

## Статистическая многогранная модель абразивного зерна

А.В. Сергеевичев<sup>а</sup>, А.А. Федяев<sup>б</sup>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>а</sup>alexander910@yandex.ru, <sup>б</sup>art\_fedyayev@mail.ru

Статья поступила 4.05.2016, принята 18.07.2016

*Авторами предложена многогранная модель абразивного зерна, а также указан способ ее применения при конструировании режущего абразивного инструмента. Модель учитывает геометрию абразивных частиц и их расположение по отношению к обрабатываемому изделию, что облегчает определение характеристик режущей способности инструмента. Для измерения соотношения длин осей абразивных частиц в предложенном методе используются свойства проекции статического многогранника. Обширная литература по анализу размера частиц свидетельствует о бесполезности попыток дать полную характеристику частиц неправильной формы с помощью ограниченного числа параметров. Предложенная статистическая многогранная модель не представляет в этом смысле исключения, не претендует на решение многих проблем и представляет собой, скорее, попытку ограничить обычные понятия о коэффициенте формы рамками, которые ставят их в более тесную взаимосвязь с функцией частиц, используемых в качестве режущих инструментов. Исследование, на котором основана данная статья, началось с того, что три отдельных параметра геометрии абразивного зерна (общая форма, острота вершин и кромок и микротопография поверхности) были признаны основными для характеристики резания. Статья посвящена в основном первому из них, но при соответствующем изменении, при условии получения достаточно подробных и точных данных, предложенные понятия можно применить и для двух других параметров. Фактически, настоящая попытка унификации вытекает из вывода, что общая форма, расположение углов и микротопография — это только отдельные стороны более широкого понятия. Цель введения статистического метода описания абразивного зерна заключается в обеспечении наиболее экономичного решения данной проблемы. Расстояния между работающими зёрнами оказывают большое влияние на характер износа или излома. При окончательном анализе, в качестве основы математической теории шлифования, наиболее приемлемым будет статистическое описание шлифовальной поверхности в целом, а не отдельных частиц. Для этого возможно использование спектра Фурье, как это предложено в статье.*

**Ключевые слова:** шлифование древесины и древесных материалов; многогранная модель абразивного зерна; характеристики частиц неправильной формы.

## Statistical polyhedral model of abrasive grain

A.V. Sergeevichev<sup>a</sup>, A.A. Fedyaev<sup>b</sup>

St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky proezd, St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup>alexander910@yandex.ru, <sup>b</sup>art\_fedyayev@mail.ru

Received 4.05.2016, accepted 18.07.2016

*The authors of the article have proposed a polyhedral model of abrasive grain and the method for applying it to construct a cutting abrasive tool. The model considers geometry of abrasive particles and their layout in relation to a processed product that facilitates determination of characteristics of cutting capacity of the tool. To measure a ratio of lengths of axes of abrasive particles, properties of a projection of a static polyhedron have been used in the method proposed. Extensive literature research of the analysis of the size of particles testifies the uselessness of attempts to give the complete characteristic of particles of irregular shape by means of limited number of parameters. The statistical polyhedral model proposed does not represent the exception and does not claim to be a decision for many problems. Rather this model represents an attempt to restrict normal concepts of a form coefficient with frames which put them in more tight correlation with function of the particles used as cutting tools. Research on which this article is based began with the fact that three separate parameters of geometry of abrasive grain (the general form, sharpness of peaks and edges and micro topography of a surface) were recognized as the mains for the characteristic of cutting. Article is devoted generally to the first parameter, but in case of corresponding change it is possible to apply the offered concepts also to two others on condition of receiving enough detail and exact data. Actually real attempt of unification follows from an output that the general form, layout of angles and micro topography is only separate sides of broader concept. The purpose of introduction of the statistical method of the description of abrasive grain means to support the most economical solution for this problem. Distances between operating grains exert a great influence on nature of wear or fracture. As the basis of the mathematical theory of grinding when doing final analysis, the statistical description of a grinding surface in general has been more acceptable than the description of separate particles. Fourier's spectrum, offered in article, suit perfectly for this purpose.*

**Key words:** grinding of wood and wood materials; polyhedral model of abrasive grain; characteristics of wrong-form particles.

## Введение

Шлифование — это процесс резания, во многом сходный с фрезерованием, точением и строганием. В течение долгого времени было принято при анализе рассматривать каждое абразивное зерно в шлифовальном инструменте как вершину миниатюрного резца и применять при этом обычную схему процесса резания, предложенную Мерчантом [1].

В отличие от большинства режущих инструментов геометрия абразивных зерен меняется в широких пределах. Поэтому такие важные параметры, как задний и передний угол зерна, могут быть определены только статически [2]. Кроме того, сложность геометрии режущих частиц исключает применение чисто детерминистического подхода к конструированию абразивного инструмента.

В данной статье приводится статистический метод решения некоторых вопросов конструирования абразивных изделий. Вводится понятие статистического многогранника и указывается способ пользования им для решения проблем конструирования.

**Методика исследований.** Понятие статистического многогранника развилось на основе попыток связать режущую способность абразивных частиц с их геометрической формой и расположением относительно обрабатываемой детали. Контакт абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью может быть точечным, линейным или плоскостным (рис. 1).

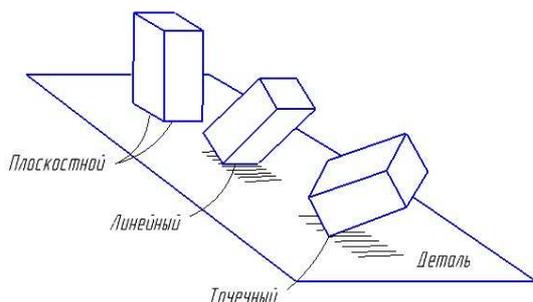


Рис. 1. Виды контакта абразивного зерна с обрабатываемой деталью

В абразивных изделиях как положение, так и форма зерна меняются. Поэтому влияние формы абразивных частиц на режущую способность заметно меняется в зависимости от их расположения относительно обрабатываемой детали [3].

Под статическим многогранником понимается многогранная форма в совокупности с множеством ее положений. Интерес представляют два случая расположения частиц: 1) беспорядочное расположение в трехмерном пространстве и 2) беспорядочное азимутальное расположение на плоскости. Первое применимо к связанным абразивам, у которых зерна беспорядочно расположены в трехмерной матрице. Второе более применимо к нанесенным абразивам, поскольку как при электростатическом процессе, так и при гравитационном нанесении абразивных частиц достигается известная упорядоченность в отношении их расположения в направлении, перпендикулярном плоскости основы.

На рис. 2 представлена пространственная система координат, показывающая различные положения, которые может занимать зерно по отношению к детали. Радиус-вектор  $r$ , проведенный из центра тяжести зерна к его поверхности, может занять любое положение в пространстве. Если плоскость  $P$ , перпендикулярную вектору  $r$ , принять за плоскость обрабатываемой детали, сумма всех таких плоскостей представит сумму всех направлений, по которым разные зерна могут соприкоснуться с обрабатываемой деталью. Вектор плоскости резания  $v$  для каждого радиус-вектора  $r$  может иметь любое направление на плоскости. Для нанесенного абразива вектор  $r$  более или менее определяется методом нанесения зерна, вектор  $v$  может иметь любое направление в плоскости  $P$ . Для связанных абразивов направления как  $r$ , так и  $v$  будут статическими переменными.

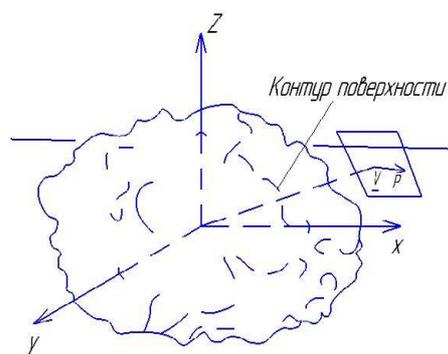


Рис. 2. Изображение геометрии частицы и ее ориентации относительно обрабатываемой детали

Отметим два следующих важных параметра статистического многогранника:

1. Суммарная функция распределения  $F(r)$  радиусов, измеренных от центра зерна до его поверхности в различных направлениях.
2. Статистическое распределение проекций поверхности зерна.

Первый параметр представляет интерес при анализе усилий и износа характеристик зерна. Второй, как будет видно из дальнейшего, создает возможную основу для измерения формы абразивных зерен.

В данной статье понятие статистического многогранника ограничивается применением только для зерен относительно простой геометрии при относительно простой совокупности положений. Рассматриваются только прямоугольные призмы, но указываются методы, позволяющие применить это понятие к более сложным формам. Ориентация зерен, определяемая направлением вектора  $r$ , предполагается распределенной случайно и равномерно; вероятность того, что  $r$  заключено в каком-либо телесном угле, пропорциональна величине этого угла.

Метод вывода плотности вероятности (функции распределения  $f(r)$ ) и суммарной функции распределения  $F(r)$  может быть рассмотрен на примере куба. Благодаря симметрии мы можем рассматривать в этом случае лишь векторы, оканчивающиеся на верхней грани куба.

Рассмотрим сферу радиусом  $a\sqrt{3}$ , описанную вокруг куба со стороной  $2a$  (рис. 3). Представим себе вектор  $s$ , начинающийся от центра куба  $O$  и заканчивающийся на верхней грани куба в точке  $S$ . Продолжим вектор  $s$  до пересечения с описанной сферой в точке  $S'$ . При перемещении точки  $S$  по периметру верхней грани куба точка  $S'$  очертит четырехсторонний сферический многоугольник, площадь поверхности которого будет равна  $\frac{1}{6}[4\pi(a\sqrt{3})^2] = 2\pi a^2$ .

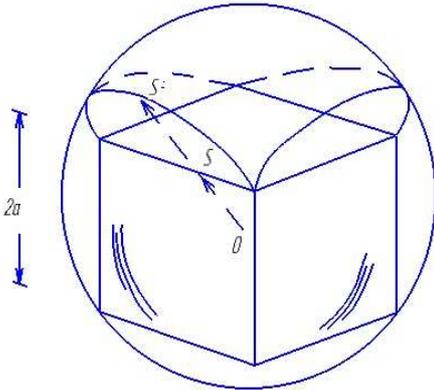


Рис. 3. Куб и описанная сфера

Для заданного  $r$  (например  $r = R$ ) все векторы длиной меньше  $R$  будут заключены в конусе с образующей  $R$  (рис. 4). Этот конус пересекается с плоскостью куба по окружности  $C_1$  и с поверхностью сферы — по окружности  $C_2$ . Окружность  $C_2$  образует основание сферического сегмента, а поверхность этого сегмента, деленная на  $2\pi a^2$  (поверхность сферического многоугольника), является суммарной вероятностью  $P_r$  ( $r < R$ ).

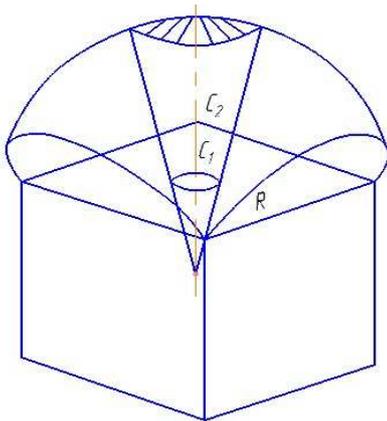


Рис. 4. Схема вывода суммарной функции распределения

Определение данного участка описывающей поверхности дает следующее выражение для суммарной функции распределения:

$$F(r) = 3\left(1 - \frac{a}{r}\right); a < r < a\sqrt{2}, \quad (1)$$

и после дифференцирования:

$$f(r) = \frac{3a}{r^2}; a < r < a\sqrt{2}, \quad (2)$$

для функции плотности вероятности.

Отметим, что уравнения (1) и (2) должны быть соответствующим образом изменены, чтобы учесть, что пересечение конуса с гранью куба не полностью лежит в этой грани. Для внесения необходимой поправки требуется лишь определить, какая часть пересекающейся окружности лежит в пределах грани куба, и использовать этот коэффициент при определении дифференциального элемента поверхности описанной сферы.

Из рис. 5:

$$\cos \beta = \frac{a}{x} = \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}, \quad (3)$$

и

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \beta = \frac{\pi}{4} - \arccos\left(\frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}\right). \quad (4)$$

Тогда  $\frac{\alpha}{\pi/4} - \beta = \frac{4\alpha}{\pi}$  — часть дуги окружности  $C_1$ , лежащей на грани куба; такая же часть дуги  $C_2$  лежит на поверхности сферического многоугольника, построение которого показано на рис. 3. Отсюда функция плотности вероятности будет:

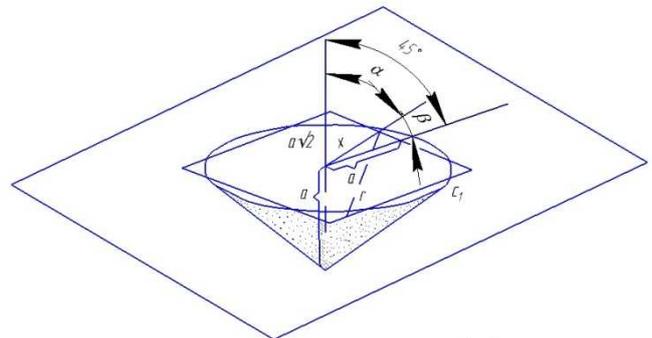


Рис. 5. Верхняя грань куба

$$f(r) = \begin{cases} \frac{3a}{r^2} \text{ нпу } a < r < a\sqrt{2} \\ \frac{3a}{r^2} \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \arccos\left(\frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}\right) \right] \text{ нпу } a\sqrt{2} < r < a\sqrt{3} \end{cases} \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5), получаем суммарную функцию распределения:

$$F(r) = \begin{cases} 3\left(1 - \frac{a}{r}\right) \text{ нпу } a < r < a\sqrt{2}; \\ 3\left(1 - \frac{a}{r}\right) - \frac{12}{\pi} \left[ \arcsin\left(\frac{\sqrt{r^2 - 2a^2}}{\sqrt{2(r^2 - a^2)}}\right) \right] - \\ - \frac{a}{r} \arccos\left(\frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}\right) \text{ нпу } a\sqrt{2} < r < a\sqrt{3} \end{cases} \quad (6)$$

Решение для куба легко распространить и на прямоугольную призму с тремя неравными сторонами  $2a$ ,  $2b$ ,  $2c$ . В этом случае, ввиду низшего порядка симметрии по сравнению с кубом, надо рассматривать три из шести плоскостей призмы. Вместо этого можно составить распределение длин радиус-векторов в числовом выражении. Последнее приближение имеет то преимущество, что его легко применить и для форм более сложных, чем прямоугольные призмы. В этом случае для выборочного представления поверхности частицы выбирают большое число векторов, причем длина каждого вектора вычисляется геометрически. По этим данным может быть построена суммарная частотная характеристика, аппроксимирующая суммарную функцию распределения с любой степенью точности.

Функции  $f(r)$  и  $F(r)$  были вычислены для шести призм, обозначенных 111, 112, 114, 122, 124, 144. Первая, вторая и третья цифры обозначают соответственно длины самой короткой, второй по длине и самой длинной призмы. На рис. 6 приведены  $F(r)$  для этих четырех конфигураций.

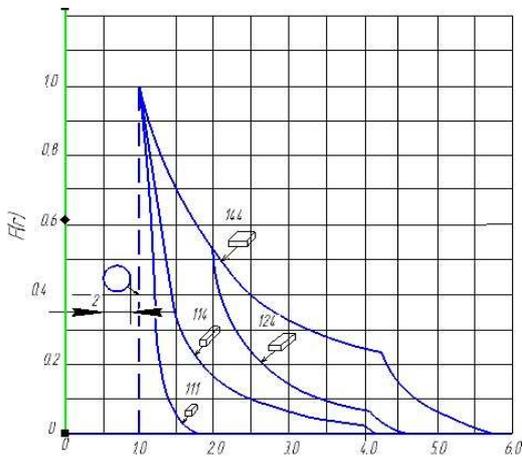


Рис. 6. Суммарные распределения длин векторов

Суммарная функция распределения  $F(r)$  создает основу для сравнения тенденции к разрушению зерен различной геометрии. Каждое зерно с совокупностью различных его положений можно рассматривать как сферу с диаметром, равным диаметру описанной сферы. Так как объем описанной сферы больше объема зерна, ясно, что не весь объем будет занят абразивом; ясно также, что вероятность занятия абразивом изменяется с удалением от центра, достигая единицы в центре и нуля на периферии. Функция  $F(r)$  показывает изменение этой вероятности. Таким образом, можно в определенном смысле считать, что сфера обладает различной «плотностью». «Прочность» сферы должна меняться в обратном расстоянии от центра отношении, и на расстоянии  $r$  от центра она будет равна функции  $F(r)$ , умноженной на максимальную прочность сплошной сферы из абразивного материала [4].

Функция  $F(r)$  дает также представление об изношенных характеристиках зерен различной формы.

Величина изношенного поперечного сечения может быть определена как поверхность основания сферического сегмента, показанного на рис. 7.

Каждая частичка рассматривается как сфера радиуса  $r_m$ , где  $r_m$  — максимальный радиус-вектор (для куба со стороной  $a$ , например,  $r_m = \sqrt{3} a$ ).

Если провести через сферу на расстоянии  $R$  от центра плоскость  $a$ , то можно выбрать элементарный участок поверхности:

$$dA = 2\pi x dx. \quad (7)$$

Но:

$$x = \sqrt{r^2 - R^2} \text{ и } dx = \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}, \quad (8)$$

Отсюда:

$$dA = 2\pi \sqrt{r^2 - R^2} \left( \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \right) = 2\pi r dr. \quad (9)$$

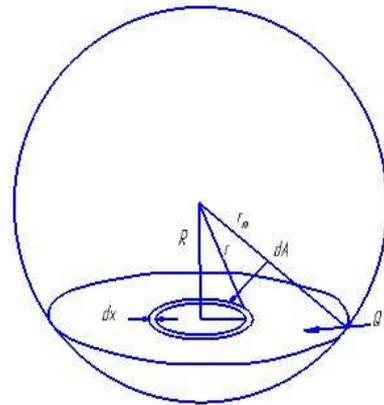


Рис. 7. Изношенное сечение описанной сферы

Вероятность того, что длина произвольного вектора находится в пределах между  $r$  и  $(r+dr)$ , составляет  $f(r)dr$ . Тогда:

$$A(R) = 2\pi \int_R^{r_m} r f(r) dr. \quad (10)$$

Интерес представляет кривая интеграла  $rf(r)$ , выраженная в функции нижнего предела  $R$  в интервале  $r < R < r_m$ . Так как поверхность износа по задней грани является важным фактором, определяющим эффективность режущего инструмента, функция  $A(R)$  имеет большое значение при сравнении форм абразивных зерен.

Заметим, что  $R$  — это расстояние от плоскости износа до центра частицы. В шлифовальном инструменте расстояние  $R$  должно распределяться статистически, ибо по достижении им состояния равновесия зерна, расположенные на его рабочей поверхности, будут иметь различную степень износа.

Если известно распределение  $R$ , можно вычислить действительные сечения износа. Как будет показано ниже, распределение  $R$  связано с понятием твердости инструмента.

Если зерна расположено в связке беспорядочно, то  $R$  будет равномерно распределяться в интервале  $r_m < R < r_m$ , где  $r_m$  — радиус описанной сферы. Предположим, однако, что когда  $R$  за счет износа уменьшится до некоторой критической величины  $R_c$ , зерна будут

вырываться из связки. Тогда в первом приближении можно предположить, что  $R$  равномерно распределяется в интервале  $r_m < R < R_c$ . Более общим будет условие, что  $R_c$  рассеяно, а не имеет постоянного значения, и распределение  $R$  не будет равномерным. При приближении  $R$  к критическому значению  $R_c$  вероятность вырывания зерен приближается к максимуму. Во всяком случае, если известно  $A(R)$ , ожидаемое изношенное сечение частицы будет определяться выражением:

$$A = \int_{-r_m}^{r_m} p(R)A(R)dR, \quad (11)$$

где  $p(R)$  — распределение  $R$ , а  $A(R)$  определяется по указанной выше формуле.

Функции  $A(R)$  для шести изученных призм представлены на рис. 8 и 9.

На этих графиках все результаты приведены к единому объему зерен, так что можно сравнивать размеры зерен различной формы.

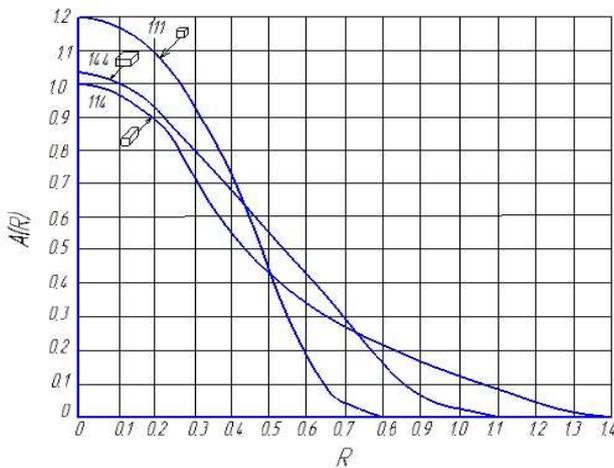


Рис. 8. Распределение изношенных поверхностей форм 111, 114, 144

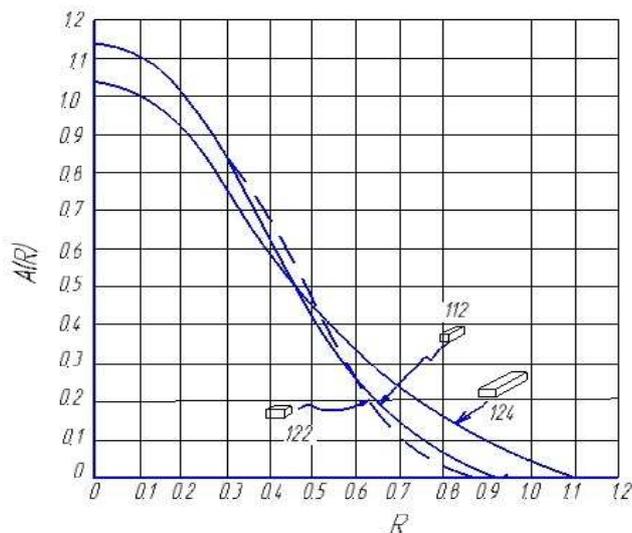


Рис. 9. Распределение изношенных поверхностей форм 112, 122, 124

Роль изношенного сечения аналогична роли площадки износа по задней поверхности в инструменте с заданной геометрией. Как теоретически, так и экспериментально доказано, что для заданного переднего угла, угла трения и угла сдвига глубина резания при постоянном усилии подачи является линейной функцией площадки износа на задней поверхности [5; 6]. Таким образом, функция  $A(R)$  отражает соотношение объема древесины и усилий шлифования.

**Результаты исследований.** Несмотря на то, что теория статистического многогранника может помочь в определении характеристик абразивных зерен, ее применение возможно лишь при следующих условиях [7; 8]: а) форма абразивных частиц может быть с достаточным приближением представлена в виде прямоугольных призм; б) известны отношения сторон этих призм. Далее предполагается, что первое условие выполняется, и предлагается способ определения соотношения сторон призмы методом проекций.

Рассмотрим рис. 10. По определению  $b = ma$  и  $c = nb = mna$ . Если принять  $2a = 1$ , то  $2b = m$  и  $2c = mn$ , а проекция поверхности частицы будет определяться выражением:

$$A_p = 4bc = m^2 n, \quad (12)$$

где проекция взята по самой короткой стороне частицы.

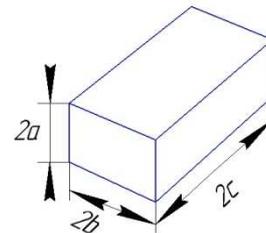


Рис. 10. Соотношение длин осей призмы  $l = c/a$ ;  $n = c/b$ ;  $m = b/a$

Подсчитаем теперь диаметр окружности, площадь которой равна площади проекции абразивной частицы. Тогда:

$$\pi r^2 = m^2 n, \quad (13)$$

$$r^2 = \frac{m^2 n}{\pi}, \quad (14)$$

$$r = m \sqrt{\frac{n}{\pi}}, \quad (15)$$

или:

$$D = 2r = 2m \sqrt{\frac{n}{\pi}}, \quad (16)$$

где  $D$  — искомый диаметр, мм.

Рааль [9] предложил ввести коэффициент формы в следующем виде:

$$\text{объемный коэффициент формы} = \frac{D^2}{V} \quad (17)$$

и применять этот коэффициент как основу для классификации частиц по форме. Объем  $V$  частицы может быть определен по Раалю путем взвешивания определенного числа зерен и деления полученного веса на  $N\rho$ , где  $N$  — число зерен, *шт.*;  $\rho$  — удельный вес, *кг/м<sup>3</sup>*.

Однако объемный коэффициент формы Рааля не однозначен, и в действительности множество частичек с различным соотношением длины и ширины может быть описано одним коэффициентом формы.

Таким образом,

$$D^3 = (2m\sqrt{n/\pi})^3 = \frac{8m^3 n^{3/2}}{\pi^{3/2}}, \quad (18)$$

и объем  $V$  можно записать в виде:

$$V = (m)(mn)(1) = m^2 n. \quad (19)$$

Следовательно,

$$\text{коэффициент формы} = \frac{8m^3 n^{3/2}}{\pi^{3/2} m^2 n} = \frac{8}{\pi^{3/2}} m\sqrt{n} = 1,44m\sqrt{n} \quad (20)$$

При постоянном значении  $k_1$  уравнение:

$$1,44m\sqrt{n} = k_1 \quad (21)$$

определяет контуры всех частиц, имеющих фиксированный коэффициент формы. Прологарифмировав это уравнение, получим:

$$\log m + \frac{1}{2} \log n = \text{const}. \quad (22)$$

Таким образом, в логарифмической сетке контуры зерен будут представляться прямыми линиями.

Если  $m = n = 1$  (куб), коэффициент формы равен 1,44. Для  $m = n = 2$  коэффициент формы равен 4,06, а для  $m = 8$  и  $n = 1$  коэффициент формы равен 11,50. Как видно из приведенного выше уравнения, эти формы отнюдь не единственные, которые описываются данными коэффициентами.

Ясно, что неоднозначность, присущая приближению Рааля, может быть устранена за счет применения двух измерений вместо одного; при этом можно получить два уравнения, разрешимые относительно двух неизвестных  $m$  и  $n$ .

В работе [10] Рааль предложил применить для измерения формы фотоэлектрический метод. При этом наблюдаются частицы с упорядоченной ориентацией. В частности, можно наблюдать частицы, находящиеся в наиболее устойчивом положении; тогда полученная проекция их поверхности будет связана с данным расположением. Предположим, что в дополнение к этой проекции поверхности измеряются проекцией частиц, расположенных беспорядочно. Такие измерения проводились много лет в турбидиметре Вагнера [11], в котором для определения удельной площади

поверхности взвешенных в суспензии беспорядочно расположенных абразивных частиц измерялись потери проходящего луча света. Согласно Коши [12] площадь проекции поверхности равна 1/4 действительной площади поверхности при условии, что частицы не имеют входящих углов.

Площадь поверхности призмы может быть легко рассчитана. Для призмы с размерами 1,  $m$  и  $mn$  (рис. 10) площадь поверхности будет:

$$2m^2 n + 2mn + 2m = 2m(mn + n + 1), \quad (23)$$

а средняя площадь проекции поверхности беспорядочно расположенных частиц, вычисленная по Коши, будет:

$$\frac{1}{4} \cdot 2m(mn + n + 1) = \frac{1}{2} \cdot m(mn + n + 1). \quad (24)$$

Поверхность инструмента, имеющего ту же площадь, получаем из выражения:

$$\pi r^2 = \frac{1}{2} \cdot m(mn + n + 1), \quad (25)$$

при

$$r = \sqrt{\frac{1}{2\pi} m(mn + n + 1)}, \quad (26)$$

или

$$D = \sqrt{\frac{2m}{\pi} (mn + n + 1)}. \quad (27)$$

Тогда:

$$D^3 = \left[ \frac{2}{\pi} m(mn + n + 1) \right]^{3/2}, \quad (28)$$

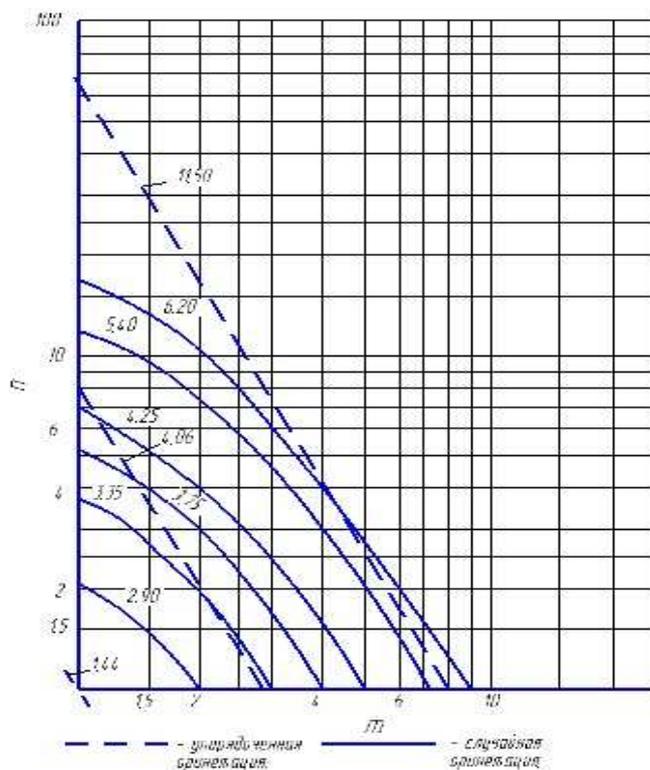
и

$$\begin{aligned} \text{Кoeff. формы} = \frac{D^3}{V} &= \frac{\left[ \frac{2}{\pi} m(mn + n + 1) \right]^{3/2}}{m^2 n} = \\ &= \frac{\left[ \frac{2}{\pi} (mn + n + 1) \right]^{3/2}}{n\sqrt{m}} = \frac{0,512(mn + n + 1)^{3/2}}{n\sqrt{m}}. \end{aligned} \quad (29)$$

При постоянстве значения  $k_2$  уравнение:

$$\frac{0,512(mn + n + 1)^{3/2}}{n\sqrt{m}} = k_2 \quad (30)$$

позволяет определить контур всех частиц, имеющих фиксированный коэффициент формы. Таким образом, если известны коэффициенты формы  $k_1$  и  $k_2$  для частиц, расположенных соответственно упорядоченно и случайно, уравнения (21) и (30) могут решены относительно величин  $m$  и  $n$ . Решения будут представляться пересечением двух семейств кривых (рис. 11).

Рис. 11. Соотношение  $n$  и  $m$ 

Измерение проекций поверхности абразивных частиц в двух положениях может быть осуществлено сочетанием методов Рааля и Вагнера. Требуемое количество частиц на единицу веса абразивного материала может быть получено автоматически при помощи фотоэлектрического приспособления, как это предлагается в работах [13; 14].

Описанный метод измерения некоторых параметров абразивных частиц служит лишь одним примером общего подхода, при котором основные параметры формы могут быть определены из двух серий измерений, проводимых различными методами. Применение методов просеивания, отмучивания или просеивания через сита с двумя контурами отверстий может также представить достаточные данные для определения формы абразивных частиц.

### Выводы

Идея статистического многогранника позволяет сочетать в едином понятии такие параметры, как размер, форма и ориентация частиц, что весьма полезно при определении режущей способности абразивного зерна. Это понятие позволяет оценивать очень важные характеристики излома и износа абразивного зерна. Однако суммарная функция распределения  $F(r)$  не является однозначной и не может характеризовать тонкую структуру поверхности частиц. Для этого должен быть известен спектр Фурье поверхности частицы. Предполагается проведение дальнейших работ в этом направлении.

Для определения соотношения сторон прямоугольной призмы могут быть использованы свойства проекций статистического многогранника. Частицы такой формы могут быть полностью охарактеризованы двумя параметрами: отношением длины к ширине и отношением ширины к высоте. Поскольку обычно форма зерна должна быть охарактеризована больше чем двумя параметрами, возможность применения предложенного метода для более сложных форм должна быть дополнительно изучена.

### Литература

1. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process // J. Appl. Phys. 1945. Vol. 16, № 5/6. P. 267-318.
2. Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Кушнерев В.О. Формирование поверхности твердых тел: граничная область материал-среда // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2014. № 208. С. 138-152.
3. Сергеевичев А.В., Семенов А.В., Овчарова Е.О. Анализ исследований процесса резания при шлифовании древесины и древесных материалов с позиции активных зерен // Изв. С. – Петерб. лесотехн. акад. 2015. № 213. С. 212-223.
4. Bray D.K. Why Does Abrasive Grain Cut, Grinding and Finishing, 1962. 33 p.
5. Макадамс Р. Силы, действующие на изношенный резец // Конструирование и технология машиностроения. 1961. Т. 3, № 3. С. 32.
6. Kobayashi S., Thomsen E.G. The Role of friction in Metal Cutting // J. of Engineering for Industry, Trans. ASME. 1960. Vol. 82. P. 332.
7. Сергеевичев А.В. Анализ разрушения абразивных зерен при шлифовании древесины и древесных материалов // Изв. вузов «Лесной журнал». 2015. № 5. С. 7-15.
8. Рыбин Б.М. Санаев В.Г., Кириллов Д.В. К вопросу выбора параметров шероховатости для оценки неровности древесины // Вестн. МГУЛ – Лесной вестник. 2012. № 4. С. 131-137.
9. Raal F.A. Proposed New Method of Determining the Average Shape of Diamond Particles. Report No. R 215/58 Diamond Research Laboratory, November, 1958.
10. Raal F.A. A Photo- Electric Method of Determining the Shape Factor of a Diamond Grit. Report No. R 215/58 Diamond Research Laboratory, November, 1958.
11. Wagner L.A. A Rapid Method for the Determination of the Specific Surface of Portland Cement // Proceedings. ASTM. 1933. Vol. 33. 570 p.
12. Cauchy M.A. Note sur divers theorems relative a la rectification des courbes et a la quadrature des surfaces // Comptes rendus. 1841. Vol. 13. 1065 p.
13. Beirne T., Hutcheon J.M. A Photo-Electic Particle Counter for Use in the Sieve Range // J. of Scientific Instruments. 1957. Vol. 34 (5), May. 201 p.
14. Thoing W. Untersuchungen uber das Abrichten von schleifscheiben mit Diamantwerkzeugen. Dissertation by T.H. Braunschweig, 1956.

### References

1. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process // J. Appl. Phys. 1945. Vol. 16, № 5/6. P. 267-318.
2. Sergeevichev A.V., Sokolova V.A., Kushnerev V.O. Formation of a surface of solid bodies: cutoff region material- environment // Izvestia SPbLTA. 2014. № 208. P. 138-152.
3. Sergeevichev A.V., Semenov A.V., Ovcharova E.O. The analysis of researches of process of cutting when grinding wood

and wood materials from a position of the fissile grains // Izvestia SPbLTA. 2015. № 213. P. 212-223.

4. Bray D.K. Why Does Abrasive Grain Cut, Grinding and Finishing, 1962. 33 p.

5. Makadams P. The forces acting on the worn cutter // Konstruirovaniye i tehnologiya mashinostroeniya. 1961. T. 3, № 3. P. 32.

6. Kobayashi S., Thomsen E.G. The Role of friction in Metal Cutting // J. of Engineering for Industry, Trans. ASME. 1960. Vol. 82. P. 332.

7. Sergeevichev A.V. The Analysis of Destruction of Abrasive Grains During the Grinding of Wood and Wood Materials // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. 2015. № 5. P. 7-15.

8. Rybin B.M., Sanaev V.G., Kirillov D.V. To question of the choice of roughness parameters for the estimation of woods roughnesses // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2012. № 4. P. 131-137.

9. Raal F.A. Proposed New Method of Determining the Average Shape of Diamond Particles. Report No. R 215/58 Diamond Research Laboratory, November, 1958.

10. Raal F.A. A Photo- Electric Method of Determining the Shape Factor of a Diamond Grit. Report No. R 215/58 Diamond Research Laboratory, November, 1958.

11. Wagner L.A. A Rapid Method for the Determination of the Specific Surface of Portland Cement // Proceedings. ASTM. 1933. Vol. 33. 570 p.

12. Cauchy M.A. Note sur divers theorems relative a la rectification des courbes et a la quadrature des surfaces // Comptes rendus. 1841. Vol. 13. 1065 p.

13. Beirne T., Hutcheon J.M. A Photo-Electric Particle Counter for Use in the Sieve Range // J. of Scientific Instruments. 1957. Vol. 34 (5), May. 201 p.

14. Thoing W. Untersuchungen uber das Abrichten von schleifscheiben mit Diamantwerkzeugen. Dissertation by T.H. Braunschweig, 1956.

УДК 69.009.1

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-106-110

## Решение задач организационно-технологического проектирования при помощи методов многомерного моделирования

Я.В. Жаров

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Ярославское шоссе 26, Москва, Россия  
yazharov@yandex.ru

Статья поступила 8.04.2016, принята 25.06.2016

*Развитие методов организационно-технологического проектирования в условиях ограниченного финансирования — задача сложная, но решаемая. В статье рассматриваются вопросы внедрения актуальных методов информационного моделирования, в том числе многомерного моделирования инвестиционно-строительных проектов с использованием визуальной составляющей. В рамках данной статьи разработаны основы применения метода многомерного моделирования с использованием блочно-кластерной структуры проекта, а также описана возможная схема организации взаимодействия участников инвестиционно-строительной деятельности на строительной площадке с участием инжиниринговой компании в лице разработчика многомерной модели реализации инвестиционно-строительного проекта. Вопрос взаимодействия участников проекта связан с возможностью совместной разработки и эксплуатации многомерной модели с сохранением преимуществ и эффективности ее использования при управлении как отдельными строительными операциями, так и проектом в целом. Среди основных задач организационно-технологического проектирования, которые могут быть эффективно решены при помощи методов многомерного моделирования, в том числе на основе блочно-кластерных структур, выделяются: объединение большого количества информации, разной по характеру, способу ее хранения, восприятия и передачи в единый информационный блок; создание динамических единичных блоков, которые обеспечивают возможность корректировки и адаптации таких блоков для решения конкретных задач; объединение единичных блоков в модели проектов; возможность отображения многочисленных характеристик единичного блока для идентификации как программным обеспечением, так и оператором с целью оптимизации принятия организационно-технологических решений; создание условий, позволяющих работать как с единичными информационными блоками, так и с итоговой моделью в многопользовательском режиме для минимизации проектных противоречий и пространственных коллизий.*

**Ключевые слова:** многомерное моделирование; BIM-технологии; инвестиционно-строительная деятельность; инжиниринговая компания; планирование в строительстве.