

## ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923.02

**Е.А. ВОЛЧКОВА,**  
**А.П. ОСИПОВ,** канд. техн. наук,  
**В.В. ФЕДОТОВ,** Сызрань, Россия

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА РЕЖУЩЕ- ДЕФОРМИРУЮЩИХ ЗЕРЕН В ОБЪЕМЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

У статті розглядаються методи визначення кількості абразивних зерен, як експериментальні, так і теоретичні. Вказуються основні недоліки розглянутих методів. Отримана формула, за допомогою якої можна розрахувати кількість різально-деформуючих зерен, які беруть участь у зніманні стружки. Проведено відповідний розрахунок.

В статье рассматриваются методы определения количества абразивных зерен, как экспериментальные, так и теоретические. Указываются основные недостатки рассмотренных методов. Получена формула, при помощи которой можно рассчитать количество режущо-деформирующих зерен, которые участвуют в съеме стружки. Проведен соответствующий расчет.

The article considers the methods of determining the number of abrasive grains, both experimental and theoretical. The basic disadvantages of the considered methods was discussed. A formula for calculating the number of cutting grains was obtained. A model calculation was shown.

Шлифование представляет собой процесс массового микрорезания отдельными зёрнами, вследствие чего производительность инструмента складывается из производительности каждого отдельного зёрна. В свою очередь шероховатость шлифованной поверхности также формируется совокупностью зёрн как режущих, так и давящих [1]. Следовательно, число зёрн, находящихся на рабочей поверхности абразивного инструмента (АИ), определяет в значительной степени

производительность процесса шлифования и качество шлифованной поверхности.

Таким образом, вопрос о наиболее достоверном методе определения количества абразивных зерен на рабочей поверхности АИ является для теории шлифования одним из основополагающих.

Исходя из этого, цель работы заключается в разработке метода определения количества абразивных зерен в объеме абразивного инструмента.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих методов определения количества абразивных зерен;
- 2) разработать метод определения количества абразивных зерен;
- 3) сделать выводы по работе.

Вопрос определения количества зерен в объеме АИ решался многими исследователями [1-16]. Анализ ряда работ позволил установить, что все методы определения количества зерен в АИ можно разделить на экспериментальные и теоретические.

Экспериментальные методы можно разделить на прямые и косвенные. К прямым методам можно отнести микростереофотографию [2] и подсчет числа зерен через микроскоп [3]. Все остальные известные экспериментальные методы являются косвенными и делятся на две группы: запись профиля АИ (профилографирование, топографирование, оптические) [4, 5] и метод отпечатков зерен на поверхности стекла, фольге, по количеству тепловых импульсов, по количеству рисок после прохода зерен и др. [6-9].

Микростереофотограмметрическое исследование заключается в следующем [2]: после правки поверхность шлифовального круга (ШК) фотографируется через бинокулярный микроскоп со специальной фотонасадкой. Для определения масштаба фотоснимков, т.е. общего увеличения с учетом увеличения объектива, окуляра и фотокамеры, при этих же условиях производится фотографирование специальной масштабной линейки. Фотографирование каждого участка производится через правый и левый тубус микроскопа, для чего микроскоп

устанавливается на станке. Дальнейшая обработка снимков производится на прецизионном стереометре.

Данный метод чрезвычайно громоздок, так как для выявления рельефа поверхности требует изготовления большого количества фотоснимков участков поверхности.

Редько С.Г. и Королев А.В. [3] для изучения распределения абразивных зерен (АЗ) на рабочей поверхности (РП) ШК измеряли расстояние между вершинами зерен (в радиальном направлении круга) с помощью микроскопа. На рис. 1 показано взаимное расположение абразивного круга и микроскопа. Горизонтальная нить окулярного микроскопа совмещалась с вершиной зерна, после чего снималось показание. Затем ШК медленно поворачивали до появления вершины следующего зерна, и снова снималось показание и т.д. Так на измеряемом участке круга определялось положение вершин всех последовательно расположенных зерен относительно точки отсчета.

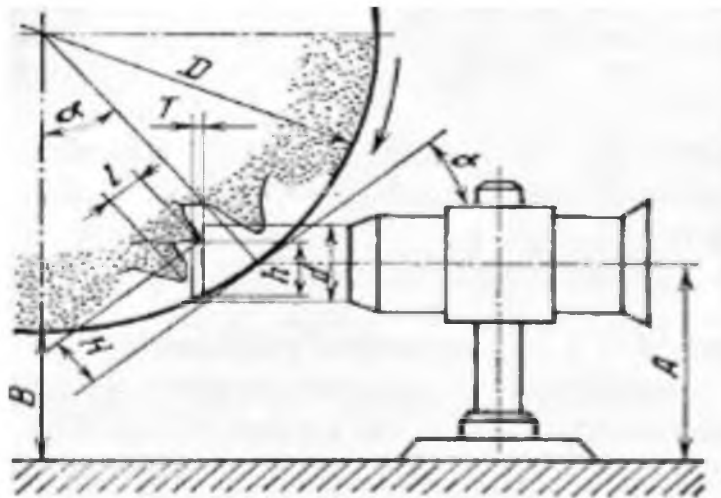


Рисунок 1 – Взаимное расположение круга и микроскопа для определения числа и разновысотности зерен (по Редько С.Г. и Королеву А.В.)

Потенциально активные зерна, находящиеся под связкой, в данном методе не учитываются. В дополнение к этому, бинокулярный микроскоп имеет малые глубины резкости и поле зрения, вмещающее одновременно лишь небольшое количество зерен, как по площади, так и по глубине.

Несмотря на это, рассмотренные методы, на наш взгляд, дают достаточно точные результаты по общему количеству зерен.

Гусев В.В., Рожков Д.Б. [4] записывали профиль алмазного круга на металлической связке с помощью специального устройства. Для определения разновысотности режущих кромок на профилограмме выбиралась наиболее выступающая вершина, по ней проводилась линия нулевого уровня, и измерялось расстояние от нее до каждой режущей кромки. По полученным данным строили гистограммы распределения и в среде Mathcad рассчитывали статистические характеристики.

В работе Прохоровой Е.В. [5] так же использовалось профилографирование для исследования рельефа режущей поверхности алмазных шлифовальных кругов (РПК). Для записи координат РПК с выделением зерна и связки служило устройство, к которому подводилось два провода – один от ШК, другой от ощупывающей иглы. Координаты РПК поступали через согласующее устройство на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), установленный в системном блоке. Начало и конец записи управлялся с монитора. Данные обрабатывались с помощью программы, написанной на языке Delphi5.

Профилографирование отличается своей простотой и большим объемом получаемой информации. Этот метод имеет систематическую погрешность, вызванную тем, что ощупывающий наконечник при своем прямолинейном перемещении не попадает на вершины большинства режущих кромок, а проходит по их боковым сторонам. Учитываются зерна, лежащие на одной линии, и определить их число на единице площади достаточно проблематично. Разновидность данного метода, когда через зону контакта пропускается электрический ток, может быть использован только для алмазных кругов на металлической связке.

В работе [6] количество активных зерен определяется по методу прокатки по фольге, толщина которой должна быть равна глубине резания.

Сущность способа заключается в автоматическом подсчете числа электрических импульсов, возникающих при прокатывании фольги 3 с изолирующим покрытием 4 между РП инструмента 1 и специальным роликом 2. Фольга и пластина 5 ролика подключается к источнику тока. В момент прохождения вершиной зерна зоны контакта ролика с кругом, оно,

вдавливаясь в материал фольги, разрывает изолирующую пленку и замыкает электрическую цепь, в момент выхода вершины зерна из зоны контакта электрическая цепь разрывается. Новый электрический импульс возникает при прохождении зоны контакта следующим АЗ. Электрические импульсы регистрируются счетчиком импульсов.

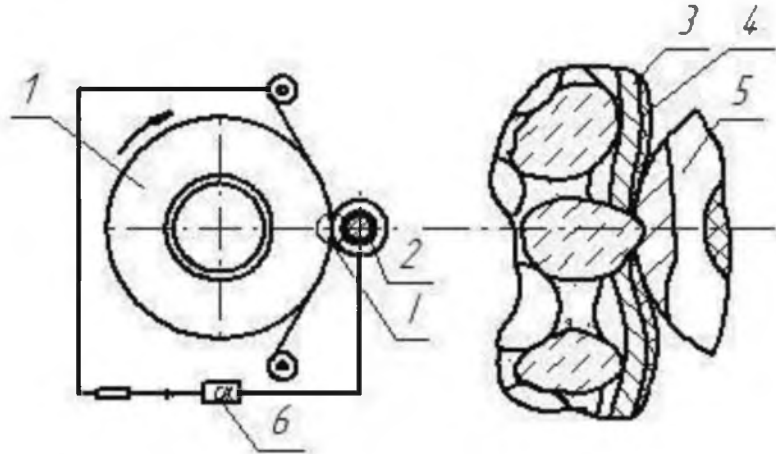


Рисунок 2 – Схема экспресс-метода определения числа зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента [6]

Число АЗ на единицу поверхности подсчитывается как отношение числа зафиксированных импульсов  $m_{им}$  за время  $\tau$  к площади участка сканирования:

$$n_{\partial} = \frac{m_{им}}{H_p \cdot V_k \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $H_p$  – толщина регистрирующей пластины ролика.

$V_k$  – скорость круга.

Точность определения числа АЗ по методу прокатки по фольге зависит от возможности наложения отдельных электрических импульсов и обеспечивается за счет выбора конструктивных параметров регистрирующей пластины ролика.

Второй метод совмещения проекций зерен, названный «методом шлифования лысок», заключается в том, что на зеркально доведенном цилиндрическом образце сошлифовывается риска. Линия пересечения

поверхностей риски и образца очерчивает неровности круга, которые и изучаются в отраженном и увеличенном виде [2].

При определении микропрофиля круга путем шлифования риски могут быть отражены только неровности круга, получающиеся в результате его перекрестной правки алмазом. К тому же, решить, через сколько оборотов следует остановить ШК, точно невозможно. Более того, при данном методе некоторые зерна попадают в лунки, которые были образованы предыдущими зернами.

Метод царапания исследуемым кругом поверхности клина с малым углом подъема можно использовать для изучения формы, количества и характера распределения вершин (рис. 3) [7].

Исследуемый круг (ролик) устанавливается на шпиндель продольно-шлифовального станка, приводится во вращение и врезается плоский клин (рис. 3). Зерна ролика, расположенные в рабочем поверхностном слое (РПС), придут в соприкосновение с клином в разных точках в соответствии с разницей высот взаимного расположения. При отношении сторон клина, например 1:250, 1 мм продольного смещения соответствует разнице высот зерен в 4 мкм. Измеряя смещение царапин на клине с точностью 0,2 мм, удастся разделить зерна с разницей высот 0,8-1 мкм. Точность повысится, если обработку царапин производить по фотоснимку с увеличением в 4-5 раз.

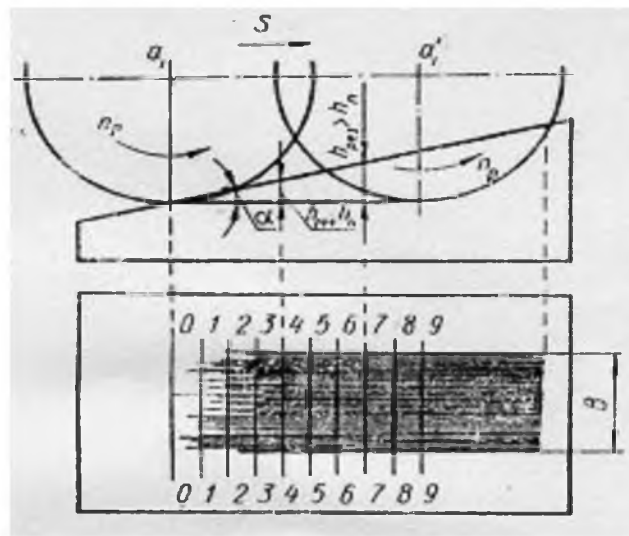


Рисунок 3 – Схема царапания клина роликом [8]

Данный метод учитывает такие обстоятельства, что режущие зерна (РЗ) не могут быть распределены с помощью статической модели круга не только из-за кинематического перекрытия их друг другом, но и из-за того, что число утраченных в динамике процесса зерен заранее не известно.

Редько С.Г. [8] подсчитывал тепловые импульсы по осциллограммам, полученные при шлифовании термодпар малого диаметра. Круг испытывал динамические нагрузки и деформировался. Связанное с его деформацией изменение количества работающих зерен за время перемещения термодпары в зоне резания легко улавливается осциллографом. По полученной осциллограмме определяется число импульсов, равное числу встреч термодпары с абразивными зернами, интенсивность каждого импульса. Тепловые импульсы на ширине обрабатываемой поверхности, равной ширине термодпары, фиксируют действие всех зерен, участвующих в работе.

Недостатком данного метода является то, что зарегистрированные импульсы отражают количество зерен при конкретных режимах резания, причем без разделения зерен на режущие и давящие. При данном методе тепловой импульс от трения со связкой так же фиксируется, что значительно увеличивает погрешность.

В общем случае, при косвенных методах регистрируются не сами зерна, а только следы их взаимодействия с образцом, следовательно, данные методы не дают достаточно точного определения количества зерен.

В результате анализа установлено, что вышеприведенные методы позволяют оценить количество зерен с достаточно большой погрешностью, о чем свидетельствуют данные табл.1 [9].

Экспериментальные исследования дают разброс значений от 0,420 до 14 зерен на  $1 \text{ мм}^2$  при одной зернистости, что объясняется указанными недостатками.

Большинство экспериментальных методов могут быть использованы для инструментов, у которых химический состав зерен и связки различен и количество слоев абразивных зерен на инструменте невелико. Но в основном при обработке стальных и чугунных изделий используется многослойный абразивный инструмент на керамической или иной твердой связке. Для проведения экспериментов необходимы специальные

устройства и приспособления, приобретение или изготовление которых требует значительных материальных и временных затрат. В дополнение к сказанному, экспериментальные модели верны только для тех условий, в которых проводился эксперимент, и имеют ограниченную возможность переноса на другие модели при иных входных параметрах.

Таблица 1 – Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований разных авторов

Автор	Номер зернистости	Количество зерен, 1/мм <sup>2</sup>
Алексеев В.И.		14,0
Волский Н.М.		6,3
Дьяченко П.Е.		8,9
Зубарев Ю.М		1,8... 8,9
Оробинский В.М.		6,8
Маслов Е.Н.		10,5
Резников А.Н.		4,3
Рязанов Ф.А.		9,9
Ипполитов Г.М		9,9
	16	23,4
	25	9,9
	40	5,3
Редько С.Г.		8,0
	16	1,223
	25	0,863
	40	0,429
Филимонов Л.Н.		7,1... 8,9
	16	1,7
	25	1,35
	40	0,36
Бишутин С.Г	16	0,881
	25	0,420
	40	0,225
Якимов А.В.	Весовые части связка/абразив	
	100/450	14,2
	100/550	14,97
	100/900	16,0
	100/1100	17,97



В отличие от экспериментальных методов теоретически количество зерен определяют либо через структуру АИ, либо через плотность абразивного материала (АМ).

Резников А.Н. [10] определяет общее номинальное количество алмазных зерен, располагающихся на 1 мм<sup>2</sup> РП по следующей формуле (1):

$$n n_0 \approx \frac{K}{65x_n^2}, \quad (2)$$

где  $x_n$  – номинальный, паспортный размер зерна.

$K$  - концентрация алмазов в круге.

Таблица 2 – Характеристика рельефа рабочих поверхностей шлифовальных кругов

Круг	h, мкм	N, шт/мм	Nt шт, на уровнях, мкм			
			10	20	30	40
40 СМ1	330/300	3,2/3,5	0,53/0,49	0,85/0,78	1,10/1,05	1,30/1,27
25 СМ1	250/225	5,7/5,2	1,2/0,52	2,24/1,05	2,60/1,55	3,00/2,04
16 СМ1	170/145	6,5/5,7	1,68/0,60	2,70/1,20	3,46/1,77	4,00/2,30
25 СТ1	220/210	6,7/4,5	2,16/0,80	3,10/1,32	3,50/1,73	3,94/2,05
25 С1	230/210	6,0/5,5	1,55/1,03	2,25/1,65	2,75/2,14	3,16/2,54
25 М3	260/260	4,7/4,3	1,45/0,22	2,10/0,52	2,54/0,85	2,85/1,20

Примечание: В числителе круг после правки, в знаменателе – после шлифования

В связи с неизбежной потерей зерен из-за шлифования и правки фактическое количество зерен на поверхности круга будет меньше номинального  $n_0$ .

Филимонов Л.Н., Степаненко В.Г., Приймак Ю.П. [11] для определения режущих кромок абразивных зерен на определенном уровне  $t$  (при заданной глубине шлифования) пользовались интегральной функцией распределения, которую можно заменить суммой

$$N_i = NA \sum_{x=0}^{x=t} t^{1-\nu} (1-t)^{1-\eta} \Delta t, \quad (3)$$

где  $N$  – полное количество режущих кромок, приходящихся на 1 мм длины профиля.

В работе [11] приведены рассчитанные по формуле (3) значения  $N_i$  для различных уровней.

Из этих данных хорошо видно влияние зернистости и твердости кругов, а также их износа во время шлифования на количество активных режущих кромок.

Козлов А.М. [9] разделяет АЗ на РП инструмента на режуще-деформирующие и просто деформирующие. Процентное содержание РЗ принимает равным отношению количества зерен с ненулевой режущей площадью передней поверхности к общему количеству рабочих зерен  $N$

$$N_{реж} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_p[k3]>0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\%, \quad (4)$$

где индекс у единиц обозначают, что суммирование выполняется только при соответствующих условиях.

Количество деформирующих зерен

$$N_{деф} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_d[k3]>0 \text{ и } S_p=0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\%. \quad (5)$$

Опуская промежуточные преобразования, получает, что количество АЗ в единице объема абразивосодержащего материала будет вычисляться так:

$$Z = \frac{V_0 k}{100 \sum_{y=1}^{2b} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)} \quad (6)$$

где  $V_0$  – единичный объем рабочего слоя АИ;

$k$  – объемная концентрация абразивного материала (в процентах);

$a, b$  – полуоси эллипсоида вращения.

В работе [12] для расчетов автор принимает допущение, что форма АЗ имеет вид шара. Равномерность распределения зерен достигается в соответствии со схемой (рис.4)

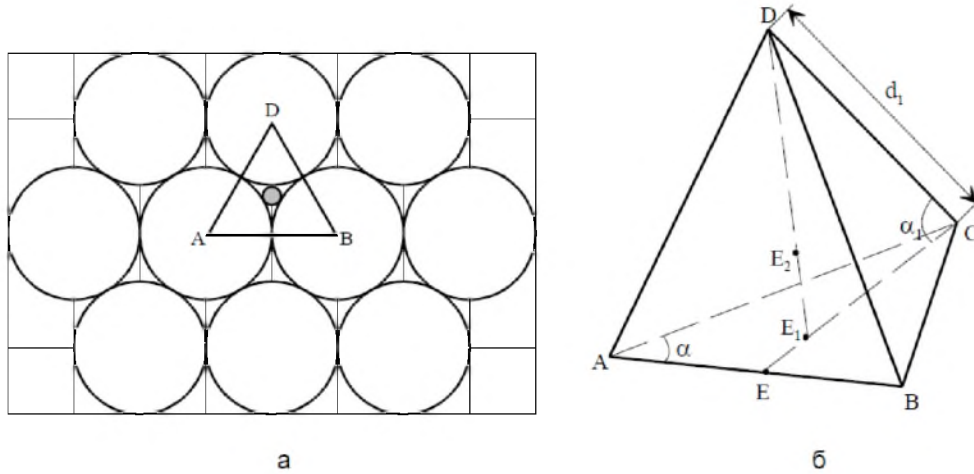


Рисунок 4 – Схема максимальной упаковки зерен-шаров:  
 а – общая структура упаковки;  
 б – блок-схема четырех зерен-шаров; А, Б, С и D – центры шаров

В такой схеме на 100% реализуется возможность контактов поверхностей зерен-шаров. При этом один шар контактирует с 14 другими, на поверхности – с 9. Автор взял блок четырех зерен, каждый из которых контактирует с тремя остальными. Из таких блоков, связанных между собой, состоит структура материала инструмента. Автор связал центры этих четырех зерен и получил равностороннюю пирамиду (рис. 4, б).

Количество зерен в объеме АИ описывает зависимостью:

$$n_1 = \frac{V_0}{d_1^3 \sin \alpha_1} \quad (7)$$

Калинин Е.П. в своей статье [13] рассматривает зерна в виде материальных точек, расположенных по вершинам различного типа многогранников: куба, прямых правильных трехгранных призм, наклонных трехгранных призм и тетраэдров. В работе определялась закономерность расположения абразивных зерен в объеме режущего слоя и на рабочей поверхности инструмента в предположении, что зерна

распределены равномерно по всему режущему слою с одинаковыми фактическими расстояниями.

По мнению автора, зерна распределяются в структуре круга, только согласно одной из приведенных схем (рис. 5):

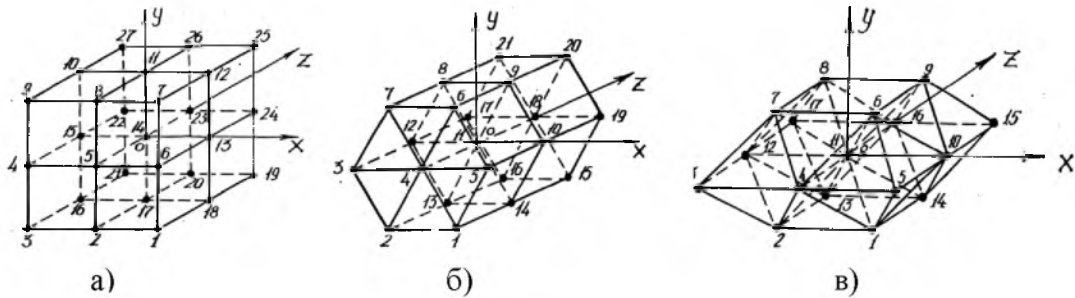


Рисунок 5 – Схемы расположения абразивных зерен в пространственной решетке

- а) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной кубами; б) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной прямыми правильными трехгранными призмами; в) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной наклонными трехгранными призмами

Существует еще четвертая схема – расположение абразивных зерен в пространственной решетке, образованной тетраэдрами.

В одном кубическом мм содержится абразивных зерен:

$$(схема 1) \quad n_1 = 1/V_{\text{зерна1}} = 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (8)$$

$$(схема 2) \quad n_2 = 1/V_{\text{зерна2}} = 1/(0,87l_{\phi}^3) = 1,16 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (9)$$

$$(схема 3) \quad n_3 = 1/V_{\text{зерна3}} = 1/(0,71l_{\phi}^3) = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (10)$$

$$(тетраэдральная решетка) \quad n_4 = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (11)$$

Ипполитов Г.М. [14] определял число зерен путем вычисления их в единице веса и далее в единице объема. Фактическое определение содержания зерен в единице веса, классифицированных в соответствии с нормами ГОСТа 3647-59 точностью 10%, показало, что в 1 г содержится следующее число зерен электрокорунда и карбида кремния.

Таблица 3 – Количество зерен в 1 г

Зернистость №	125	100	80	50	40	25	16
Число зерен в 1 г в шт. $Al_2O_3$	150	230	700	2300	6700	19500	75000
Число зерен в 1 г в шт. $SiC$	200	350	1000	3000	7300	23000	90000

При моделировании внутренней структуры АИ зернами, расположенными в узлах различных кристаллических решеток [13,14] учитывается их объемное распределение, что более целостно отражает реальную картину в отличие от работ [9-11], в которых зерна располагаются на плоскости.

При математическом моделировании варьировать различными параметрами удобнее, это не требует значительных материальных затрат. Данные методы должны давать достаточно точные результаты, поскольку исключено влияние внешних факторов. Но согласно данным [11] наблюдается расхождение в значениях, полученных теоретическим путем. Вводимые различные предположения и допущения авторами снижает точность теоретических методов. Основным минусом рассмотренных работ является то, что в большинстве случаев не раскрыт алгоритм перехода от внутренней структуры к РП АИ.

С нашей точки зрения, необходимо использовать математические модели для определения количества зерен, а экспериментальные методы необходимы для подтверждения полученных теоретических значений.

Наибольшее распространение получили методы на основе моделирования внутренней структуры АИ [12,13 и др.]. Нашими исследованиями [15] была установлена возможность моделирования внутренней структуры АИ кристаллическими решетками, в узлах которых расположены АЗ. При моделировании использовались следующие решетки: прямоугольная кубическая; решетка, состоящая из прямых правильных трехгранных призм с основанием в виде равностороннего треугольника; наклонными трехгранными призмами, которые образованы комбинацией из октаэдров (правильных восьмигранников) и тетраэдров (правильных четырехгранников).

Установлено, что область существования той или иной структурной решетки в объеме инструмента соответствует объемной доле АЗ:

при распределении зерен в вершинах кубической решетки:

$$C_1 \leq 0,52,$$

в вершинах параллелепипеда:

$$C_1 \leq 0,60,$$

на базе комбинации из тетраэдров:

$$C_1 \leq 0,89$$

Полученные зависимости позволяют четко представить область существования рассмотренных решеток во внутренней структуре АИ. Зерна располагаются в вершинах кубической решетки у кругов с номером структуры с 15 по 5. При нулевом номере структуры возможен единственный вариант расположения зерен в круге – в вершинах тетраэдра. Для круга с номером структуры 1 зерна располагаются в узлах тетраэдральной и ромбической решеток. При номере структуры с 4-ой по 2-ую имеют место быть тетраэдральная, ромбическая решетки и в виде параллелепипеда с соответствующими углами между его сторонами. Более плотную внутреннюю структуру можно получить комбинацией двух взаимосмещенных кубических решеток с различными размерами АЗ. Таким образом, однозначно утверждать, какая именно решетка будет соответствовать определенной структуре круга, невозможно.

Поскольку технология размола слитков электрокорунда и карборунда, а так же технология последующего отсева, стандартизована, то можно предположить, что при прочих равных условиях в одном и том же объеме инструмента, независимо от вида материала, содержится одинаковое количество абразивных зерен. Таким образом, на наш взгляд, более правильно определять количество зерен из расчета в единице объема или в единице массы. Соответствующие расчеты, как было показано выше, провел Ипполитов Г.М., однако, в его работе не указано, как были получены численные значения: рассчитаны по математическим зависимостям или определены экспериментально.

Для разрешения сложившегося противоречия в Сызранском филиале СамГТУ были проведены исследования по определению количества зерен в единице массы. Эксперименты проводились на некоторых зернистостях.

Анализ результатов показал, что количество зерен в единице массы можно посчитать ориентировочно, принимая, что зерно является геометрическим телом, форма которого находится между сферой (наибольший объем при наименьшей площади поверхности) и кубом (100% заполнение объема). Если предположить, что объем такого зерна равен среднему из объемов сферы с диаметром  $d_0$  и куба со стороной  $d_0$ , то количество зерен в навеске массой  $m_3$  будет определяться формулой:

$$n_0 \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{m_3}{d_0^3 \cdot \rho_3}, \quad (12)$$

где диаметр зерна рассчитывался по формуле Маслова Е.Н. [16] –

$$d_0 = 10,6 \cdot N_3 \cdot 10^{-3} \text{ мм};$$

$\rho_3$  – плотность абразивного материала.

В табл. 4 представлены данные Иполитова Г.М и экспериментальные данные в сравнении со средними, рассчитанными по формуле (12).

Таблица 4 – Сравнительный расчет среднего количества абразивных зерен

Зернистость $N_3$	Кол-во зерен в 1 г $\rho_m$ , шт/г					
	Расчетное среднее		По данным Г.М. Иполитова		Экспериментальные данные	
	$Al_2O_3$	SiC	$Al_2O_3$	SiC	$Al_2O_3$	SiC
16	75504	93200	75000	90000		90856
25	19793	24432	19500	23000		24525
40	4832	5965	6700	7300	4524	5480
50	2474	3050	2300	3000		2960
80	604	746	700	1000	524	
100	309	382	230	350	337	
125	158	195	150	200	157	

Анализ данных таблицы показывает хорошую сходимость расчетных данных. Погрешность экспериментальных значений с данными Иполитова Г.М. составляет не более 7%. Расхождение расчетных данных

с экспериментальными 4,6%. Данные Иполлитова Г.М., выделенные в таблице, видимо, являются неточными, поскольку сильно выбиваются из рассматриваемого ряда (отличаются на 10-40%).

Поскольку погрешность расчета по формуле (12) невелика, то ее можно использовать для теоретического определения количества зерен. Заметим, что на точность расчета не повлиял переход на новый ГОСТ Р 52588-2006 «Инструмент абразивный» [17].

Число зерен, которое находится во всем объеме АИ, не представляет значительного интереса по сравнению с количеством зерен в объеме РПС в зоне контакта. Примем, что ПС – это слой толщиной равной средневероятному размеру зерна  $d_0$ . Число зерен в данном объеме можно определить по формуле (13)

$$n_{ПС} = S \cdot d_0 \cdot c_1 \cdot \rho_3 \cdot \rho_m, \quad (13)$$

где  $S$  – площадь зоны контакта АИ и обрабатываемой поверхности;

Для выявления закономерностей по влиянию структуры и зернистости АИ на число зерен в объеме ПС, по формуле (13) был проведен расчет количества АЗ на РП ШК из электрокорундовых и карборундовых абразивных материалов различных зернистостей с различными номерами структур.

График изменения количества зерен в объеме РПС от структуры АИ для различных зернистостей электрокорунда 14 и карборунда 63С представлен на рис. 6.

Из графика видно, что количество зерен в объеме РПС прямопропорционально номеру структуры и количество зерен не зависит от АМ. Следует заметить, что данный вывод справедлив для материалов электрокорундовой и карборундовой групп.

По известному количеству зерен  $n_{ПС}$  в объеме рабочего поверхностного слоя (13), можно рассчитать количество зерен в слое толщиной  $y$ , если предположить, что они расположены равномерно по глубине РПС.

$$n_y = \frac{y}{d_0} \cdot n_{ПС} \quad (14)$$

где  $y$  – глубина исследования, измеренная по радиусу вглубь АИ.



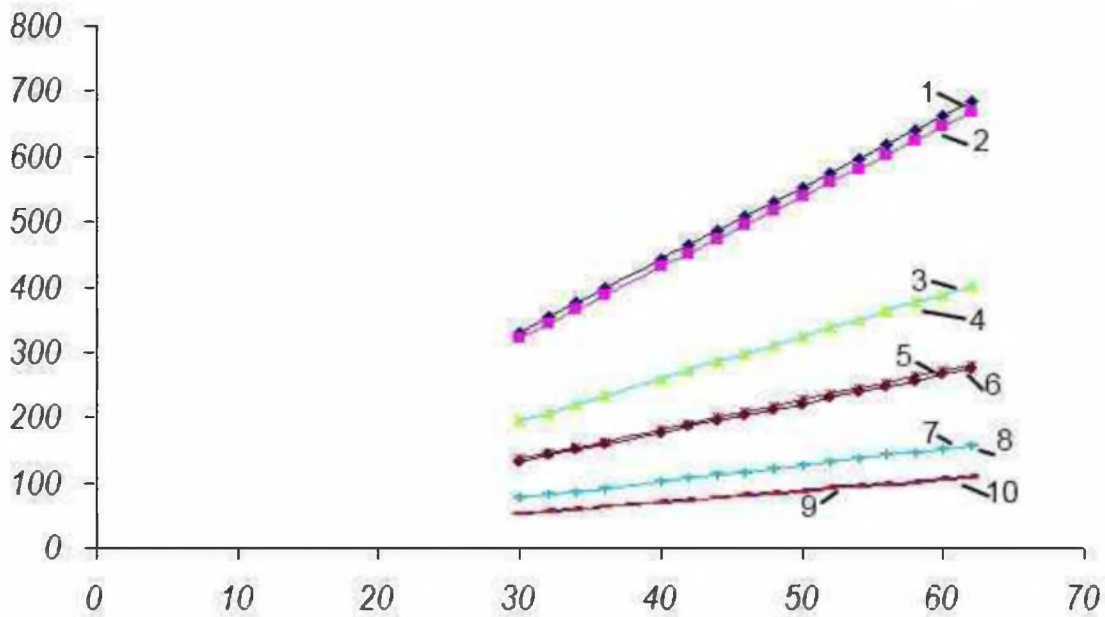


Рисунок 6 – График зависимости количества зерен в объеме поверхностного слоя от номера структуры для различных зернистостей электрокорунда 14А и карборунда 63С  
 1 - 16 зернистость 14А; 2 - 16 зернистость 63С; 3 - 20 зернистость 14А;  
 4 - 20 зернистость 63С; 5 - 25 зернистость 14А; 6 - 25 зернистость 63С;  
 7 - 32 зернистость 14А; 8 - 32 зернистость 63С; 9 - 40 зернистость 14А;  
 10 - 40 зернистость 63С.

В Сызранском филиале СамГТУ были проведены опыты по определению процента режуще-деформирующих зерен в зависимости от глубины внедрения АЗ по методике, представленной в работе [18]. Данные, представленные на графиках (рис.7), даны для материала Сталь 45.

Зная количество зерен в слое высотой  $y$  (14) и с учетом данных по процентному содержанию режуще-деформирующих зерен в этом слое (рис.7) можно определить, сколько режуще-деформирующих зерен участвует в съеме стружки.

$$n_{y_{\text{рез}}} = n_y \cdot C1_{\text{рез}} \quad (15)$$

Определив данное значение для ШК с номером структуры  $N_{\text{стр}}=0$ , через коэффициент пропорциональности  $k_{\text{стр}}$  можно посчитать количество режуще-деформирующих зерен для ШК с другой структурой.

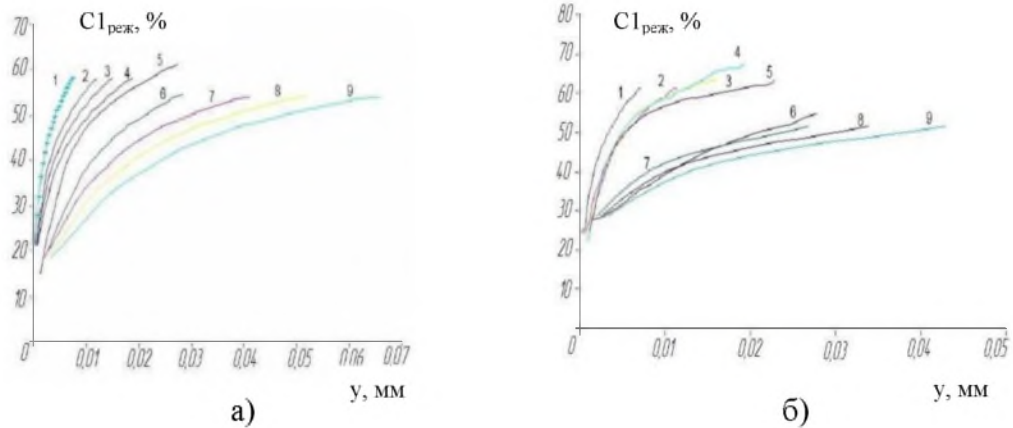


Рисунок 7 – Доля режуще-деформируюших зерен в слое у  
а – электрокорунд (14А), б – карборунд (63С)

1 – 10 зернистость; 2 – 16 зернистость; 3 – 20 зернистость;  
4 – 25 зернистость; 5 – 32 зернистость; 6 – 40 зернистость;  
7 – 50 зернистость; 8 – 63 зернистость; 9 – 80 зернистость

Проведем расчет количества режуще-деформируюших зерен на рабочей поверхности ШК 125×16×32 14А 25-Н СМ2 7 К производящим обработку Стали 45 со скоростью  $v=40$  м/с, подачей  $s_{np}=0,5$  м/мин и глубиной  $t=15$  мкм. Распределение вершин абразивных зерен по высоте равномерное.

1) длина дуги контакта  $l_k$  равна:

$$l_k = R \cdot \arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right) \quad (13)$$

$$l_k = 62,5 \cdot \arccos\left(1 - \frac{0,015}{62,5}\right) = 1,369 \text{ мм}$$

2) найдем площадь зоны контакта  $S_k$ :

$$S_k = l_k \cdot B \quad (14)$$

где  $B$  – ширина круга.

$$S_k = 1,369 \cdot 16 = 21,909 \text{ мм}^2$$

3) Объем поверхностного слоя  $V$  толщиной, равный диаметру зерна:

$$V = S_k \cdot d_0 \quad (15)$$

где средний диаметр зерна  $d_0 = 265 \cdot 10^{-3}$  мм (зернистость  $N_3=25$ ).

$$V = 21,909 \cdot 0,265 = 5,806 \text{ мм}^3$$

4) количество зерен для заданного объема в зоне контакта равно:

$$n_{\text{ПС}} = V \cdot C_1 \cdot \rho_3 \cdot n_0, \quad (16)$$

где  $C_1$  – процентное содержание зерен в круге,  $C_1 = 48\%$ ;

$$n_0 = 19793 \text{ шт}$$

$$\rho_3 = 3,95 \text{ г/см}^3$$

получаем:

$$n_{\text{ПС}} = 5,806 \cdot 0,48 \cdot 3,95 \cdot 10^{-3} \cdot 19793 \approx 218 \text{ шт}$$

5) глубина внедрения одного зерна:

$$a_z = s_{\text{нр}} \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right)}{v} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot R}{2}} \quad (17)$$

$$a_z = 0,5 \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{0,015}{62,5}\right)}{40} \cdot \sqrt{\frac{0,015 \cdot 62,5}{2}} = 3,125 \cdot 10^{-9} \text{ мм}$$

б) количество зерен в слое толщиной равной глубине внедрения максимально выступающего зерна  $3,125 \cdot 10^{-9}$  мм:

$$\frac{3,125 \cdot 10^{-9}}{0,265} = \frac{n_y}{218} \rightarrow n_y \approx 2,750 \cdot 10^{-6} \text{ шт}$$

7) количество режуще-деформирующих зерен при обработке с заданной глубиной и кругом с номером структуры  $N_{\text{стр}}=7$ :

$$n_{y_{\text{резж}}} = n_y \cdot C1_{\text{резж}} \cdot k_{\text{стр}} \quad (18)$$

$C1_{\text{резж}}$  – определим по графику (рис.7) для электрокорунда 14А.

$k_{\text{стр}}$  – возьмем из таблицы 5.

$$n_{y_{\text{резж}}} = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,488535 \cdot 0,77419 = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ шт}$$

Таким образом, количество режуще-деформирующих зерен зависит от многих факторов: марки абразивного материала и его зернистости, номера структуры шлифовального круга и физико-механических свойств материала, режимных параметров.

Из расчетов видно, что при заглублинии на величину  $a_z$ , рассчитанную по формуле (17), учитывающую кинематику процесса шлифования, РЗ практически отсутствуют. В этом случае снимаемый объем ничтожно мал, и следующим абразивным зернам приходится внедряться на большую глубину. При достижении некоторой глубины

внедрения  $a_{z_0}$ , при которой процесс срезания припуска стабилизируется, объем внедрившихся режущих кромок сравнивается с объемом материала, находящегося на обрабатываемой поверхности в слое толщиной  $a_{z_0}$ , а затем и превышает его. Процесс снятия припуска стабилизируется.

$$a_{z_0} = k \cdot a_z \quad (19)$$

где  $k$  – коэффициент превышения расчетной глубины внедрения АЗ  $a_z$  к моменту стабилизации процесса съема припуска;

$a_{z_0}$  – глубина внедрения, с которой вынуждены работать наиболее выступающие АЗ.

Таблица 5 – Значение коэффициента  $k_{стр}$

$N_{стр}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	32	30
$k_{стр}$	1,0	0,96774	0,93548	0,9333	0,87097	0,83871	0,80645	0,77419	0,74194	0,70968	0,67742	0,64516	0,61290	0,58065	0,54839	0,51613	0,48387

Основываясь на проделанной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ экспериментальных методов определения количества абразивных зерен на РП АИ показал большой разброс полученных значений, у различных авторов от 0,420 до 14,0 зерен на  $1 \text{ мм}^2$ , что объясняется различием методик и условий проведения опытов. Определиться с наиболее достоверным методом затруднительно.

2. При моделировании структуры абразивного инструмента различными типами кристаллических решеток, однозначно утверждать, какая именно решетка будет соответствовать определенной структуре круга невозможно.

3. Разработан теоретико-экспериментальный метод расчета количества абразивных зерен в РПС АИ заданной толщины, который учитывает влияние марки и зернистости абразивного материала, структуры шлифовального круга, физико-механических свойств материала, режимных параметров.

4. Расчеты по разработанной методике показали, что количество режуще-деформирующих зерен в слое толщиной, который определяется кинематикой процесса, весьма мало и недостаточно для съема всего припуска. Для обеспечения производительности абразивные зерна должны внедряться на значительно большую глубину. Это предположение необходимо проверить в дальнейших исследованиях.

**Список использованных источников:** 1. *Попов С.А.* Заточка режущего инструмента. Учеб. пособие для проф.-тех училищ – М.: Высш. школа, 1970. – 320 с. 2. *Сильвестров В.Д.* Безалмазная правка шлифовальных кругов – М.: Оборонгиз, 1955. – 128с. 3. *Редько С.Г., Королев А.В.* Расположение абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. – Станки и инструмент, 1970, № 5.- с. 40-41. 4. *Гусев В.В., Рожков Д.Б.* Определение параметров рабочей поверхности алмазного круга при профилографировании// Современные металлорежущие системы машиностроения. Материалы 2-й Всеукраинской студенческой конференции. – Донецк 2-5 апреля 2001 г. Донецк: ДонГТУ, 2001. – с. 31-34. URL: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/mech/rogkov/publ/art2/index.htm> (дата обращения: 26.04.2013). 5. *Прохорова Е.В.* Тема магистерской работы: "Совершенствование способа исследования параметров рабочей поверхности алмазных кругов методом профилографирования" URL:<http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/mech/prokhorova/diss/index.htm> (дата обращения: 26.04.2013). 6. *Nakayama Karuo.* Taper print method for the measurement of grinding wheel surface. «Bull. Jap. Soc. Prices. Eng., 1973, 7, №2. – с. 59-60. 7. *Байкалов А.К., Сукенник И.Л.* Алмазный правящий инструмент на гальванической связке. – Киев: Наукова думка, 1976. – 202 с. 8. *Редько С.Г.* Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании. – Станки и инструменты, 1960, №12. – с. 10-12. 9. *Козлов А.М.* Определение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента на основе моделирования. 10. *Резников А.Н.* Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. М., «Машиностроение», 1977. 391 с. с ил. 11. *Филимонов Л.Н., Степаненко В.Г., Приймак Ю.П.* Статистический анализ распределения режущих кромок по рабочей поверхности шлифовального круга. – Абразивы, 1976, № 10, с. 10-13. 12. *Багайско, Ю.С.* Формирование пористой структуры абразивных инструментов / Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер // Вестник СГТУ. – 2007.– Т. 1. – №2.– С. 31–37. 13. *Калинин, Е.П.* Анализ схемы расположения абразивных зёрен в объёме шлифовального круга / Е.П. Калинин, М.А. Шашков // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №6. – С. 136–140. 14. *Иттолитов Г.М.* Абразивно-алмазная обработка. М., «Машиностроение», 1969, стр. 334. 15. *Волчкова Е.А., Оситов А.П.* MATERIALS OF THE III INTERNATIONAL RESEARCH AND PRACTICE CONFERENCE European Science and Technology Vol. I October 30th-31st, 2012 Munich, Germany 2012. 16. *Маслов Е.Н.* Основы теории шлифования металлов. – М.: Машгиз, 1951, 177 с. 17. ГОСТ 52588-2006 Инструмент абразивный. 18. *Оситов А.П., Федотов В.В.* Методика экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен. – Известия вузов. Машиностроение.– М: МВТУ им. Баумана, 2012, № 11, с. 69-73.