругов 1А1 250×76×15×5 различной зернистости, сформированной различными способами

Способ формирования РПК		Электроэрозионная правка				Правка шлифованием абразивным кругом	
		ЭЭП 1		ЭЭП 2			
Трасса		1	2	1	2	1	2
Шлифовальный круг	АС6 100/80-4-М2-01	29,67	27,37	27,83	29,70	15,45	19,80
	АС6 160/125-4-М2-01	65,32	68,66	55,89	58,88	29,90	19,78

Как видно из приведенных данных (см. табл. 2), максимальная высота выступания зерен из связки после электроэрозионной правки превышает аналогичный параметр после правки шлифованием абразивным кругом в 1,4 – 1,9 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,9 – 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 [6]. Процент вскрытых зерен после электроэрозионной правки составляет 37,5 – 40 %, а после заводской правки шлифованием абразивным кругом — 16 – 18,5 % [6].

### 3. Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Статистические характеристики выборок значений величины выступания зерен из связки, 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 высота выступания зерен из связки и выборочная дисперсия с достаточной полнотой характеризуют всю генеральную совокупность значений величины выступания зерен из связки на РПК.

2. Величина выступания зерен из связки 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 гамма-распределением.

3. Числовые характеристики распределений величины выступания зерен из связки на РПК, сформированные электроэрозионной правкой и правкой шлифованием абразивным кругом, различны. Так, средняя высота выступания зерен из связки после электроэрозионной правки превышает среднюю высоту выступания зерен из связки после правки шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, в 1,5 раза. Выборочная дисперсия после электроэрозионной правки превышает дисперсию после правки шлифованием абразивным кругом в 3,7 раза. Максимальная высота выступания зе-

рен из связки после электроэрозионной правки превышает аналогичный параметр после правки шлифованием абразивным кругом в 2,3 раза. Процент вскрытых зерен после электроэрозионной правки превышает аналогичный параметр после правки шлифованием абразивным кругом в 2,5 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. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с. 2. Baul R.M. Characterization of the working surface of abrasive wheels / R.M. Baul, D. Graham, W. Scott // Tribology. – 1972. – 5. – N. 4. – P. 169-176. 3. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М.Д. Узунян. – Харків: НТУ «ХПГ», 2003. – 359 с. 4. Королев А.В. Прогрессивные процессы правки шлифовальных кругов / А.В. Королев, Р.А. Березняк. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1984. – 112 с. 5. Горленко О.А. Модель рабочей поверхности абразивного инструмента / О.А. Горленко, С.Г. Бишутин // СТИН. – 1999. – № 2. – С. 25-28. 6. 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. 7. 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. 8. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с. 9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНУ ТА ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ ВИСОТИ ВИСТУПАННЯ АЛМАЗНИХ ЗЕРЕН ЗІ ЗВ'ЯЗКИ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА**

*Азарова Н.В. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)*

**Анотація:** Визначені параметри закону розподілу висоти виступання вершин зерен зі зв'язки на робочій поверхні алмазних кругів, яка була сформована різноманітними способами. Встановлено, що висота виступання вершин зерен зі зв'язки може бути описана гама-розподілом

**Ключеві слова:** шліфувальний круг, алмазні зерна, зв'язка

### **DETERMINATION OF PARAMETERS OF DISTRIBUTION LAW OF HEIGHT OF DIAMOND GRAINS ABOVE BIND ON THE WORKING SURFACE OF GRINDING WHEEL**

*Azarova N.V. (DonNTU, Donetsk, Ukraine)*

**Abstract:** The parameters of distribution law of height of grains above bind on diamond wheel working surface, which was formed by different means, are determinate. It is proved that different height of grains characterizes by gamma distribution

**Keywords:** grinding wheel, diamond grains, bind

Надійшла до редколегії 21.05.2011 р.