

УДК 621.891

**М. Н. Сафонова**, ст. преп.<sup>1</sup>; **А. С. Сыромятникова**, канд. физ.-мат. наук<sup>2</sup>;  
**Е.Ю. Шиц**, канд. техн. наук<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Якутский госуниверситет им. М. К. Амосова, г. Якутск, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия*

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА АКТИВНЫХ ЗЕРЕН В АБРАЗИВНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ**

*A calculation-experimental methods for evaluation of active abrasive grain number with statistically uniform distribution in composition material was developed. The method was used to study the change of active grains concentration of natural and synthetical diamond grinding powders with various dispersions in PTFE-based composite under friction and wear.*

### **Введение**

Работоспособность абразивных инструментов определяется их износостойкостью, эффективностью работы, качеством обработанной поверхности и характеризуется такими основными эксплуатационными параметрами, как удельный расход абразива, производительность и шероховатость обработанной поверхности [1]. Производительность шлифования и качество обработки существенно зависят от стабильности режущих свойств инструмента, т.е. стабильности количества активных АЗ в процессе его эксплуатации. Поэтому при разработке композиционных материалов абразивного назначения особенно важным является определение изменения количества активных АЗ при трении и изнашивании.

Разработанные ранее методы расчета дают возможность вычислять исходную объемную концентрацию АЗ в связке, однако не позволяют определить ее изменение в процессе работы инструмента [2–4].

Целью работы является разработка и реализация расчетно-экспериментального метода, основанного на данных микроскопического анализа приповерхностного слоя композиционного материала для определения количества активных АЗ.

### **Основы метода**

При разработке метода исходили из предположений, что абразивные зерна – совокупность частиц произвольной формы и различной дисперсности, распределенные в объеме материала статистически равномерно со случайной пространственной ориентацией.

При таких предположениях необходимыми этапами реализации метода являются:

Этап 1. Выбор геометрической модели АЗ.

Этап 2. Расчет количества активных АЗ в композиционном материале.

Этап 3. Проверка достоверности результатов.

### **Объекты исследования**

В качестве абразивного материала использовались шлифпорошки из технических синтетических и природных алмазов (по три разновидности) различных зернистостей. Шлифпорошки изначально принимались за «безымянные» (марка, зернистость, стандарт, по которому велась их классификация, считались неизвестными), и им присваивались буквенно-цифровые обозначения: *С* или *П* (шлифпорошки из синтетических/природных алмазов), цифры *I, II, III* (номера в порядке возрастания зернистости). В качестве основы композиционного материала был выбран ПТФЭ – полимер, который обладает необходимыми свойствами, предъявляемыми к связке алмазно-абразивного инструмента [5]. Образцы для испытаний изготавливались из композиций с 40 % (по массе) содержанием алмазного порошка по технологии холодного прессования при давлении 50 МПа с последующим свободным спеканием при температуре  $375 \pm 5$  °С. Трение и изнашивание осуществлялось в течение 300 с на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск по диску» при нагрузке 50 Н и относительной скорости скольжения 1–3 м/с.

### **Разработка и реализация метода**

Алгоритм метода определения содержания АЗ в композиционном материале приведен на рис. 1.

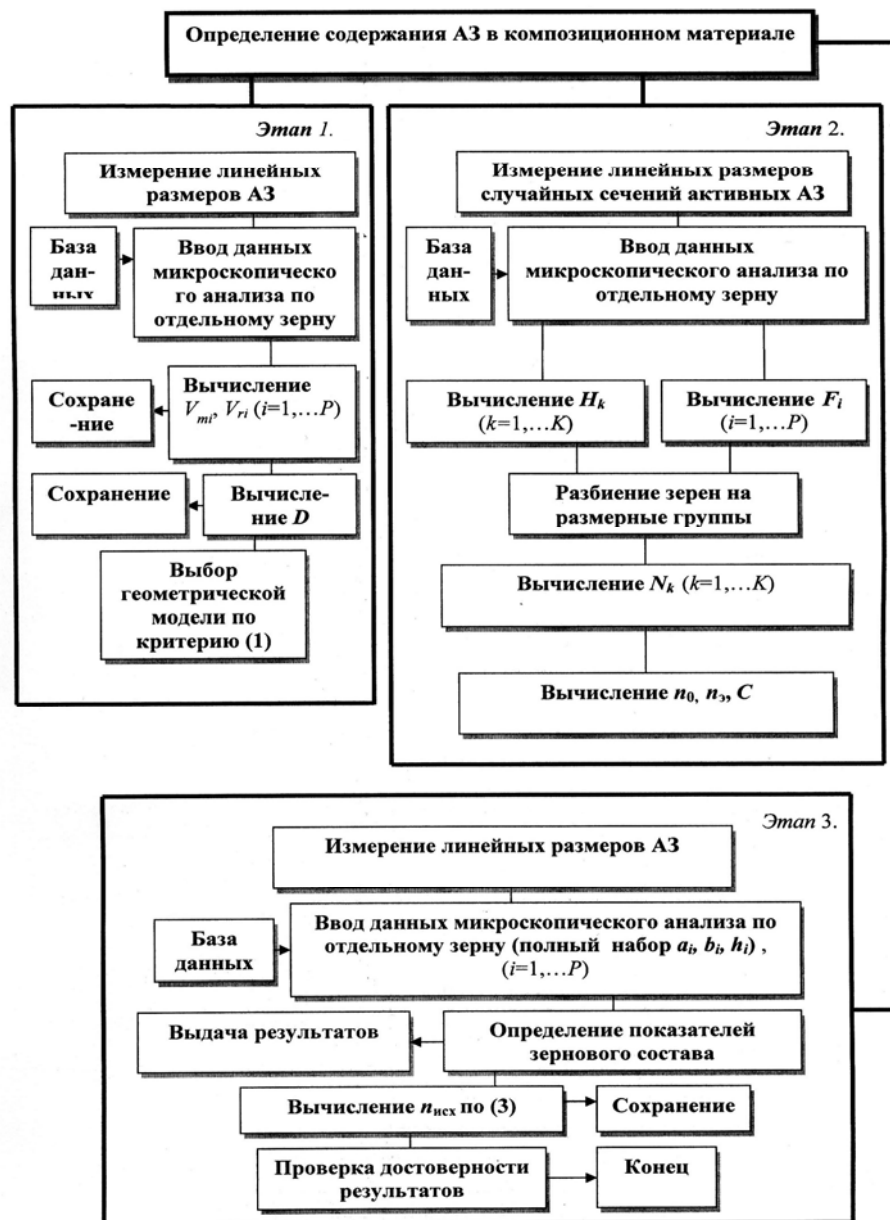


Рис. 1. Блок-схема метода.

*Этап 1. Выбор геометрической модели АЗ*

В качестве модели зерна шлифпорошков из технических синтетических алмазов разными авторами принимались правильные многогранники и тела вращения [6, 7]. Геометрическое моделирование зерен шлифпорошков из природных алмазов ранее не проводилось.

На рис. 2. приведены РЭМ-фотографии зерен исследованных алмазных шлифпорошков. Видно, что алмазные зерна являются совокупностью осколочных частиц неправильной формы, произвольное сечение которых в подавляющем большинстве случаев можно считать четырех- или пятиугольниками, как и в других несферических порошках [6].

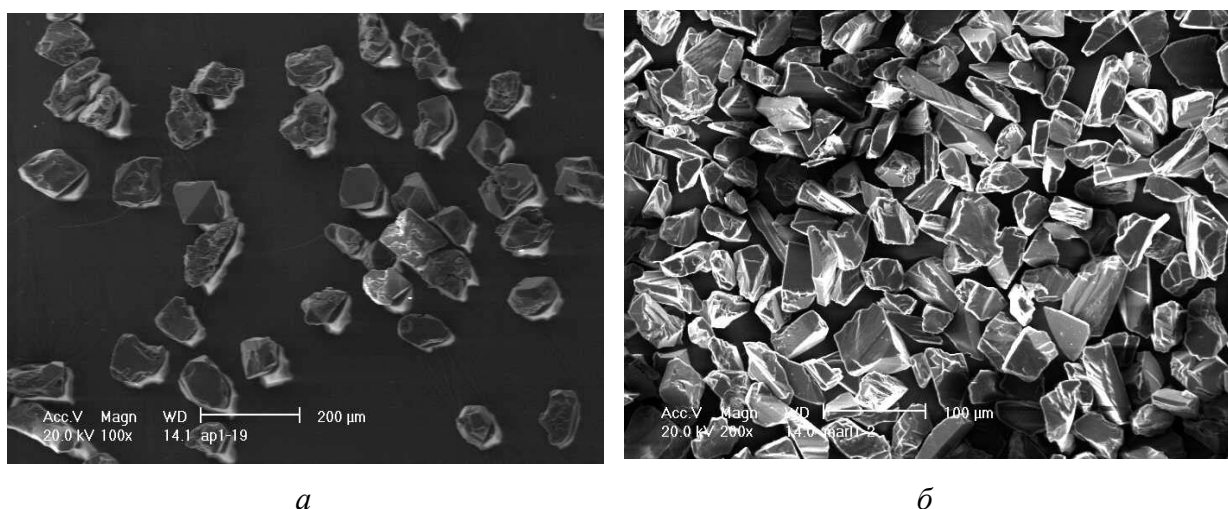


Рис. 2. Зерна шлифпорошков из синтетических (а) и природных алмазов (б) зернистости 80/63.

В качестве геометрической модели зерна абразивного наполнителя выбирался такой вариант модели, при котором параметр  $D$ , характеризующий величину отклонения объема реального зерна  $V_r$  от объема его модельного аналога  $V_m$ , принимает минимальное значение:

$$D = \left| 1 - \left[ \sum_{i=1}^P (V_{mi}/V_{ri})^2 \right]^{1/2} / P \right|, \quad (1)$$

где  $i, P$  – порядковый номер и количество исследованных зерен соответственно.

Совокупность линейных измерений, необходимых для вычисления  $V_r$  и  $V_m$ , определяется формой АЗ. Для вычисления  $V_r$  и  $V_m$  проводится измерение высоты зерен и линейных измерений на плоскости сечения; совокупность последних определяется формой АЗ или выбранной геометрической модели АЗ соответственно. Если форму АЗ невозможно характеризовать одной геометрической фигурой, то проводится разбивка зерна на сегменты. Всего было изучено по 250–300 зерен каждой разновидности исследованных алмазных шлифпорошков. Значения  $D$  для различных геометрических моделей зерен приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения критериального параметра  $D$  для различных геометрических моделей зерен

Геометрическая модель зерна	Шлифпорошки					
	CI	СII	СIII	III	III	III
	$D$					
Прямоугольный параллелепипед	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Эллипсоид	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
Сфероид	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Куб	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Октаэдр	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3

В соответствии с выбранным критерием (1) в качестве геометрической модели зерен для всех исследованных шлифпорошков был принят куб.

#### Этап 2

Расчет количества активных АЗ в композиционном материале проводился с применением метода количественной металлографии, основанного на изучении размерного распре-

деления микрочастиц в объеме материала по исследованию распределения площадей их случайных сечений  $F_i$  [8, 9]. Совокупность линейных измерений, необходимых для вычисления  $F_i$ , определяется видом случайного сечения.

Вычисление количества частиц  $k$ -й размерной группы  $N_k$  проводилось по формуле, полученной с использованием вероятностного распределения  $F_i$  для кубических частиц [10]:

$$N_k = 1/H_k (2,433 n_k - 0,971 n_{k-1} - 0,270 n_{k-2} - 0,097 n_{k-3} - 0,044 n_{k-4} - 0,029 n_{k-5} - 0,019 n_{k-6} - 0,012 n_{k-7} - 0,007 n_{k-8} - 0,007 n_{k-9}) \quad (2)$$

где  $H_k = 1,5 h$  – так называемая средняя высота куба, если  $h$  – ребро куба ( $h$  определялась как полусумма сторон прямоугольника, описанного вокруг проекции случайного сечения зерна).

Количество активных АЗ в композиционном материале, равно  $\sum_{k=1}^K N_k$  ( $K$  – количество размерных групп), вычислялось на основании измерений площадей случайных сечений 100–150 зерен. Концентрации активных АЗ в материале в исходном состоянии  $n_0$  и после испытания на трение и изнашивание  $n_3$  приведены в табл. 2. Относительное изменение количества АЗ в связке при трении и изнашивании  $C = (n_0 - n_3 / n_0) \times 100$  % характеризует стабильность количества активных АЗ в связке.

### Этап 3

Проверка достоверности результатов проводилась путем сравнения  $n_0$  и значения концентрации АЗ в исходном состоянии, определенной, исходя из показателей зернового состава шлифпорошка  $n_{исх}$ . Определение зернистости и показателей зернового состава шлифпорошков проводилась с применением так называемого компьютерного диагностического сита (КДС) – косвенной диагностики шлифпорошков, основанной на данных микроскопического анализа [11]. Основу КДС составляет математическая модель ситового размерного разделения, которая представляет собой зависимость между параметрами аналога ячейки сита и размерными характеристиками зерна, полученную из условия предельного прохождения модели зерна через принятый аналог ячейки сита в виде квадрата с длиной стороны  $d$ .

Зернистость исследованных шлифпорошков приведена в табл. 2.

Таблица 2. Концентрации АЗ и зернистость шлифпорошков

Концентрация АЗ (мм <sup>-3</sup> ) и зернистость	Шлифпорошки					
	III	CI	III	CI	III	CI
$n_0$	2400±240	3200±3 20	700±70	870±87	115±12	130±13
$n_3$	1800±180	2400±2 40	700±70	950±100	60±6	115±12
$n_{исх}$	2700±270	3200±3 20	670±67	900±90	120±12	140±14
$C, \%$	25±2,5	30±3	0	0	50±5	10±1
Зернистость, мкм	63/50		80/63		100/80	125/100

Значение  $n_{исх}$  вычислялось по формуле:

$$n_{\text{исх}} = v_{\text{отн}} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^P N_{ij} / \sum_{i,j=1}^{P,J} (N_{ij} V_j), \quad (3)$$

где  $j, J$  – порядковый номер и количество фракций в зерновом составе алмазного шлифпорошка;

$v_{\text{отн}}$  – относительное объемное содержание зерен алмаза в композиционном материале (при 40 % (по массе) алмаза  $v_{\text{отн}} = 40\rho_c / (60\rho_a + 40\rho_c)$ ,  $\rho_c, \rho_a$  – плотности ПТФЭ и алмаза);  
 $V_j = d_j^3$  ( $d_j$  – длина стороны ячейки сита, в которую проходит зерно).

### Обсуждение результатов

Результаты проведенных исследований показали, что при испытаниях образцов на трение изменения концентрации активных зерен шлифпорошков из синтетических и природных алмазов зернистости 80/63 не происходит; остальные исследованные шлифпорошки отличаются меньшей стабильностью количества активных АЗ в связке (табл. 2).

РЭМ-фотографии поверхностей трения исследованных композиционных материалов приведены на рис. 3.

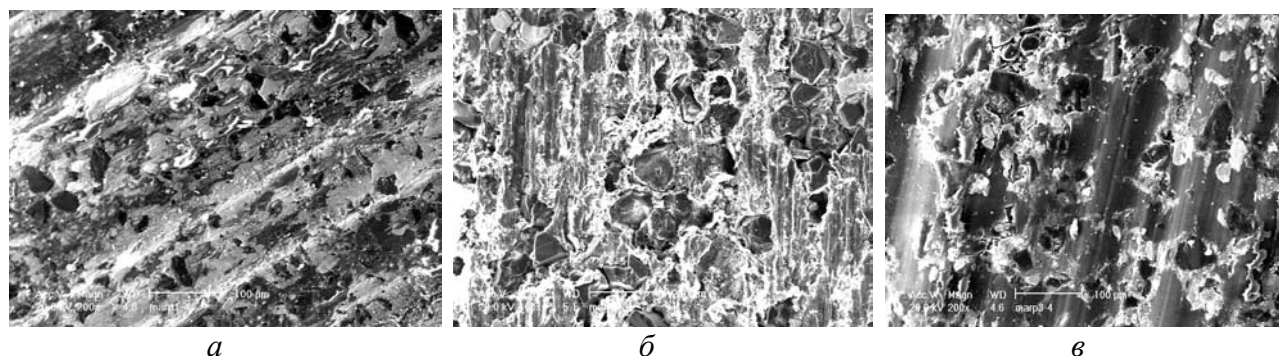


Рис. 3. Поверхности трения композиционных материалов ПТФЭ – шлифпорошки из природных алмазов: а) 63/50; б) 80/63; в) 100/80.

При трении зерна мелкодисперсных шлифпорошков имеют тенденцию погружаться в материал связующего (рис. 3, а), в результате чего происходит процесс зашлифовки алмазных зерен, который наиболее выражен для зерен синтетических алмазов вследствие гладкой поверхности их граней, чем и объясняется наблюдаемое уменьшение их концентрации на поверхности инструмента.

Понижение концентрации АЗ крупнодисперсных шлифпорошков из природных алмазов объясняется их выкрашиванием при трении (рис. 3, в), в том числе в результате хрупкого скалывания. С увеличением размеров зерен этот процесс становится более выраженным: усилия, приходящиеся на каждое зерно, возрастают, а отношение площади поверхности зерна к его объему, определяющее величину удельных физико-механических сил, которые обеспечивают прочность удержания частиц в связке, уменьшается.

Поверхность трения композиционных материалов, содержащих шлифпорошки зернистости 80/63, характеризуется насыщенностью АЗ с равномерным распределением целых и сколотых зерен (рис. 3, б). Проведенными ранее исследованиями было установлено, что введение алмазных шлифпорошков в ПТФЭ не вносит существенных изменений в надмолекулярную структуру полимера [12]. Прочность удержания алмазных зерен в полимерной связке определяется, в основном, степенью уплотнения композиционного материала и величиной отношения площади поверхности зерна к его объему, определяющейся размерами, формой и шероховатостью поверхности АЗ. Таким образом, более высокую прочность удержания алмазных зерен шлифпорошков зернистости 80/63 можно объяснить однородностью структуры композиционного материала, достигаемой в процессе его изготовления: размеры частиц по-

рошка ПТФЭ и алмазных зерен близки по размерам (около 80 мкм). Из исследованных материалов эти композиции обладают максимальными значениями плотности, твердости и износостойкости (низким удельным расходом алмаза), а стабильность концентрации АЗ в них обеспечивает эффективность (высокую производительность и качество обработанной поверхности) и стабильность (низкий коэффициент вариации удельного расхода алмазов) работы опытных инструментов [5]. Перечень опытных образцов алмазного инструмента, изготовленного на основе ПТФЭ, приведен в работе [5, 13].

### Выводы

Разработанный метод может найти применение при оценке изменения концентрации дисперсных наполнителей произвольной формы со статистически равномерным распределением в объеме композиционного материала инструментального, триботехнического и конструкционного назначения (поверхности и покрытия).

### Литература

1. Бакуль В. Н. Работоспособность алмазных кругов на органической связке отечественного и зарубежного производства. – Киев, 1969. – 25 с.
2. Верещагин В. А. Определение количества зерен, приходящихся на единицу поверхности / Верещагин В. А., Журавлев В. В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 208 с.
3. Щиголов А. Г., Полупан И. Н., Коломиец В. В. Определение количества зерен по глубине рабочего поверхностного слоя алмазного инструмента // Синт. алмазы . – 1979. – № 3. – С. 19–25.
4. Землянский Е. С. Работоспособность алмазных кругов при различных видах шлифования // Сверхтв. материалы. – 1981. – № 6. – С. 24–28.
5. Шиц Е. Ю. Исследование и разработка полимерных композиционных материалов с использованием природных алмазных порошков. Дис. ...канд. техн. наук: – 05.02.01 / Е. Ю. Шиц; ОИФТПС СО РАН. – Якутск, 2000. – 180 с.
6. Лаврененко В. И., Шепелев А. А., Петасюк Г. А. Модели формы зерен СТМ // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 5–6. – С. 18–21.
7. Цымбалист М. М., Руденская Н. А., Кузьмин Б. П., Паньков В. А. Учет фактора формы при ситовом анализе несферических порошков // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 6. – С. 61–63.
8. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
9. Приборы и методы физического металловедения/ Под ред. Ф. Вейенберга. – М.: Мир, 1973. – 375 с
10. Hull F. C., Houk W. J. // *Trans. AIME*. –1953. – 197. – P. 565.
11. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Компьютерное диагностическое сито для идентификации зернистости и зернового состава микроскопических проб алмазных шлифпорошков // Сверхтв. материалы. – 2003. – № 3. – С. 71–83.
12. Сыромятникова А. С, Сафонова М. Н., Шиц Е. Ю. Методика оценки работоспособности алмазных инструментов/ Тр. I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Ч.5. – Якутск, 2002. – С. 76–80.
13. Шиц Е. Ю., Соколова М. Д., Семенова Е. С. Особенности технологии производства абразивного инструмента на основе политетрафторэтилена // Материалы Технологии Инструменты. – 2006. – № 1. – С. 97–100.

Поступила 30.05.07.