

УДК 621.923

**А.И. ДОЛМАТОВ, С.Н. НИЖНИК, М.А.КУРИН**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## **К ВОПРОСУ ФОРМАЛИЗАЦИИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ**

*Сформулирована проблема необходимости решения задачи формализации абразивного инструмента. Проведен анализ существующих моделей геометрической формы абразивных зерен, отмечены их недостатки. Представлены экспериментальные исследования формы и размеров зерен семи абразивных материалов, которые подтвердили гипотезу о том, что зерно в первом приближении можно описать эллипсоидом вращения. Предложена концептуальная модель абразивного зерна, использование которой позволит разработать универсальный подход к получению аналитических зависимостей для расчета функциональных характеристик процесса при различных схемах шлифования.*

**Ключевые слова:** абразивное зерно, геометрическая форма абразивных зерен, формализация абразивного инструмента, концептуальная модель.

### **Введение**

Развитие современного авиадвигателестроения происходит в условиях широчайшего внедрения деталей из коррозионно-стойких, высоко- и жаропрочных материалов и сплавов.

Данные материалы наряду с высокими прочностными характеристиками, определяющими долговечность изделий, которые работают в условиях высоких температур при знакопеременных циклических нагрузках, отличаются низкой обрабатываемостью [1,2]. Эти материалы практически не поддаются обработке резанием (среднее значение коэффициента обрабатываемости по отношению к стали 45 составляет 0,2-0,3). Одним из возможных методов обработки рассматриваемых материалов является шлифование. Таким образом, исследования, посвященные повышению эффективности процесса шлифования деталей авиационных двигателей, являются актуальными и заслуживают внимания.

### **1. Формулирование проблемы**

Создание теоретических основ с целью решения задач управления процессами шлифования неразрывно связано с прогнозированием целого ряда комплекса параметров, сопровождающих процесс. Сложность физико-механических и физико-химических явлений, протекающих в зоне контакта абразивного круга и обрабатываемой детали, вызывает необходимость в разработке математической модели, начиная с исследований, посвященных формализации абразивного инструмента. Однако созда-

ние адекватной и универсальной математической модели абразивного инструмента является одним из наиболее сложных и трудоемких этапов разработки теории шлифования металлов [3, 4].

Действительно, строение и динамика изменения рельефа абразивного круга, определяются не только технологией изготовления инструмента, режимами правки а также комплексом свойств абразивного и обрабатываемого материалов, но и влиянием режимных параметров шлифования, действие которых еще недостаточно изучены на условия и интенсивность протекания физико-химических явлений в зоне контакта.

Решение задачи формализации абразивного инструмента позволит обосновать универсальный подход к расчетам сил резания, температуры и устойчивости процесса при различных схемах шлифования.

### **2. Анализ существующих моделей геометрической формы абразивных зерен**

Абразивное зерно характеризуется размерами и формой, причем форма зерна не регламентируется. Традиционная методология создания модели абразивного инструмента заключается в последовательном решении нескольких фундаментальных задач, главной из которых является геометрическая форма абразивных зерен.

Форма абразивных зерен оказывает влияние на основные показатели работоспособности абразивных инструментов (износостойкость, производи-

тельность шлифования, эффективность использования круга) и на параметры процесса обработки: силы резания, температура в зоне обработки, и на состояние поверхностного слоя (шероховатость, остаточные напряжения, степень деформации и т.д.) [5]. Форма абразивных зерен отличается большим разнообразием, а сами зерна в общем случае можно охарактеризовать как осколки неправильной формы со случайной поверхностью. При создании модели исследователи, как правило, представляют случайную поверхность абразивного зерна в виде простых, идеальных форм (конуса, пирамиды, шара, эллипсоида, призмы и т.п.), или их комбинаций. Такое моделирование преследует цель создания эквивалента абразивного зерна, сохраняющего основные рабочие (режущие) свойства, и при этом удобного для математического описания. Но при всей их простоте и полезности для представления физических особенностей и характеристики контакта абразивных зерен с металлом, модели простых идеальных форм, как правило, не имеют строгого научного обоснования и достаточной экспериментальной проверки, а выбор той или иной формы для аппроксимации абразивного зерна не имеет объективных, физически обоснованных критериев [4, 6].

Таким образом, можно сделать вывод, что ни одна из предлагаемых исследователями идеальных форм не может быть использована как абсолютно точно описывающая геометрию абразивного зерна. В этой связи возникает вопрос лишь о максимальной степени приближения предлагаемой модели к реальному объекту.

Правильная оценка точности тех или иных модельных представлений может быть получена только при условии сравнения их по критериям эффективности, которые определяют оптимальное решение поставленной задачи. В нашем случае в качестве таких критериев выступают требования к эквивалентному зерну:

- 1) эквивалентное зерно должно максимально точно описывать геометрию режущего абразивного зерна;
- 2) эквивалент зерна должен обладать необходимой для обеспечения процесса микрорезания динамической прочностью.

На наш взгляд, существование различных методов замены реальных зерен эквивалентными является следствием пренебрежения большинством авторов первого требования к эквивалентному зерну. Второму условию удовлетворяют все многообразие существующих моделей, так как выступающие режущие вершины зерен в них представлены в виде фигур, обеспечивающих отрицательные передние углы резания с округленной вершиной, или с площадкой затупления.

### 3. Экспериментальные исследования формы абразивных зерен

С целью поиска оптимального решения задачи создания эквивалентного абразивного зерна нами проведено исследование формы и размеров абразивных зерен семи материалов. Исследования проводились в лаборатории электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе с камерой низкого вакуума и системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ – 106, в потоке вторичных и отраженных электронов. Результаты исследований абразивных зерен трех материалов представлены на рис. 1 – 3. Как видим, контуры зерен всех исследуемых абразивных материалов удовлетворительно описываются эллипсами, большая ось которых проходит через наибольшую диагональ сечения зерна (с соотношением диагоналей (0,47-0,73). Полученный результат подтверждает проведенные ранее исследования зарубежных и отечественных ученых. Так, согласно данным работ [7,8] значительное количество измерений, выполненное в КПИ (Киевский политехнический институт), и за рубежом показывают, что между площадью сечения зерна и площадью круга, проведенного через наибольший размер этого сечения, существует практически постоянное соотношение 0,5-0,6, что позволяет вычислить малую ось эллипса.

Проведенный нами эксперимент подтвердил гипотезу, что в любом плоском сечении, проведенном через наибольший размер зерна, контур последнего удовлетворительно описывается эллипсом, а само зерно в первом приближении можно описать эллипсоидом вращения.

### 4. Концептуальная модель абразивного зерна

Конечной целью моделирования процессов шлифования является, как правило, получение аналитических зависимостей, описывающих функциональные характеристики процесса от условий его выполнения (такие как сила резания, температура, износ, качество поверхности и др.). В процессе моделирования требуется решить задачи определения геометрии эквивалентного зерна, а также его ориентации в пространстве (статическая модель абразивного инструмента).

Решение первой задачи достаточно очевидно и легко обосновывается с учетом экспериментальных исследований, представленных выше. Для получения адекватного решения второй задачи требуется создание стохастической модели, учитывающей случайный характер расположения зерен в абразивном пространстве. Интересное решение рассматри-

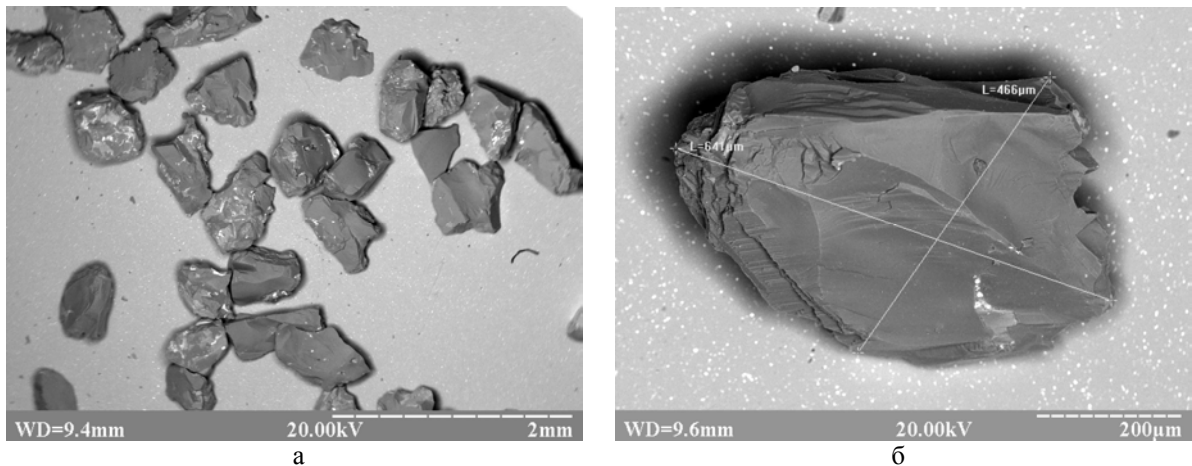


Рис. 1. Фотографии зерен электрокорунда марки 15А зернистостью 40:  
а – общий вид зерен; б – вид единичного зерна

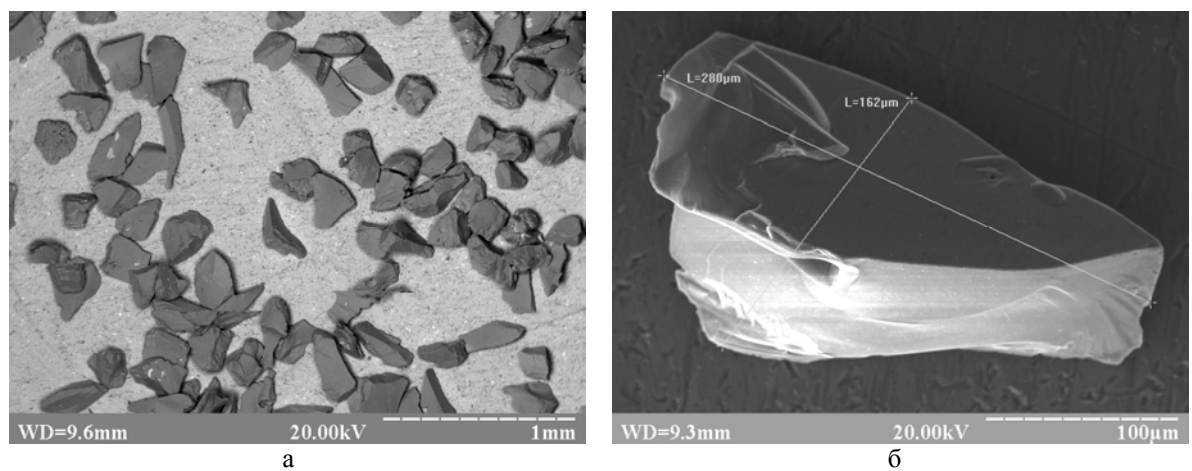


Рис. 2. Фотографии зерен электрокорунда марки 24А зернистостью 12:  
а – общий вид зерен; б – вид единичного зерна

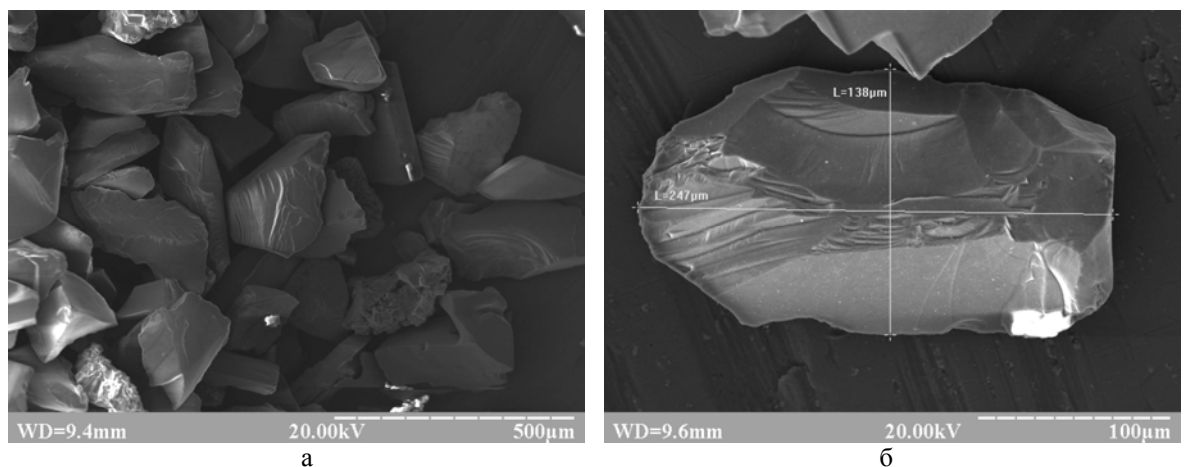


Рис. 3. Фотографии зерен карбида кремния марки 63С зернистостью 12:  
а – общий вид зерен; б – вид единичного зерна

ваемых задач получено в работе [5] А.К. Байкаловым. Здесь автор, анализируя достоинства и недостатки различных модельных представлений, предлагает абразивные зерна идентифицировать с формой шара, обладающего равными режущими свойствами в любой точке, расположенной в шаровом поясе.

Таким образом, предлагается сферическая модель абразивного зерна. Такой эквивалент хоть и сохраняет все рабочие свойства реальных зерен, уступает эллипсоиду вращения по точности аппроксимации формы реальных зерен. Недостатком же эллиптической формы абразивного зерна А.К. Байкалов считал

ет необходимость канонизации величины соотношения диагоналей эллипса, а также вопрос о его ориентации.

В основе определения силовых параметров процесса шлифования теоретическим (аналитическим) путем лежит схематизация съема стружки единичным среднестатистическим зерном, которое характеризуется фактическим передним углом при вершине. На наш взгляд, определение величины этого угла позволит определить ориентацию зерна. В основе предлагаемой методики лежит концептуальная модель абразивного зерна, суть которой состоит в том, что единичное абразивное зерно представляет собой эквивалент, отражающий все режущие свойства абразивного круга. Таким образом, под эквивалентом предлагается понимать не среднестатистическое зерно, а некое идеализированное, абстрактное, искусственно синтезированное зерно, обобщающее в себе характеристику абразивного инструмента, то есть его режущие свойства. Феноменологическое построение такой модели стало возможным благодаря исследованиям топографии абразивного инструмента, результаты которых представлены в работе [9].

Так в работе [9] указывается на существование корреляции между макрогеометрическими параметрами опорной поверхности круга и такими характеристиками как твердость, связка, зернистость и материал зерна, которая определяется коэффициентами опорной кривой кругов. Установление этой прямой взаимосвязи позволяет найти значение переднего угла эквивалентного зерна  $\gamma$ , который находится в количественной связи с коэффициентом опорной кривой ( $\nu$ ) [9]:

$$\operatorname{tg}|\gamma| \approx 1/\nu. \quad (1)$$

Формула (1) получена авторами работы [9] на основании обобщения большого экспериментально-го материала, позволившего установить, что мак-

симальная высота шероховатости круга определяется его зернистостью, причем величина  $Rz$  близка к размеру зерен основной фракции (среднему размеру зерен). Это позволило сделать вывод, что для кругов различной зернистости выполняется условие:

$$W_0 \cdot Rz \approx 0,5, \quad (2)$$

где  $W_0$  - плотность выступов на дуге контакта;

$Rz$  - максимальная шероховатость поверхности абразивного круга.

На основании зависимости (2) была получена итоговая формула (1). Зависимость (1) требует пояснения. В реальных условиях шлифования фактический передний угол абразивного зерна будет зависеть от радиуса при вершине и от толщины среза, при этом, чем больше будет толщина среза, тем меньше угол. Формула (1) имеет четкий физический смысл, заключающийся в том, что режущие свойства абразивного инструмента не зависят от значения параметров режима шлифования, а под  $\gamma$  следует понимать некую константу, количественно выражающую режущие свойства конкретной марки абразивного инструмента. В связи с выше сказанным для конкретной марки абразивного инструмента возможно определение не только геометрии эквивалентного зерна, но и его ориентации.

Так, если представить сечение зерна в виде эллипса, то  $\operatorname{tg}|\gamma|$  можно представить как отношение диагоналей описанного вокруг эллипса параллелограмма (рис. 4):

$$\operatorname{tg}|\gamma| = d_1/d_2.$$

Таким образом, если  $d_1/d_2 < 1$ , то большая ось эллипсоида вращения перпендикулярна к касательной к траектории движения, если неравенство не выполняется, то эллипсоид ориентирован меньшей осью. Если же  $d_1/d_2 = 1$ , то эллипсоид вырождается в сферу.

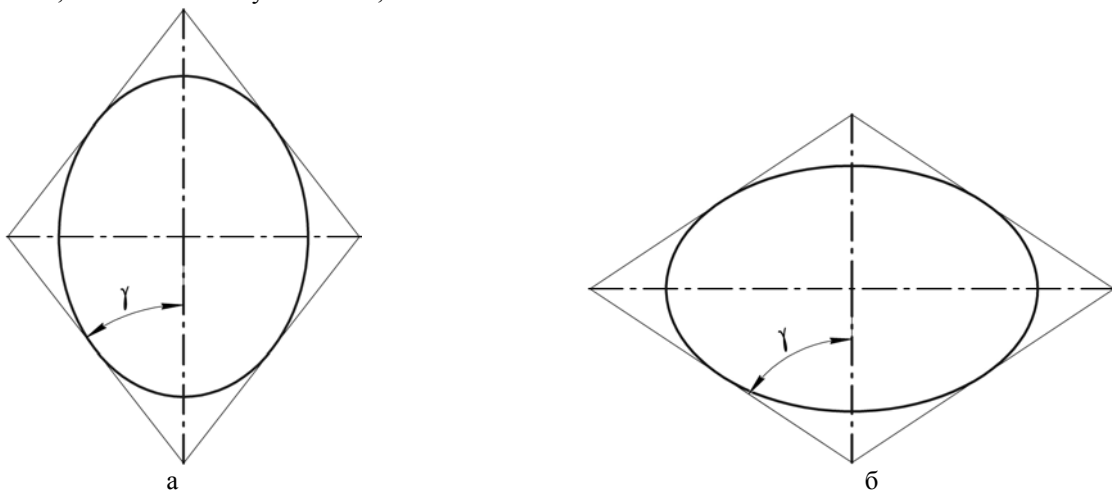


Рис. 4. Эквивалентное зерно:

а - угол эквивалентного зерна при  $\nu > 1$ ; б - угол эквивалентного зерна при  $\nu < 1$

## Заключение

Проведен анализ существующих моделей геометрической формы абразивных зерен. Предложена концептуальная модель абразивного зерна, использование которой позволит разработать универсальный подход к получению аналитических зависимостей для расчета функциональных характеристик процесса при различных схемах шлифования.

## Литература

1. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С.Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
2. Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
3. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
4. Сурду Н.В. Повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых материалов за счет усовершенствования кинематики процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Сурду Николай Васильевич. – Х., 2005. – 230 с.
5. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207с.
6. Телегин А.В. Повышение эффективности процесса плоского торцового шлифования труднообрабатываемых материалов за счет кинематики: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Телегин Алексей Васильевич. – Х., 2008. – 202 с.
7. Резникова А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: [Справочник] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
8. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
9. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.

Поступила в редакцию 24.02.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заместитель директора НПО «Оснастка» А.Я. Мовшович, Харьков.

## ДО ПИТАННЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОТРИМАННІ АНАЛІТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

*А.І. Долматов, С.М. Нижник, М.О. Курін*

Сформульована проблема необхідності вирішення задачі формалізації абразивного інструменту. Проведено аналіз існуючих моделей геометричної форми абразивних зерен, відзначені їх недоліки. Представлені експериментальні дослідження форми і розмірів зерен семи абразивних матеріалів, які підтвердили гіпотезу про те, що зерно в першому наближенні можна описати еліпсоїдом обертання. Запропоновано концептуальну модель абразивного зерна, використання якої дозволить розробити універсальний підхід до отримання аналітичних залежностей для розрахунку функціональних характеристик процесу при різних схемах шліфування.

**Ключові слова:** абразивне зерно, геометрична форма абразивних зерен, формалізація абразивного інструменту, концептуальна модель.

## THE QUESTION FORMALIZATION ABRASIVE TOOL TO OBTAIN ANALYTICAL DEPENDENCIES FOR CALCULATION FEATURES OF GRINDING

*A.I. Dolmatov, S.N. Nyzhnyk, M.A. Kurin*

Formulated the problem of the need to address the problem of formalization of the abrasive tool. An analysis of existing models of the geometric shape of abrasive grains, marked with their shortcomings. Presents the experimental investigation of the shape and size of grains of seven abrasive materials, which confirmed the hypothesis that the grain in the first approximation we can describe the ellipsoid of revolution home. We propose a conceptual model of the abrasive grain, the use of which will develop a universal approach to obtaining analytical dependences for calculating the functional characteristics of the process under different schemes of grinding.

**Key words:** abrasive grain, a geometric shape of abrasive grains, the formalization of the abrasive tool, the conceptual model.

**Долматов Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Нижник Сергей Николаевич** – старший преподаватель кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Курин Максим Александрович** – ассистент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kurin\_83@mail.ru.