

*The paper presents a system for calibration of pressure washers on the basis of the autonomous mobile device with use of modern computer technology and software for processing the experimental data. This monitoring system in real time provides information about the dependence of the voltage drop on the sensor of the force acting on the HPA.*

**Key words:** *high-pressure automatic, calibration, monitoring system.*

### **Литература**

1. Верещагин Л. Ф., Семерчан А. А., Кузин Н. И., Садков В. А. К вопросу о шкале высоких давлений // ДАН СССР. – 1970. – **191**. – № 3. – С. 557–660.
2. Прихна А. И., Герасимович А. В., Вишневский Э. Б., Масленко Ю. С., Бовсуновская В. А. Некоторые вопросы измерения давления в камерах с последующим нагревом. – В кн.: Влияние высоких давлений на вещество: матер. I-го укр. респул. семинара (Киев, 1975 г.). – К.: ИСМ АН УССР, 1975. – С. 140–143.
3. Герасимович А. В., Вишневский Э. Б., Ляшенко А. Ф. Ячейка для измерения сверхвысоких давлений // Синтетические алмазы. – 1973. – Вып. 3. – С. 4–7.
4. Ступаков Е. П. Автоматическая регистрация калибровочных точек при высоких давлениях // Геохимия. – 1968. – № 9. – С. 62–65.
5. Ряпосов А. П., Киркинский В. А. Регистрация калибровочных точек в камерах высокого давления методом записи производной изменения сопротивления датчика / Экспериментальные исследования по минералогии 1969–1970 гг. – Новосибирск, 1971. – С. 171–174.
6. Воронов Ф. Ф., Григорьев С. Б., Стальгорова О. В. Автоматическая запись исследуемых параметров при высоких давлениях / Измерительная техника, 1968. – № 3. – С. 23–26.
7. Герасимович А. В., Белоусов И. С. Измерение электросопротивления реперных металлов в установках синтеза с помощью тензометрической схемы / Синтетические алмазы. – 1974. – Вып. 2. – С. 10–11.
8. Герасимович А. В. Измерение электросопротивления реперных металлов в установках синтеза без отключения шин от трансформатора нагрева / Синтетические алмазы. – 1973. – Вып. 4. – С. 17–19.

*Поступила 17.05.12*

УДК 621.921.34–492.2:539.215

**Г. А. Петасюк**, канд. техн. наук, **О. У. Петасюк**, **А. Н. Черненко**,  
**В. В. Смоквина**, **Т. А. Косенчук**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### **КУБИЧЕСКИЕ СПЛАЙНЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССОВ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

*Проанализировано использование кубических сплайнов в исследованиях свойств порошков сверхтвердых материалов и их применении в инструменте. Приведены цели исследований и полученные при этом результаты. Обсуждаются специфика и методика использования математического аппарата кубических сплайнов в этой сфере, тематика решаемых задач.*

**Ключевые слова:** *порошки сверхтвердых материалов, кубические сплайны, свойства, характеристики, диагностика, эмпирические математические модели, алмазно-абразивная обработка.*

## Введение

Сплаинами называют функции, состыкованные из различных многочленов по фиксированной системе [1; 2]. Для описания такого способа соединения многочленов применяют термин „склеены” [3]. Тем самым подчеркивая, что в местах стыка они ведут себя как целое, т.е., представляют собой сплошную кривую. Среди сплайнов важнейшую роль играют полиномиальные сплайны, склеенные из кусков многочленов. В приложениях наиболее широко используют полиномиальные сплайны 3-й степени – кубические. Это связано с тем, что построение таких сплайнов сводится в большинстве случаев к решению системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, имеющей доминирующую главную диагональ. Решение таких систем легко реализуется на компьютере методом прогонки [3].

Кубические сплайны являются мощным вычислительным инструментом решения широкого круга задач прикладной механики, материаловедения и других естественных наук. Решение краевых задач для дифференциальных уравнений и их систем, численное интегрирование и дифференцирование, аналитическое описание экспериментальных данных различной природы (математическая обработка результатов испытаний, визуализация результатов расчетов, компьютерная графика на плоскости и в пространстве) – вот далеко не полный перечень задач вычислительной математики, которые эффективно решаются с применением кубических сплайнов. Весь спектр практического применения кубических сплайнов отражен также в сфере исследования свойств и применения порошков сверхтвердых материалов (СТМ).

Процедура приближения кубическими сплайнами неизвестной функции  $f(x)$  на отрезке  $[a, b]$  сводится к следующему [3]. Отрезок  $[a, b]$  сеткой  $\Delta = \{[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{N-1}, x_N], x_0 = a, x_N = b\}$  разбивается на  $N$  частей. Кубическим сплайном  $S_\Delta(f(x))$  называют функцию

$$S_\Delta(f(x)) = P_{n,3}(x) = a_{n,0} + a_{n,1}x + a_{n,2}x^2 + a_{n,3}x^3,$$

являющуюся многочленом третьей степени на каждом из отрезков  $[x_{n-1}, x_n]$ ,  $n = 1, \dots, N$ , совпадающую с  $f(x)$  в точках  $x_0, x_1, \dots, x_N$  и удовлетворяющую вместе с первой и второй производными условиям непрерывности в точках  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ :

$$P_{n,3}(x_{n-1}) = f(x_{n-1}), \quad P_{n,3}(x_n) = f(x_n) \quad n = 1, \dots, N;$$

$$P'_{n,3}(x_n) = P'_{n+1,3}(x_n), \quad (1)$$

$$P''_{n,3}(x_n) = P''_{n+1,3}(x_n),$$

где  $n = 1, \dots, N-1$ .

Всего в распоряжении имеется  $4N$  неизвестных  $a_{nk}$ ,  $k = 0, 1, 2, 3$ , соотношения (1) образуют систему из  $4N-2$  уравнений. Остальные уравнения для коэффициентов  $a_{nk}$  можно получить из естественных краевых условий. Эти условия порождают уравнения [3]:

$$P'_{n,3}(x_0) = P'_{n+1,3}(x_N) = 0$$

Описанный алгоритм кусочной аппроксимации интерполяционными кубическими сплайнами относится к одномерному случаю, т.е. плоским кривым или функции одной переменной. Именно в таком варианте кубические сплайны используют чаще всего в различных практических приложениях. В настоящей работе предложен и компьютерно реализован оригинальный алгоритм обобщения одномерных кубических сплайнов на многомерный случай. Разработаны и используются компьютерно-программные средства и методика применения математического аппарата 2D и 3D кубических сплайнов как вспомогательного инструмента в исследовании свойств порошков СТМ, инженерии поверхности, образованной шлифовальным кругом, при решении других прикладных задач алмазно-абразивной обработки.

Цель настоящей обзорной работы – конкретизировать практические задачи, где использование математического аппарата кубических сплайнов довольно эффективно. Такая

информация, несомненно, будет способствовать расширению круга прикладных задач, которые можно успешно решать с применением кубических сплайнов.

### **Экспериментально-аналитическое изучение деструкции композитов на основе алмазных порошков**

В настоящее время все шире применяют алмазно-абразивные композиционные материалы на основе комплексных производных металлов [4]. Исследование свойств таких и подобных материалов связано с математической обработкой экспериментальных данных графического характера, т. е. данных в виде термограмм, дифрактограмм, профилограмм, рентгенограмм, дебаемогограмм и др. Например, исследование деструкции алмазно-абразивных композитов на основе комплексных производных металлов предусматривает аналитическое описание и числовой анализ снимаемых с помощью определенных приборов графических данных. Подобная информация коррелирует со свойствами формируемого материала и допускает вполне определенную физическую интерпретацию относительно происходящих при этом процессов. Анализ графических данных включает нахождение площадей под кривыми термограмм, их производных, установление характера хода кривых – монотонность, симметрия. Первичной процедурой обработки графических данных является оцифрование экспериментальных кривых. Эту процедуру можно трактовать как получение дискретной функции, т.е. заданной в отдельных точках. Затем осуществляется аналитическое описание этой функции кубическими сплайнами. Таким образом, предоставляется возможность осуществлять высокоточное численное интегрирование и дифференцирование, а также аналитическое исследование экспериментальных кривых.

### **Исследование физико-химических свойств и морфометрических характеристик микропорошков природного и синтетического алмаза**

Методика оценки энергетического состояния поверхности алмазных микропорошков зернистостью 28/20, изготовленных методом гидравлической классификации из природного и синтетического сырья, описана в [5]. Энергетическое состояние оценивалось по адсорбционному потенциалу и поверхностной энергии. Методика предусматривала аппроксимацию полученных экспериментальных данных измерения объема адсорбированного азота на поверхности порошка. Необходимость такой процедуры обусловлена тем, что объем адсорбированного азота измеряется в дискретном ряде точек относительного давления. В то же время в процессе проводимых исследований требовалось располагать значением объема адсорбированного азота в произвольной точке этого интервала. Поэтому осуществляли аппроксимацию экспериментальных данных с использованием математического аппарата кубических сплайнов. Это позволяет анализировать адсорбционный потенциал и поверхностную энергию в любой точке интервала изменения значений относительного давления. Таким образом, с использованием кубических сплайнов методика расчета адсорбционного потенциала и поверхностной энергии приобретает универсальность и гибкость.

### **Разработка эмпирических математических моделей**

Сплайны вытесняют многочлены во многих прикладных задачах, связанных с приближением функций [1]. Отличительная особенность использования их в этом качестве состоит в том, что предоставляемые ими значения точно совпадают со значениями неизвестной функции в заданных точках. Другими словами, аппроксимирующая кривая проходит через все экспериментальные точки. Методика построения многофакторных эмпирических математических моделей процессов алмазно-абразивной обработки с применением кубических сплайнов описана в работе [6]. Там же приводятся примеры полученных таким образом моделей применительно к конкретным видам алмазно-абразивной обработки. Отмечается, что разработанную методику и реализующие ее компьютерно-программные средства можно использовать при решении задач прогнозирования показателей процесса обработки в зависимости от его параметров на основании имеющихся эмпирических

зависимостей. При решении таких задач созданная методика допускает использование имеющихся частных зависимостей в целях получения более общих математических моделей.

### **3D моделирования поверхности, получаемой в процессе алмазного шлифования**

Шероховатость обработанной поверхности является одним из основных признаков ее качества. Количественную оценку шероховатости осуществляют по стандартным параметрам шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ , а также по параметрам шага. Шероховатость свидетельствует не только о качестве обработанной поверхности, но и дает определенное представление о шероховатости режущего слоя инструмента, сформировавшего эту поверхность. С учетом такой большой информативности шероховатости в [7] решали задачу построения 3D-модели шероховатого слоя детали, обработанной кругами из СТМ, применительно к детали из твердого сплава BK8, обработанной алмазным шлифованием кругом 12А 2-450 АС6 160/125 М 1-10 50%. На первом этапе экспериментально изучали шероховатый слой детали. Шероховатость измеряли присоединенным к компьютеру профилометром-профилографом модели SurfTest SJ-201 фирмы «Mitutoyo» (Япония). Методика исследования состояла в следующем. Измеряли поверхность детали длиной и шириной по 1,2 мм. Выполняли по 50 измерений в продольном и поперечном направлениях. Полученные профилограммы оцифровывали так, что каждая из них имела по 5000 точек. Далее вводили трехмерную систему координат, совмещая ось  $X$  с продольным направлением, ось  $Y$  – с поперечным. По оси  $Z$  откладывали высоту неровностей поверхности. Измеряли поверхность осуществлялись вдоль прямых линий в точках  $x_i = x_0 + (i-1)h_x$  и  $y_j = y_0 + (j-1)h_y$ , ( $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; N = 50$ ), где  $h_x, h_y$  – дискретность сканирования исследуемой поверхности образца соответственно по длине и ширине. Шероховатость поверхности рассматривали как функцию двух переменных  $x$  и  $y$ , т. е.,  $z = z(x, y)$ . Линии сканирования интерпретировали как сечения этой функции по одному из направлений при фиксированном другом. В результате оцифрования соответствующих профилограмм получили матрицу чисел размером  $5000 \times 5000$ , которая представляет собой шероховатость по линиям сканирования. Из этого массива отобрали матрицу  $50 \times 50$  значений шероховатости в точках пересечения прямых  $x_i, y_j$ , т. е. на сетке  $\Delta_{xy} = \{[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{N-1}, x_N], x_0 = a, x_N = b; [y_0, y_1], [y_1, y_2], \dots, [y_{N-1}, y_N], y_0 = a, y_N = b\}$ . В результате получили 2500 значений функции шероховатости  $z_{ij} = z(x_i, y_j)$  на сетке  $\Delta_{xy}$ . Далее осуществили пространственную аппроксимацию функции  $z = z(x, y)$  кубическими сплайнами. Вследствие этого получили возможность определения значений функции шероховатости  $z_{ij} = z(x_i, y_j)$  не только в узловых точках сетки  $\Delta_{xy}$ , но и в любой произвольной точке области сканирования. Таким образом можно воссоздать целостную графическую картину исследуемого участка поверхности обработанной детали и осуществлять различные исследования.

Использование 3D-моделирования позволит продвинуться в изучении особенностей процесса алмазной обработки инструментом из СТМ [7], прогнозировать как режущую способность шлифовального круга, так и непосредственно обработку. В свою очередь это будет способствовать выбору наиболее эффективных и оптимальных условий обработки.

### **Математическая обработка рентгенограмм при определении неалмазного углерода в наноалмазах детонационного синтеза**

Кубические файлы использовали при исследовании малого количества неалмазного углерода как в наноразмерных исходных алмазных порошках, так и в различных промежуточных продуктах [8]. Количественный анализ неалмазного углерода проводили рентгенографически путем сравнения интенсивностей рентгеновских линий отражения. Интенсивность всех линий отражения, включая гало, оценивали по занимаемой ими площади.

Вычисляли площадь пиков по собственной разработанной методике. Исходными данными для расчета служили результаты оцифровки рентгенограмм. Процедура оцифровки можно осуществлять либо автономно путем обработки рентгенограмм как рисунков, либо одновременно с рентгенографическим исследованием. В данном случае использовали второй вариант. Исходные данные представляют собой двухстолбцовую матрицу  $x, y$ -координат

оцифрованных точек кривой рентгенограммы. Количество точек этой кривой равнялось примерно 900. По этим точкам воспроизводили рентгенограммы в виде графиков. Границы пика определяли по числовым значениям обших для линии и фона минимальных интенсивностей. Затем линию каждого из пиков аппроксимировали кубическими сплайнами и осуществляли численное интегрирование с использованием разработанных алгоритма и оригинального программного обеспечения.

#### **Вывод**

Результаты анализа показывают, что наряду с другими приложениями кубические сплайны являются эффективным методическим инструментом при исследовании как порошков СТМ, так и алмазно-абразивной обработки. Методика применения кубических сплайнов описана в приводимых примерах. С применением кубических сплайнов можно успешно решать также другие задачи материаловедения порошков СТМ.

*Здійснено аналіз використання кубічних сплайнів в задачах дослідження властивостей порошків надтвердих матеріалів та їх застосування в інструменті. Подаються мета і отримані при цьому результати. Обговорюються специфіка та методика використання математичного апарату кубічних сплайнів в цій сфері, тематика розглядуваних задач.*

**Ключові слова:** порошки надтвердих матеріалів, кубічні сплайни, властивості, характеристики, діагностика, емпіричні математичні моделі, алмазно-абразивна обробка.

*The analysis of the use of cubic splines in problems of the properties of powders of superhard materials and their applications in the tool. Apply goal and received at the same results. We discuss the specificity of the method of mathematical apparatus of cubic splines in this area, subject the considering problem.*

**Key words:** powders of superhard materials, cubic splines, properties, characteristics, diagnosis, empirical mathematical models, diamond abrasive finishing.

#### **Литература**

1. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. – М.: Наука, 1976. – 248 с.
2. Корнейчук Н. П. Сплайны в теории приближения. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
3. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 624 с.
4. Пашенко Е. А., Лажевская О. В., Сильченко Я. Л., Клименко Н. Г. Алмазно-абразивные композиты на основе комплексных производных металлов // Сверхтвердые матер. – 2004. – № 5. – С. 34–42.
5. Богатырева Г. П., Петасюк Г. А., Петасюк О. У., Осипов А. С. Физико-механические свойства и морфометрические характеристики микропорошков природного и синтетического алмаза // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. Ин-та сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Сер. Материаловедение. – К.: Логос, 2010. – С. 52–59.
6. Петасюк Г. А. Построение численных математических моделей процессов алмазно-абразивной обработки с применением кубических сплайнов // Сверхтвердые матер. – 1996. – № 5. – С. 30–35.
7. Лавріненко В. І., Пасічний О. О., Петасюк Г. А., Смоквина В. В. До питання 3D-моделювання шорсткого шару поверхні після шліфування кругами із НТМ // Тези доп. 10 всеукр. молодіжної наук.-техн. конф. «МАШИНОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ ОЧИМА МОЛОДИХ: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (26–30 жовт. 2010 р., Суми). – Суми: Сум. держ. ун-т, 2010. – с. 77–78.
8. Определение неалмазного углерода в наноалмазах детонационного синтеза / Г. П. Богатырева, И. И. Тимофеева, Г. А. Петасюк и др. // Сверхтвердые матер. – 2011. – № 2. – С. 86–92.

*Поступила 27.03.12*