

УДК 621.762.4

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ АЛМАЗНОГО СВЕРЛА

Г. Г. ВИНОКУРОВ^{a+}, П. П. ШАРИН^a, О. Н. ПОПОВ^b, С. Г. ВИНОКУРОВА^b

Исследовано формирование микрогеометрии поверхности трения алмазосодержащего твёрдосплавного порошкового материала кольцевого сверла. Отличительной особенностью приработки поверхности трения является формирование удлинённых областей материала матрицы за случайно расположенными алмазными зёрнами. Для статистического описания формирования поверхности трения алмазосодержащего материала предложено использовать корреляцию износа профиля порошкового материала, поперечного пути трения. Показано, что данный подход качественно описывает особенности формирования микрогеометрии поверхности трения алмазосодержащего порошкового материала.

Ключевые слова: алмазное сверло, твёрдосплавный материал, трение скольжения, поверхность трения, микрогеометрия, статистическое моделирование.

Введение. Алмазные инструменты с твёрдосплавной матрицей получили широкое применение в промышленности для качественной высокопроизводительной механической обработки материалов. По сравнению с инструментом на органических связках, алмазный инструмент с твёрдосплавной матрицей обладает более высокими значениями износостойкости, алмазодержания и теплопроводности, эффективен при повышенных режимах эксплуатации. В качестве материала твёрдосплавной матрицы, удерживающей алмазы, применяются износостойкие металлокерамические сплавы системы WC—Co [1]. Твёрдосплавные матрицы алмазных инструментов формируются технологическими способами порошковой металлургии. Вследствие этого, прессы алмазосодержащих порошковых материалов характеризуются высокой степенью неоднородности структуры — случайно расположенными зёрнами алмазного сырья в матрице, выделениями дисперсных и коагулированных фаз матрицы, пористостью. Форма спеченных частиц и поры между ними составляют понятие *макроструктуры* порошковой среды [2].

Случайная макроструктура и физико-механические свойства алмазосодержащих порошковых материалов непосредственно влияют на служебные характеристики инструментов. Поэтому следует выявить, как особенности строения алмазосодержащего материала будут проявляться в процессе приработки его рабочей поверхности при эксплуатации инструмента. Экспериментальное исследование и описание процессов формирования случайной макроструктуры порошковых материалов крайне затруднено большим количеством участвующих в этом частиц, сложностью многочисленных физико-механических, теплофизических и др. процессов, что приводит к необходимости привлечения методов статистического моделирования.

Цель настоящей работы — разработка статистического описания формирования поверхности трения алмазного сверла в натуральных условиях эксплуатации инструмента.

^a Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН. Россия, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1.

^b Институт математики и информатики, НИИ математики Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Россия, 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 48.

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

Материалы и методы исследований. В работе исследована приработка поверхности алмазосодержащего твёрдосплавного порошкового материала кольцевого сверла (рис. 1, *a*) разработки Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН, г. Якутск). Основной матрицы материала является промышленный твёрдосплавный порошок ВК8. Для изготовления режущей части сверла использовалось природное алмазное сырьё — порошок марки А7К10; зернистость 400/315; концентрация в инструменте 25%, содержание алмазного порошка в сверле — 0,42 карата. В качестве пластификатора при изготовлении алмазосодержащего твёрдосплавного порошкового материала использовалось органическое соединение — парафин.

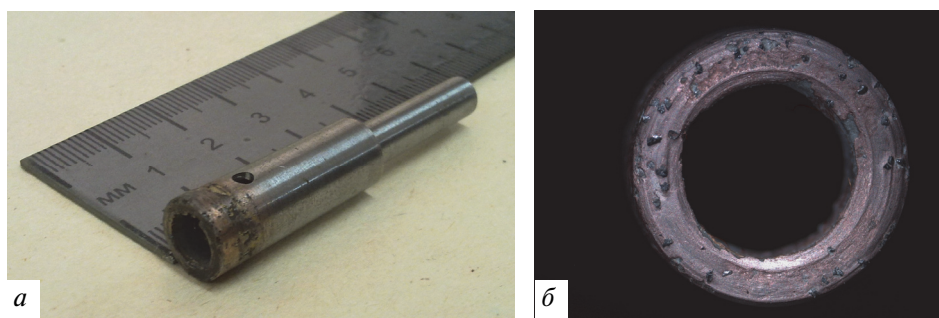


Рис. 1. Алмазное бытовое сверло разработки ИФТПС СО РАН: *a* — общий вид; *б* — рабочая поверхность

Для получения алмазосодержащих порошковых материалов разработан метод пропитки расплавом меди после их холодного прессования, при этом обеспечивается саморегулируемая дозировка количества пропитываемой меди [3]. Для обеспечения равномерной плотности брикета и предотвращения усадки проводился предварительный расчёт количества пропитываемого материала. Следует отметить, что основная количественная характеристика макроструктуры порошковых материалов — пористость непосредственно определяет необходимое количество материала связки алмазного инструмента.

Для проведения натурных испытаний алмазных свёрл был изготовлен стенд на базе промышленного сверлильного станка. Для тарировки нагрузки на сверло использованы электронные аналитические весы. Испытания проводились при следующих режимах: осевая нагрузка 270 Н, 124 Н, 69 Н; частота вращения вала 467 об/мин, 593 об/мин, 840 об/мин. Приработка опытного алмазного сверла исследовалась при натурных испытаниях сверлением твёрдых природных материалов — гранита и карбида кремния.

Металлографические исследования макроструктуры и поверхности трения алмазосодержащих порошковых материалов проводились на микроскопах “Neophot-32”, “Stemi 2000-C” и “Axio Observer” при увеличениях от $100\times$ до $1000\times$. Обработка экспериментальных данных и расчёты проведены в электронных таблицах Excel и программной среде MathCad.

Результаты исследований и их обсуждение. *Формирование поверхности трения алмазосодержащего материала.* На рис. 1, *б* приведена рабочая поверхность сверла из алмазосодержащего материала в исходном состоянии. Поскольку алмазная компонента была введена в матрицу в процессе изготовления, расположение на поверхности равномерное, выступ алмазных частиц из матрицы незначителен. При удалении алмазных частиц с поверхности возможен процесс самозатачивания, что и подтверждает наличие алмазных частиц по всему объёму. Следует отметить, что макроструктура износостойкого алмазосодержащего материала является практически однородной по объёму, что является важным условием для её статистического описания.

Как показывают исследования, при изнашивании алмазного инструмента поверхность матрицы может успешно сопротивляться разрушению за счёт свойств упругой деформации [1]. Поэтому, с целью обеспечения необходимых физико-механических свойств матрицы алмазосодержащих материалов из твёрдых сплавов, проводится пропитка медью, никелем и др. металлами; это придаёт алмазному инструменту высокий уровень износостойкости. При этом надо учесть то, что если

матрица характеризуется высокой износостойкостью, то алмазные зерна недостаточно вскрываются и обрабатываемый инструмент быстро теряет режущую способность при эксплуатации. И наоборот, если матрица является недостаточно износостойкой, то алмазы выделяются и выпадают, не обеспечивая качественную обработку материала; срок службы инструмента в целом снижается. В случае выбора качественной матрицы с оптимальной износостойкостью при эксплуатации алмазосодержащего инструмента возможен процесс его самозатачивания. Дело в том, что в процессе изнашивания рабочей поверхности инструмента разрушения и сколы алмазных зёрен способствуют появлению новых режущих граней.

В работе для выявления механизма изнашивания алмазосодержащего твёрдосплавного материала металлографическим анализом было исследовано формирование строения поверхности трения (рис. 2).

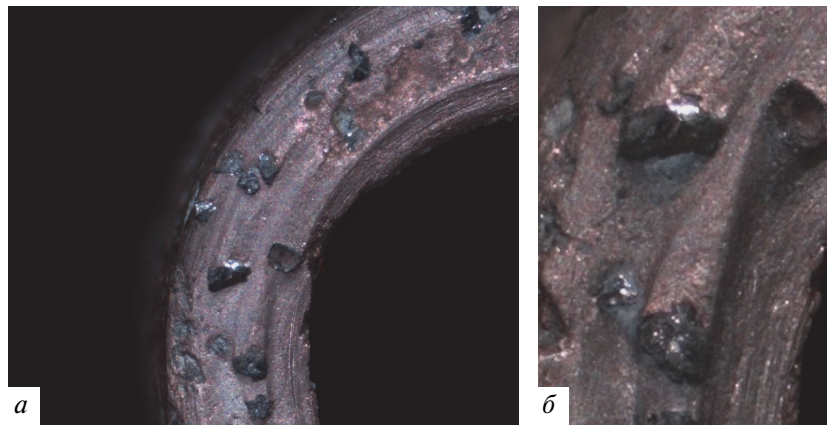


Рис. 2. Изнашивание алмазосодержащего материала бытового сверла:
а — фрагмент поверхности трения; б — шлейфы материала матрицы; время работы 90 с

Как видно из рис. 2, а, с началом процесса изнашивания алмазосодержащего материала существенно меняется рельеф поверхности трения с чётко выраженной симметрией по кольцевому пути трения. На поверхности трения в первую очередь изнашиваются более пластичные участки — области матрицы, в результате более твёрдые структурные составляющие — алмазные зерна несколько возвышаются над поверхностью. Таким образом, формирование рельефа поверхности трения определяется в основном тем, что макроструктура является двухфазной — состоит из относительно пластической матрицы и случайно распределённых алмазных частиц (рис. 2, а).

Характер износа матрицы зависит от многих факторов и выражается в появлении лунок, площадок износа и бороздок. Но основной особенностью начального изнашивания поверхности трения является формирование удлинённых областей материала матрицы непосредственно за алмазными зёрнами. На рис. 2, б представлен процесс формирования шлейфа материала матрицы за алмазной частицей в процессе изнашивания. Форма данных образований в виде длинных шлейфов также отражает симметрию кольцевого пути трения, и их направление является противоположным направлению вращения инструмента.

Следует отметить, что формирование удлинённых областей материала матрицы непосредственно за алмазными частицами способствует их удержанию. Дело в том, что при трении скольжения поверхностные слои материалов подвергаются интенсивным сдвиговым напряжениям [4, 5]. При обработке материала в поверхностном слое алмазного инструмента возникают также сдвиговые напряжения, которые являются причиной вырыва или скола алмазного зерна. Алмазная частица, упрочнённая на поверхности трения удлинённой областью пластичной матрицы, условно, обладает большим сопротивлением удалению или разрушению (рис. 2).

Биномиальная модель изнашивания сечения порошковых покрытий и материалов при трении скольжения. Как отмечено выше, порошковые материалы отличаются случайной неоднородной

макроструктурой, которая обусловлена спецификой технологических процессов их получения. В настоящее время для описания случайной макроструктуры порошковых покрытий и материалов широко используются разнообразные статистические модели порошковой среды, которые с развитием информационных технологий непрерывно совершенствуются [6–9].

В данной работе для описания характерной микрогеометрии поверхности трения алмазосодержащего порошкового материала использована элементарная модель макроструктуры порошковой среды на основе матричной вероятностно-геометрической системы частиц, предложенной Каминским В. М. с соавторами [6]. Эта система ранее развита и использована авторами для моделирования изнашивания порошковых покрытий и материалов при трении скольжения [9]. Вследствие сравнительной простоты, выбранная матричная вероятностно-геометрическая система позволяет рассматривать практически неограниченную порошковую среду, между тем более сложные трёхмерные модели допускают описание только до нескольких десятков тысяч взаимодействующих частиц.

Поскольку сопротивление разрушению порошковой среды определяется, в основном, когезией частиц, то для учёта случайной макроструктуры при трении скольжения необходимо было связать её характеристики с вероятностью удаления отдельной частицы на поверхности трения. В модели было предположено, что удаление частиц с поверхности трения при установившемся изнашивании является испытанием Бернулли [9]. За событие принято удаление частицы порошкового материала, второе событие — что частица остаётся в материале, дополнительно к первому. Так как удаления частиц являются независимыми событиями с повторением испытаний, то вероятность удаления из поверхности трения k частиц будет иметь вид биномиального распределения (закон Бернулли) [9, 10]:

$$P_l(k) = \frac{l!}{k!(l-k)!} p^k (1-p)^{l-k}, \quad (1)$$

где p — вероятность удаления частицы порошка из всей поверхности трения, определяется размерами матрицы вероятностно-геометрической системы; l — общее количество испытаний Бернулли.

Выражение (1) описывает распределение линейного износа поперечного сечения изначально гладкой поверхности трения; количество испытаний l соответствует пути трения. Как известно, по теореме Муавра-Лапласа при $l \rightarrow \infty$ биномиальное распределение (1) стремится к нормальному [9, 10], что соответствует известной закономерности распределения координат профиля равновесной поверхности трения материалов в трибологии [4, 5].

Таким образом, статистическая биномиальная модель (1) изнашивания сечения порошкового материала описывает характеристики профиля поверхности, поперечного пути трения. Следует отметить, что линейный износ в (1) и получаемые далее результаты задаются в безразмерном виде, который с учётом размеров выбранной вероятностно-геометрической системы можно перевести в обычную размерность [9].

Статистическое описание поверхности трения алмазосодержащего материала. Как установлено выше, основной особенностью начального изнашивания поверхности трения алмазосодержащего материала является формирование удлинённых областей материала матрицы (шлейфов) непосредственно за алмазными зёрнами (рис. 2). Поэтому для описания микрогеометрии поперечного профиля поверхности трения порошкового материала биномиальная модель (1) развита в следующем направлении.

Для описания формирования характерных шлейфов порошкового материала вдоль пути трения необходимо рассматривать корреляционную взаимосвязь значений линейного износа поперечного профиля при двух значениях пути трения l и $l + dl$ с учётом вероятностей (1). С этой целью необходимо построить двумерное распределение случайных величин $k(l)$ и $k(l + dl)$, которые являются зависимыми. Поэтому искомое распределение состоит из условных вероятностей случайной величины $k(l + dl)$, если при пути трения l линейный износ составлял $k(l)$ (рис. 3). Таким образом, условные вероятности задаются произведениями выражений из распределения (1). В данном случае: пусть зна-

чения начального износа $k(l)$ задаются непосредственно за алмазными частицами ($dl = 0$), тогда случайная функция $k(l + dl)$ описывает шлейф материала матрицы вдоль пути трения (рис. 2).

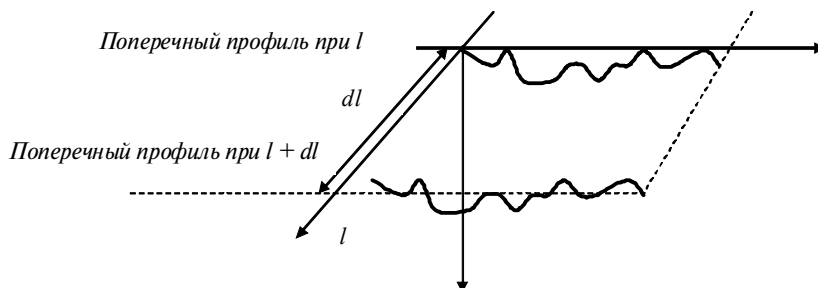


Рис. 3. Схема элемента поверхности порошковых материалов при трении скольжения

Двумерное распределение также зависит от параметров — переменных l, dl ; по его виду можно оценить взаимосвязь значений линейного износа в зависимости от пути трения. Здесь можно отметить, что приращение dl является существенно положительной величиной, поэтому увеличение пути трения в выражении (1) означает переход к последующим поперечным профилям порошкового материала (рис. 3).

В разработанной модели случайные величины $k(l)$ и $k(l + dl)$ являются дискретными; учитывая биномиальное распределение (1) и то, что линейный износ по пути трения не может уменьшаться, двумерное распределение можно выразить матрицей F_{ij} (рис. 4). В матрице случайная величина $k(l)$ задана по столбцам, $k(l + dl)$ — по строкам, также предположено $l > dl$. Ненулевые элементы можно выразить соотношениями:

$$F_{ij} = P_l(j)P_{dl}(i - j), \quad (2)$$

где столбцы $j = 0, 1, 2, \dots, l$; тогда строки $i = j, j + 1, j + 2, \dots, j + dl$.

$k(l) \backslash k(l+dl)$	0	1	2	3	...	$dl-1$	dl	$dl+1$	...	$l-2$	$l-1$	l
0	F_{00}	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0
1	F_{10}	F_{11}	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0
2	F_{20}	F_{21}	F_{22}	0	...	0	0	0	...	0	0	0
3	F_{30}	F_{31}	F_{32}	F_{33}	...	0	0	0	...	0	0	0
...	...	...	...	...	...	0	0	0	...	0	0	0
$dl-1$	F_{dl-10}	F_{dl-11}	F_{dl-12}	F_{dl-13}	...	...	0	0	...	0	0	0
dl	F_{dl0}	F_{dl1}	F_{dl2}	F_{dl3}	...	...	F_{dldl}	0	...	0	0	0
$dl+1$	0	F_{dl+11}	F_{dl+12}	F_{dl+13}	...	...	...	...	...	0	0	0
...
$l-2$	0	0	0	F_{l-23}	...	...	F_{l-2dl}	...	...	...	0	0
$l-1$	0	0	0	0	...	...	F_{l-1dl}	...	...	...	F_{l-1l-1}	0
l	0	0	0	0	...	F_{ldl-1}	F_{ldl}	F_{ldl+1}	...	...	F_{ll-1}	F_{ll}
$l+1$	0	0	0	0	...	0	F_{l+1dl}	...	...	...	F_{l+1l-1}	F_{l+1l}
$l+2$	0	0	0	0	...	0	0	...	...	...	F_{l+2l-1}	F_{l+2l}
...
...
$l+dl-1$	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	$F_{dl+l-1l-1}$	$F_{dl+l-1l}$
$l+dl$	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	F_{dl+ll}

Рис. 4. Матрица двумерного распределения линейного износа поперечных профилей порошкового материала

Как видно из рис. 4, матрица является не квадратной, заполняется следующим образом: в области в виде параллелограмма расположены произведения вероятностей из выражения (2) (нену-

левые ячейки матрицы указаны фоновой окраской); остальные элементы матрицы тождественно равны нулю.

Для двумерного распределения (2) выполняется условие нормировки:

$$\sum_{i=0}^{l+dl} \sum_{j=0}^l F_{ij} = 1. \quad (3)$$

С целью количественной оценки взаимосвязи линейных износов необходимо вычислить коэффициент корреляции по матрице F_{ij} двумерного распределения (2). Для этого с учётом ненулевых элементов матрицы математические ожидания дискретных случайных величин линейных износов определяются по формулам:

$$M[k(l)] = \sum_{j=0}^l \sum_{i=j}^{j+dl} j P_l(j) P_{dl}(i-j), \quad (4)$$

$$M[k(l+dl)] = \sum_{j=0}^l \sum_{i=j}^{j+dl} i P_l(j) P_{dl}(i-j).$$

Среднеквадратические отклонения выражаются соотношениями:

$$\sigma_{k(l)}^2 = \sum_{j=0}^l \sum_{i=j}^{j+dl} (j - M[k(l)])^2 P_l(j) P_{dl}(i-j), \quad (5)$$

$$\sigma_{k(l+dl)}^2 = \sum_{j=0}^l \sum_{i=j}^{j+dl} (i - M[k(l+dl)])^2 P_l(j) P_{dl}(i-j).$$

Тогда коэффициент корреляции линейных износов поперечных профилей задаётся выражением:

$$\text{corr} = \frac{\sum_{j=0}^l \sum_{i=j}^{j+dl} (j - M[k(l)])(i - M[k(l+dl)]) P_l(j) P_{dl}(i-j)}{\sigma_{k(l)} \sigma_{k(l+dl)}}, \quad (6)$$

где математические ожидания и среднеквадратические отклонения задаются выражениями (4) и (5).

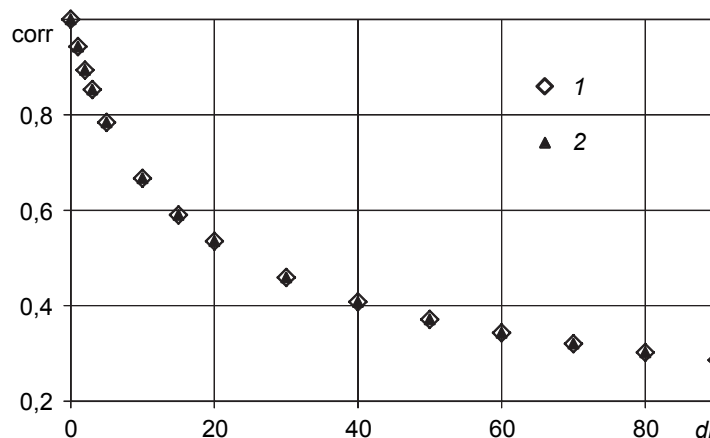


Рис. 5. Коэффициент корреляции линейного износа поперечных профилей порошкового материала в начале пути трения: 1 – $l = 8, p = 1/8$; 2 – $l = 8, p = 1/50$

На рис. 5 приведены графики зависимостей коэффициента корреляции линейных износов поперечных профилей (6) от приращения пути трения. Расчеты проведены по формуле (6) при малых

значениях пути трения l с помощью программы в MathCad. Следует отметить, что приращение пути трения dl означает расстояние между двумя поперечными профилями; при существенной корреляции величина dl описывает длину характерного шлейфа (рис. 2). Как видно из графиков, коэффициент корреляции не зависит от вероятности удаления частицы. Это означает, что коэффициент корреляции не зависит от размеров выбранной вероятностно-геометрической системы модели порошковой среды [9].

Как видно из графиков, вблизи алмазных частиц ($dl \rightarrow 0$) наблюдается область существенной корреляции линейных износов поперечных профилей (с коэффициентом корреляции выше $\sim 0,8-0,9$). Большие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о том, что существует взаимосвязь координат поперечных профилей, т. е. вдоль пути трения образуются шлейфы порошкового материала (рис. 2). Далее, с увеличением приращения dl коэффициент корреляции быстро снижается (рис. 5). Таким образом, корреляция линейных износов поперечных профилей с двумерным распределением (2) качественно описывает формирование характерных шлейфов на поверхности трения алмазосодержащего порошкового материала.

Заключение.

1. Исследовано формирование поверхности трения алмазосодержащего материала бытового сверла. Выявлено, что отличительной особенностью приработки поверхности трения является формирование удлинённых областей материала матрицы непосредственно за алмазными зёрнами. Форма данных образований в виде длинных шлейфов отражает симметрию пути трения, их направление является противоположным направлению вращения алмазного инструмента.

2. Осуществлено развитие статистического подхода для описания изнашивания порошковых покрытий и материалов, основанного на матричной вероятностно-геометрической модели сечения порошковой среды. Обосновано, что для описания характерных шлейфов на поверхности трения алмазосодержащего порошкового материала необходим учёт взаимосвязи линейных износов профилей, поперечных пути трения. Расчётами условных вероятностей линейных износов построено их двумерное распределение, зависящее от пути трения.

3. При малых значениях пути трения на основе полученного двумерного распределения проведены вычисления коэффициента корреляции линейных износов поперечных профилей. Вблизи алмазных частиц обнаружена область существенной корреляции (с коэффициентом корреляции выше $\sim 0,8-0,9$), которая описывает формирование шлейфов на поверхности трения алмазосодержащего порошкового материала.

Авторы благодарны с.н.с. отдела материаловедения ИФТПС СО РАН, к.т.н. Васильевой М. И. за проведение металлографических исследований алмазосодержащих материалов.

Обозначения

p — вероятность удаления частицы из всей поверхности трения; l, dl — путь трения и его приращение; $k(l)$ — линейный износ поперечного профиля при пути трения l ; $P_i(k)$ — его вероятность по биномиальному распределению; F_{ij} — матрица двумерного распределения, где столбцы $j = 0, 1, 2, \dots, l$; строки $i = j, j + 1, j + 2, \dots, j + dl$; $M[k(l)]$; $\sigma_{k(l)}$ — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение линейного износа $k(l)$; corr — коэффициент корреляции двух линейных износов $k(l)$ и $k(l+dl)$.

Литература

1. **Справочник инструментальщика** / Под общ. ред. Ординарцева И. А. — Л.: Машиностроение. — 1987
2. **Кудинов В. В., Калита В. И., Коптева О. Г.** Исследование процесса формирования макро- и микроструктуры частиц газотермических покрытий // Физика и химия обработки материалов. — 1992, № 4, 88—92

3. **Способ изготовления алмазного инструмента:** Положительное решение о выдаче патента от 15.11.2012 на заявку № 2012104802 / М. П. Лебедев, П. П. Шарин, В. Е. Гоголев, Р. Г. Ноговицын, П. А. Слободчиков
4. **Справочник по триботехнике** / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. — М.: Машиностроение. — 1989
5. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977
6. **Каминский В. М., Николенко А. Н., Сидоренко И. Я.** Двумерная стохастическая модель уплотнения порошковых материалов // Порошковая металлургия. — 1982, № 2, 29—31
7. **Нурканов Е. Ю., Кадушников Р. М., Каменин И. Г. и др.** Исследование плотностных характеристик трехмерных стохастических упаковок сферических частиц с использованием компьютерной модели // Порошковая металлургия. — 2001, № 5/6, 34—42
8. **Гнедовец А. Г., Калита В. И.** Модель формирования макроструктуры покрытий при плазменном напылении // Физика и химия обработки материалов. — 2007, № 1, 30—39
9. **Винокуров Г. Г., Попов О. Н.** Статистические подходы для описания формирования и изнашивания макроструктуры порошковых покрытий и материалов, полученных высокоэнергетическими методами. — М.: Academia. — 2009
10. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика — М.: Высшая школа. — 2003

Поступила в редакцию 03.03.15.

Vinokurov G. G., Sharin P. P., Popov O. N., and Vinokurova S. G. **Statistical Description of Formation of Friction Surface Microgeometry of Diamond Drill.**

Formation of microgeometry of friction surface of diamond-bearing hard-alloy powder material of a circular bit is investigated. Formation of oblong areas of matrix material immediately behind random diamond grains is distinctiveness of a running-in of a friction surface. Correlation of profile wear of powder material, cross-axis to sliding distance is offered to be used for the statistical description of formation of friction surface of diamond-bearing material. It is shown that this approach describes qualitatively the features of formation of microgeometry of friction surface of diamond-bearing powder material.

Keywords: diamond drill, hard-alloy material, sliding friction, friction surface, microgeometry, statistical modeling.