

Николаев Владимир Вениаминович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНО ЗАДАНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск 2005

Работа выполнена в Орловском государственном техническом университете.

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор *Степанов Ю.С.*

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор *Иноземцев А.Н.*

кандидат технических наук,
доцент *Подвесовский АС,*


Ведущая организация Курский государственный
технический университет

Защита состоится 26 апреля 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К212.021.01 при Брянском государственном техническом университете по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Брянского государственного технического университета.

Автореферат разослан 24 марта 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

 *Шкаберин В.А.*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы **диссертации**. Широкое использование вычислительной техники в автоматизации производственных процессов предполагает, в том числе, создание точных геометрических моделей технических объектов. В современном машиностроении, наряду с аналитически определяемыми поверхностями, распространен класс поверхностей, задаваемых системой дискретных точек или построением отдельных сечений.

От математических моделей, описывающих как сам объект проектирования, так и процессы обработки деталей в значительной степени зависит эффективность применения программных комплексов. Существующие CAD/CAM системы в основном ориентированы на использование универсальных методов аппроксимации сплайнами при построении каркасных, поверхностных и твердотельных моделей деталей машин.

Эксплуатационные свойства деталей машин существенно зависят от качества поверхностного слоя. Учитывая широкое применение процессов механической, в том числе абразивной, обработки в различных отраслях промышленности, проблема исследования и разработки методов оценки качества поверхностного слоя остается актуальной. Решение этой задачи предполагает наличие удобных для инженерных расчетов математических моделей поверхностного слоя деталей машин. Предложенный Ю.С. Степановым способ определения микрогеометрии поверхности (патент РФ №2187070) предполагает аппроксимацию поверхности в окрестности данной точки соприкасающимся параболоидом, определяемым тензором кривизны Римана-Кристоффеля.

Разработка на базе предложенной модульной геометрической модели (МГМ) численных методов параболической интерполяции позволяет создать специализированный программный комплекс для автоматизированного построения трехмерных геометрических моделей обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Диссертационная работа выполнялась в рамках исследований, проводимых при поддержке следующих грантов: грант на проведение научных исследований в ведущих научно-педагогических коллективах высших учебных заведений и научных организаций Минобробразования России (PD02-2.10-133) «Разработка модели управления процессом резания гидроабразивной струей конструкционных материалов на основе моделирования формообразования микрорельефа поверхности реза»; грант Минобробразования России по фундаментальным исследованиям в области технических наук №1278 «Разработка теории и технологии обработки сверхзвуковой гидроабразивной струей, повышающей эффективность отделочно-зачистных технологических процессов».

Целью диссертационной работы является автоматизация построения трехмерной модели шероховатой поверхности обрабатываемой детали на основе разработки численных методов параболической интерполяции дискретно заданных пространственно сложных поверхностей.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработка численного метода кусочно-непрерывной интерполяции дискретно заданной поверхности на основе МГМ, использующей соприкасающиеся параболоиды.
2. Разработка численного метода локальной параболической интерполяции дискретно заданных сечений поверхности каркасной модели изделия.
3. Создание структуры, алгоритмов и программная реализация вычислительного комплекса для автоматизации моделирования дискретно заданных поверхностей деталей машин при обязательном прохождении интерполирующей поверхности через заданную сетку точек.
4. Определение точности разработанных численных методов параболической интерполяции на основе применения созданного программного комплекса для тестовых поверхностей и при создании геометрических моделей подушек прессов влажно-тепловой обработки швейных изделий.
5. Построение трехмерных моделей шероховатых поверхностей на основе профилограмм для подтверждения эффективности применения разработанных численных методов параболической интерполяции дискретно заданных поверхностей при больших объемах экспериментальных данных.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в настоящей работе использовались методы аналитической геометрии, методы численного решения уравнений, матричной алгебры, теории вероятностей и методы аппроксимации кривых и поверхностей, применяемые в САПР. При создании программного обеспечения использовались технологии реализации графических интерфейсов и методы структурного программирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан численный метод интерполяции дискретно заданных поверхностей сложной формы на основе МГМ, использующей соприкасающиеся параболоиды, классифицируемые по тензору кривизны Римана-Кристоффеля.
2. Предложен численный метод локальной интерполяции дискретно заданных сечений поверхности отрезками парабол с сохранением непрерывности первой производной, дополняющий известные аналитические методы. Каждый отрезок определяется параметром параболы, координатами начала локальной системы координат параболы и углом поворота ее осей.
3. Разработана структура вычислительного комплекса для автоматизации расчетов макроотклонения, волнистости и шероховатости поверхностного слоя деталей машин на основе построенной трехмерной математической модели шероховатой поверхности.
4. Предложено уточнение способов параметрической оценки неровностей поверхности для использования в теоретических моделях, описывающих взаимосвязи параметров качества с условиями механической обработки.

На защиту **выносятся:**

1. Численный метод кусочно-непрерывной интерполяции дискретно заданной пространственно сложной поверхности, использующий соприкасающиеся параболоиды.

2. Численный метод представления дискретно заданных сечений поверхностей, использующий кусочно-непрерывную интерполяцию параболическими линиями.

3. Структура и алгоритмы программного комплекса для автоматизации моделирования дискретно заданных поверхностей на основе разработанных численных методов параболической интерполяции.

4. Каркасные геометрические модели подушек прессов влажно-тепловой обработки швейных изделий.

5. Результаты построения трехмерных моделей шероховатых поверхностей деталей машин по экспериментальным данным.

Практическую ценность работы составляют:

1. Программный комплекс автоматизированного построения трехмерных моделей обрабатываемых поверхностей деталей машин, обеспечивающий точное прохождение интерполирующей кусочно-непрерывной поверхности через заданную сетку точек.

2. Программное обеспечение для интерполяции дискретно заданных сечений поверхности подушек прессов влажно-тепловой обработки швейных изделий.

Реализация результатов работы. Созданный комплекс программ использовался для построения трехмерных моделей дискретно заданных поверхностей деталей машин в ЗАО "Научприбор" и ОАО "Стекломаш", при автоматизированном проектировании геометрических моделей подушек прессов в НИИлегмаш.

Апробация работы и публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах, включая две статьи в журнале "Справочник. Инженерный журнал" (2003, 2004 гг.). Результаты выполненных исследований докладывались на Всероссийской научной конференции "Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии", Международных научно-технических конференциях "Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения" (г.Орел, 2001-2004 гг.), на Международном Форуме по проблемам науки, техники и образования (г. Москва, 2002 г.) и на научно-методических семинарах ОрелГТУ (1999-2004 гг.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименования и приложений. Основная часть работы содержит 150 страниц машинописного текста, 56 рисунков и 11 таблиц. Приложения представлены на 57 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность решения проблем в области численного моделирования дискретно заданных пространственно-сложных поверхностей при механической обработке деталей машин, изложена цель, научная новизна, практическая значимость и структура работы, а также перечислены используемые методы исследования.

В первой главе рассмотрены особенности математического представления кривых и поверхностей, используемого в современных САПР. Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных работ российских и зарубежных ученых, позволяющие сформулировать цель и задачи дальнейших исследований в области моделирования пространственно-сложных поверхностей.

Геометрическая модель детали с поверхностями сложной формы может быть задана в каркасном виде - системой кривых линий или дискретном виде - координатами точек. Классические методы интерполяции кривых полиномами по достаточно большому набору точек имеют ряд недостатков, делающих их применение в ряде случаев нерациональным. Применяемые методы кусочно-непрерывной интерполяции обычно предполагают использование полиномов третьей степени и выше, обосновывая непрерывность первой производной. При этом требуется найти решение большой системы линейных уравнений, зависящей от точности определения каждого параметра. Всплайны обладают высокой универсальностью, но в исходной постановке обеспечивают интерполяцию только в двух крайних узловых точках. Их применение в современных САПР ориентировано на интерактивное решение задачи. При решении задачи обязательного прохождения сплайна через заданный набор точек используются итерационные методы. Применение NURB-сплайнов для больших наборов одинаково значимых точек нерационально. При построении каркасных поверхностей и поверхностей тензорного произведения на основе сплайнов сложности решения задачи точного прохождения интерполирующей кусочно-непрерывной поверхности через заданный набор точек значительно возрастают.

Рассмотренные методы математического моделирования сложных поверхностей не оперируют понятиями кривизны поверхности в точках каркаса. В основу данного исследования положена классификация модулей пространственно-сложных поверхностей и инструмента для их обработки по тензору Римана-Кристоффеля R_{1212} как универсального и обобщенного параметра поверхности, инвариантного к изменению системы координат. Касательная плоскость воспроизводит форму поверхности в окрестности точки касания в первом приближении. Рассчитываемый по МГМ соприкасающийся параболюид воспроизводит форму поверхности во втором приближении.

Локальная интерполяция заданного набора точек параболическими кривыми, параметры которых имеют ясный геометрический смысл, позволяет дополнить существующие методы. Численная модель, использующая кривые

второго порядка для построения модульной геометрической модели детали на основе поверхностей, образованных поступательно-вращательным движением образующих, снижает требования к возможностям станков с ЧПУ.

Вид механической обработки оказывает существенное влияние на геометрию и характер расположения единичных макро- и микронеровностей обрабатываемой поверхности, а также на физико-химические характеристики тонкого поверхностного слоя. В решении сложной проблемы оценки влияния геометрических характеристик поверхностного слоя на такие эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений, как контактная жесткость, износостойкость, герметичность, прочность посадок, большое значение может иметь создание программного комплекса для оценки параметров геометрии поверхностного слоя на основе трехмерной модели.

Значительное внимание вопросам качества поверхностного слоя уделяется при таком виде механической обработки деталей машин, как абразивная обработка. Большой вклад в разработку теории и методов абразивной обработки внесли российские ученые Е.Н. Маслов, А.В. Якимов, С.А. Попов, М.Ф. Семко, А.П. Хусу, Б.М. Базров, Ю.М. Зубарев, А.М. Дальский, О.А. Горленко, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, Ю.С. Степанов, В.Г. Гусев, Л.В. Худобин и др. Разработанные аналитические модели процессов абразивной обработки используются для оценки характеристик макроотклонений, волнистости и шероховатости. Методы представления пространственно сложных поверхностей при исследовании процессов абразивной обработки для оценки геометрических показателей качества поверхностного слоя не используются широко, в частности, из-за сложности применения. Различные существующие модели используют аппроксимацию шероховатой поверхности плоскими, цилиндрическими, коническими, параболическими поверхностями. Для дальнейшего исследования процессов механической, в том числе абразивной, обработки требуются математические методы, позволяющие точно интерполировать сетку экспериментальных точек, определяемую профилограммами.

Технология точной обработки поверхностей предполагает метод математического моделирования на основе аналитического представления обрабатываемой поверхности. Математическая модель должна охватывать широкую область обрабатываемых технологических поверхностей. Такую возможность дает применение метода модульного геометрического моделирования. Трехмерная математическая модель микрорельефа позволяет учесть влияние особенностей применяемого метода механической обработки на параметры геометрии поверхностного слоя. Получение математической модели поверхности сложной формы дает дополнительные возможности для применения вероятностных подходов к описанию процесса формирования поверхности микрорельефа при различных видах абразивной обработки.

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Повышение эффективности научных исследований в области обеспечения эксплуатационных показателей деталей машин при механической обработке связано, в том числе, с созданием математических моделей, разработ-

кой алгоритмов и специализированных вычислительных комплексов на их основе.

2. Существующие методы моделирования поверхности сложной формы не используют понятие кривизны в точках каркаса в смысле Римана-Кристоффеля. Оценка кривизны в данной точке поверхности по теореме Менье позволяет автоматизировать процесс определения типа соприкасающейся поверхности при обеспечении точного прохождения поверхности параболоида через заданную точку.

3. Математическая модель, использующая численные методы параболической интерполяции, обеспечивает точное прохождение интерполирующей кусочно-непрерывной поверхности через заданную сетку точек при обработке больших объемов экспериментальных данных для исследования особенностей микрорельефа при данном способе механической обработки.

Вторая глава посвящена разработке численных методов построения каркасно заданных пространственно-сложных поверхностей. Предложенная МГМ использует поверхности, образованные поступательно-вращательным движением кусочно-непрерывной параболической кривой. Рассмотрена численная модель интерполяции дискретно заданных кривых линий отрезками парабол. Метод обеспечивает непрерывность первой производной при переходе от одного отрезка к другому. Каждый отрезок определяется четырьмя параметрами: параметром параболы p_1 , координатами начала локальной системы координат параболы x_{o1}, y_{o1} и углом поворота осей α (рис. 1).

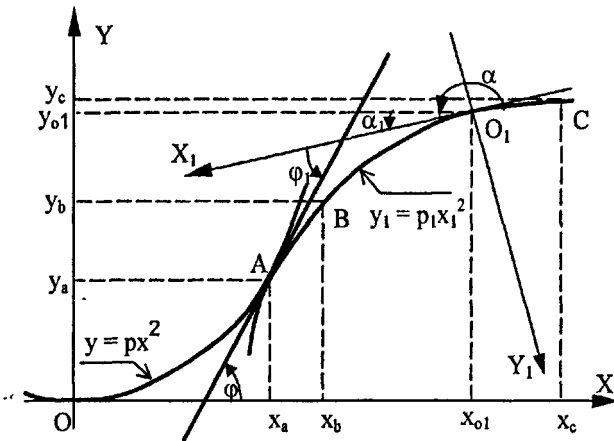


Рис. 1. Параболы, имеющие общую касательную

Алгоритм расчета параметров соприкасающейся параболы использует зависимость x_{o1} от угла α : $x_{o1} = -c/b$ и уравнение $y_{o1} = A + Bx_{o1}$, где

$$b = (\sin \alpha - B \cos \alpha)(E - A \sin \alpha) - (C - A \cos \alpha)(\cos \alpha + B \sin \alpha) + \\ + \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1)(D - A \sin \alpha)(\cos \alpha + B \sin \alpha),$$

$$c = (C - A \cos \alpha)(E - A \sin \alpha) - 0.5 * \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1)(D - A \sin \alpha)^2$$

$$A = \frac{-x_a \sin \alpha + y_a \cos \alpha - 0.5 \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1)(x_a \cos \alpha + y_a \sin \alpha)}{\cos \alpha - 0.5 \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1) \sin \alpha};$$

$$B = \frac{\sin \alpha + 0.5 \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1) \cos \alpha}{\cos \alpha - 0.5 \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1) \sin \alpha}.$$

$$C = -x_b \sin \alpha + y_b \cos \alpha; \quad D = x_b \cos \alpha + y_b \sin \alpha; \quad E = x_a \cos \alpha + y_a \sin \alpha.$$

Рассчитанные значения координат x_{o1}, y_{o1} начала локальной системы координат позволяют найти параметр параболы

$$P_1 = \frac{0.5 * \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_1)}{x_a \cos \alpha + y_a \sin \alpha - x_{o1} \cos \alpha - y_{o1} \sin \alpha}.$$

Значение целевой функции, меньшее или равное заданному значению относительной погрешности, определяет условия окончания работы алгоритма:

$$-x_c \sin \alpha + y_c \cos \alpha + x_{o1} \sin \alpha - y_{o1} \cos \alpha -$$

$$- p_1(x_c \cos \alpha + y_c \sin \alpha - x_{o1} \cos \alpha - y_{o1} \sin \alpha)^2 \leq \varepsilon$$

Для построения численной модели интерполяции замкнутых кривых разработан алгоритм построения замыкающего отрезка параболы, определяемого двумя касательными.

В соответствии с модульным принципом структурирования каркасную или дискретно заданную пространственно сложную поверхность можно аппроксимировать поверхностями, полученными поступательно-вращательными перемещениями кусочно-непрерывных параболических кривых. Разработанные математические модели позволяют создать программное обеспечение для автоматизированного построения каркасной геометрической модели обрабатываемой детали.

В третьей главе поставлена и решена задача разработки численного метода параболической интерполяции дискретно заданной поверхности, позволяющий моделировать микрорельеф поверхности при механической обработке. Геометрия реальной поверхности обрабатываемой детали характеризуется случайно расположенными или некоторым образом упорядоченными выступами и впадинами, высота которых значительно меньше их линейных размеров. Для расчета геометрических параметров шероховатости используют профилограммы, позволяющие определить микрорельеф как каркасную поверхность. МГМ, использующая соприкасающиеся параболоиды, позволяет точно интерполировать дискретно заданную пространственно-сложную поверхность микрорельефа. Параметры параболоидов зависят от оценки значения кривизны в данной точке поверхности по теореме Менье.

Аналитическое уравнение модуля параболической поверхности определяется значениями кривизны поверхности и углами между нормальными к по-

верхности в данной точке (x_i, y_j, z_j) . Алгоритм определения типа и параметров соприкасающегося параболоида:

- находятся радиусы окружностей R_x, R_y , проходящих через три точки $(x_{i-1}, z_{i-1,j}) (x_i, z_{i,j}) (x_{i+1}, z_{i+1,j})$ в плоскости $Y = y_j$, параллельной XOZ , и через три точки $(y_{j-1}, z_{i,j-1}) (y_j, z_{i,j}) (y_{j+1}, z_{i,j+1})$ в плоскости $X = x_i$, параллельной YOZ ;

- определяются уравнения касательных k_x, k_y и нормалей n_x, n_y в декартовой прямоугольной системе координат к окружностям, проходящим через данную точку;

- записывается уравнение главной нормали n_{xy} , перпендикулярной плоскости, проходящей через две касательные, пересекающиеся в точке (x_i, y_j, z_j) ;

- определяется угол Ψ между касательными в пространстве и углы φ_1, φ_2 между нормальными n_x, n_y и главной нормалью n_{xy} ;

- по теореме Менье рассчитывается нормальная кривизна $k_1 = \cos \varphi_1 / R_x$ в сечении $Y = y_j$ и нормальная кривизна $k_2 = \cos \varphi_2 / R_y$ в сечении $X = x_i$;

- в зависимости от знака и значения k_1, k_2 определяется тип соприкасающегося параболоида (эллиптический параболоид, гиперболический параболоид, параболический цилиндр или плоскость), определяемого уравнением

$$k_1 X'^2 + k_2 Y'^2 = 2Z';$$

- рассчитываются углы поворота локальной системы координат $X'Y'Z'$ параболоида: $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ - углы, образованные осью X' , $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ - осью Y' , $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ - осью Z' с прежними осями X, Y, Z .

Математическая модель построения соприкасающегося параболоида позволяет рассчитать значение высоты аппроксимированной простран-

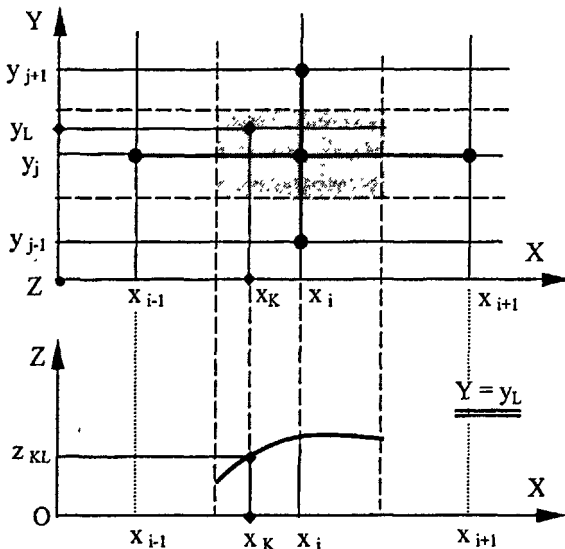


Рис. 2. Определение высоты микрорельефа в произвольной точке x_K, y_L

венно-сложной поверхности в любой произвольной точке. Алгоритм нахождения значения Z_{KL} в некоторой точке (x_K, y_L) следующий:

- для всех точек сетки дискретно заданной поверхности определяются типы и параметры соприкасающихся параболоидов МГМ;

- по координатам (x_i, y_i) определяется, в окрестность какой расчетной точки (x_i, y_i, z_i) попадает данная точка (рис.2);

- по значениям (x_i, y_i) для рассчитанного типа параболоида находится значение высоты Z_{KL} аппроксимируемой пространственно-сложной поверхности. С учетом переноса начала локальной системы координат параболоида и поворота его осей значение высоты $z_{KL} = z_y + z$, где z - решение уравнения

$$(0.5k_1b^2 + 0.5k_2d^2)z^2 + (k_1ab + k_2cd - f)z + (0.5k_1a^2 + 0.5k_2c^2 - e) = 0,$$

где $a = x \cos \alpha_1$; $b = \cos \alpha_3$; $c = x \cos \beta_1 + y \cos \beta_2$; $d = \cos \beta_3$;

$$e = x \cos \gamma_1 + y \cos \gamma_2$$
; $f = \cos \gamma_3$.

МГМ также позволяет моделировать поверхность, дискретно заданную в сферических координатах. В этом случае каждая точка поверхности определяется двумя углами φ, α и радиусом R . Предложенная методика учитывает особенности расчетов, связанные с замыканием поверхности.

В четвертой главе приведены конкретные примеры применения программного комплекса, использующего разработанные численные методы, для моделирования дискретно заданных пространственно-сложных поверхностей.

Точность алгоритма интерполяции дискретно заданных кривых отрезками парабол с сохранением непрерывности первой производной проверялась на тестовых примерах, имеющих известное решение. Расчеты, проведенные для различных наборов исходных данных, показали возможность определения параметров с требуемой относительной погрешностью.

Для случая тестовых сложных кривых линий решались задачи автоматизированной кусочно-непрерывной интерполяции по набору узловых точек, определенных пользователем, на основе разработанной численной модели. Графический вывод результатов расчетов для двух характерных случаев представлен на рисунке 3.

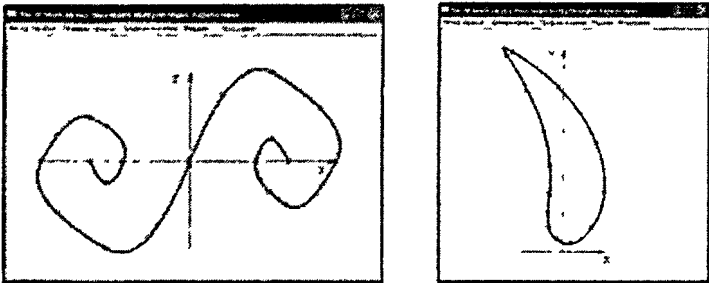


Рис. 3. Результаты работы программы интерполяции дискретно заданных сложных кривых линий

Точность расчета параметров для всех отрезков парабол одинакова. Все координаты исходных точек задаются в единой глобальной системе координат. Глобальные координаты точек, определяющих параболу, соприкасающуюся с данной, пересчитываются для локальной системы первой параболы. После расчета второй параболы ее параметры пересчитываются обратно в глобальную систему координат.

Детали с поверхностями сложной формы могут иметь переменную кривизну как в поперечных - по ширине детали, так и продольных - по высоте детали - расчетных сечениях. Расчетные сечения обычно повернуты относительно оси детали и имеют переменный угол закрутки по длине детали. При формообразовании пространственно-сложных поверхностей важной технологической задачей является обеспечение плавности всего профиля детали.

На основе методики интерполяции дискретно заданных сечений поверхности отрезками парабол, были произведены численные расчеты геометрических моделей подушек для прессов влажно-тепловой обработки швейных изделий. С рабочих чертежей подушек были сняты координаты опорных точек, позволившие рассчитать каркасную геометрическую модель изделия на основе МГМ.

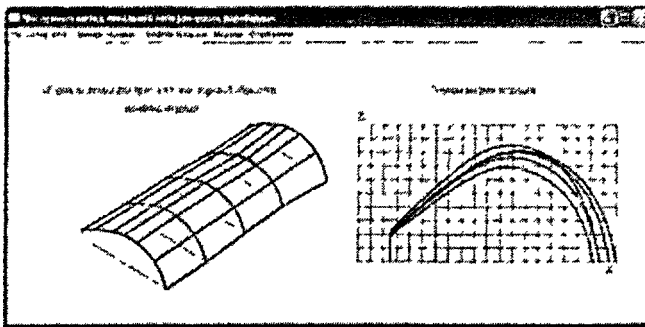


Рис 4 Компьютерный расчет сечений поверхности подушки для пресса влажно-тепловой обработки швейных изделий

Аналитически поверхность рабочей части подушки представлена совокупностью уравнений с заданием координат точек, в которых происходит гладкая сшивка отрезков парабол, образующих профиль в данном сечении.

Точность предложенного метода построения трехмерной модели поверхности детали зависит от погрешности используемых экспериментальных данных и от точности предложенной математической модели.

Реализованная МГМ микрорельефа основана на кусочно-непрерывном представлении поверхности параболическими модулями. Модель обеспечивает точную интерполяцию в средней точке x_j, y_j, z_j расчетной области (рис 2) и аппроксимацию в четырех крайних точках. Для оценки точности математической модели были проведены расчеты относительной погрешно-

сти аппроксимации тестовых данных, соответствующих всем типам соприкасающихся параболоидов. Результаты проведенных расчетов показали, что в случае, если пять экспериментальных точек лежат на плоскости, погрешность равна нулю. Для эллиптического и гиперболического параболоидов и параболического цилиндра погрешность расчета поверхности в крайних точках зависит от их расположения относительно центральной точки. Построенные графики зависимостей показывают уменьшение относительной погрешности аппроксимации при увеличении разности значений высот микрорельефа, используемых для построения единичного модуля МГМ. Это объясняется более точным определением увеличивающегося радиуса кривизны поверхности соприкасающегося параболоида в расчетной точке в случае поворота его осей. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что при выполнении условий применимости численной модели относительная погрешность расчета высоты рельефа в крайних точках не более 2%.

При необходимости обеспечения непрерывности первой производной на границах между параболоидами разработан алгоритм сглаживания, использующий модификацию аналитического метода параболической интерполяции. Алгоритм использует построение вспомогательной параболы между вершинами соседних параболоидов и средней точкой на границе и ее линейную комбинацию с соответствующими сечениями параболоидов. Гладкая сшивка параболоидов проводится по осям X и Y , что обеспечивает требуемую непрерывность первых производных.

Исследование возможностей программного комплекса, реализующего разработанную численную модель построения поверхностей сложной формы, проводилось для различных видов дискретно заданных поверхностей. Исходная сетка высот рельефа размером $N_x \times N_y$ задавалась числами в вещественном формате, сохраненными в текстовом файле формата .TXT. Использование данного способа хранения данных дает возможность непосредственной корректировки задаваемых значений пользователем, а также позволяет решить проблему совместимости форматов представления данных при передаче информации между программами, созданными разными разработчиками. Знаки пробелов, табуляции, конца и перевода строки являются разделителями между числами. Поскольку при считывании файла программа производит распознавание целых и вещественных чисел, выделяя цифры и знак десятичной точки, допустимы текстовые комментарии. Количество считанных данных должно соответствовать заданным значениям, в противном случае программа выводит сообщение об ошибке при вводе исходных данных.

Анализ результатов моделирования для различных наборов тестовых данных показал возможность применения разработанной численной модели в производстве для автоматизированного построения трехмерных моделей шероховатых поверхностей деталей машин.

Структурно-функциональная схема разработанного вычислительного комплекса, использующего предложенные численные методы параболиче-

ской интерполяции дискретно заданных поверхностей и алгоритмы на их основе, представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Структурно-функциональная схема программного комплекса построения трехмерной модели шероховатой поверхности

На основе заданного дискретного представления поверхности сложной формы рассчитывается трехмерная математическая модель кусочно-непрерывной поверхности, использующая соприкасающиеся параболоиды.

Расчеты, проведенные для тестовых поверхностей, подтвердили возможность построения пространственно сложной интерполирующей поверхности, точно проходящей через заданную сетку точек. Графический вывод программы в виде сетки линий размером $M_x \times M_y$ ($M_x \gg N_x$, $M_y \gg N_y$) для некоторых характерных видов поверхности представлен на рисунке 6. Исходный текст программных модулей на языке Си++ дан в приложениях.

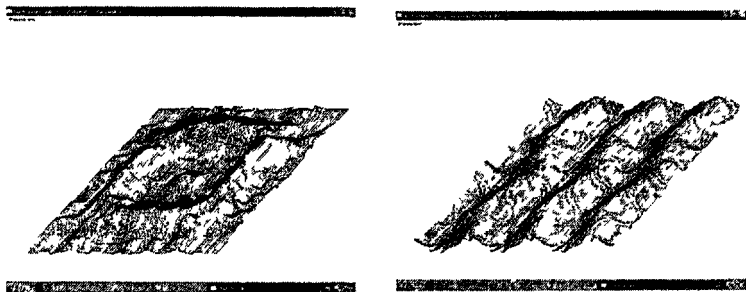


Рис. 6. Визуализация трехмерных математических моделей шероховатых поверхностей

В результате экспериментов, проведенных с использованием измерительно-вычислительного комплекса для оценки геометрического состояния поверхностного слоя деталей машин, были сняты профилограммы поверхностей деталей, изготовленных из стали 45. Образцы подвергались абразивной обработке кругом зернистостью 40, диаметр круга 350 мм. Глубина шлифования составляла 20 мкм.

На рисунке 7 показан небольшой участок сечения трехмерной модели поверхности, построенной по 26 профилограммам. Графическое моделирование поверхности позволяет выявить характерные особенности геометрии поверхностного слоя и их изменение для различных режимов обработки.

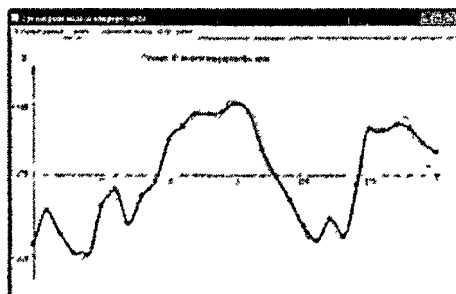


Рис. 7. Компьютерное моделирование сечения трехмерной поверхности

Для оценки точности полученной математической модели параметры шероховатости R_a , R_z , R_{max} , рассчитанные по экспериментальным профило-

граммам, сравнивались с параметрами соответствующих сечений трехмерной модели. Относительная погрешность расчета параметров по модели составила менее 3% для сетки 400*1000 точек с шагом 6 мкм.

Сечение трехмерной модели микрорельефа горизонтальной плоскостью на разных уровнях позволяет выявить характерные особенности микрорельефа, построить опорную кривую для всей модели, определить форму и размеры единичных неровностей, построить профилограмму в интересующем сечении. Это имеет особое значение для поверхностей с наклонным или перекрывающимся микрорельефом обработанной поверхности без явно выраженного направления микронеровностей (рис.8,9).

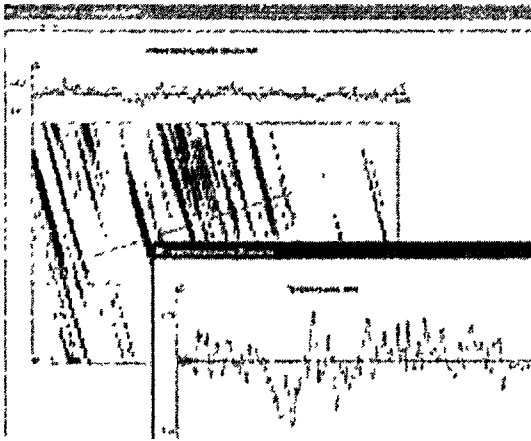


Рис. 8. Сечение трехмерной модели микрорельефа горизонтальной плоскостью и построение профилограммы в сечении

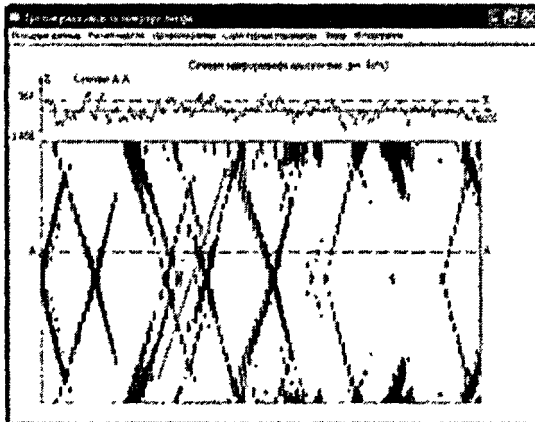


Рис. 9. Сечение трехмерной модели поверхности с пересекающимся микрорельефом горизонтальной плоскостью (сечение и вид сверху)

Программа позволяет определить форму и размеры единичных микрорельефов. На основе разработанного вычислительного комплекса для расчета показателей геометрии поверхности определены опорные кривые и относительные опорные плоскости, объемы зазоров для различных шероховатых поверхностей.

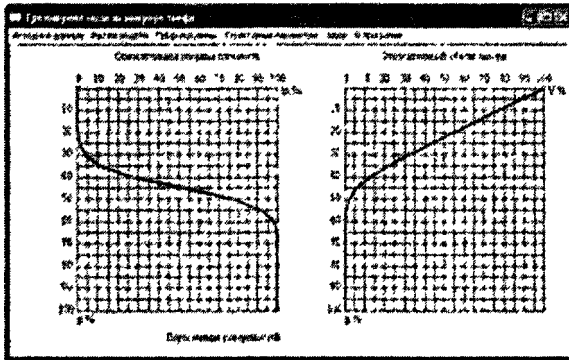


Рис.10. Графики относительной опорной плоскости и изменения объема зазора при сечении трехмерной модели горизонтальной плоскостью

Математическое моделирование трехмерного микрорельефа поверхностного слоя позволяет автоматизировать процесс определения характеристик шероховатой поверхности для прогнозирования влияния геометрических характеристик качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан численный метод параболической интерполяции дискретно заданных поверхностей. Модель использует понятие соприкасающегося параболоида, имеющего в заданной точке ту же кривизну, что и аппроксимируемая поверхность. Численная модель позволяет определить тип и параметры соприкасающегося параболоида и углы наклона осей его локальной системы координат.

2. Разработан численный метод кусочно-непрерывной параболической интерполяции дискретно заданного сечения поверхности, дополняющий известные аналитические методы. Углы наклона осей локальных систем координат парабол обеспечивают непрерывность первой производной для кривой. Модель позволяет реализовать построение дискретно заданных сложных кривых линий переменной кривизны.

3. Для геометрической модели поверхности сложной формы сформулированы и получены условия гладкой сшивки двух поверхностей, образованных

винтовым перемещением плоской кусочно-непрерывной параболической кривой с изменяющимися параметрами.

4. Реализована программа построения трехмерной модели микрорельефа обрабатываемой поверхности детали по экспериментальным профилограммам на основе предложенных численных методов параболической интерполяции и исследована точность полученной математической модели на примере определения геометрических характеристик поверхностного слоя.

5. Результаты моделирования подтверждают эффективность применения разработанных численных методов параболической интерполяции для построения интерполирующей кусочно-непрерывной пространственно-сложной поверхности, обязательно проходящей через заданную сетку точек, при обработке больших объемов экспериментальных данных.

6. Получены геометрические модели подушек прессов влажно-тепловой обработки швейных изделий, выпускаемых НИИлегмаш (г.Орел). Результаты расчетов подтверждают применимость разработанных численных методов параболической интерполяции и позволяют автоматизировать процесс расчета сечений для различных типоразмеров подушек, сократив время на проектирование на 10%. Геометрическая модель изделия также используется для расчета деформации подушки при знакопеременном температурном воздействии.

7. Предложенный численный метод параболической интерполяции дискретно заданных сечений поверхности реализован в виде программы, позволяющей получить аналитическую модель траектории движения инструмента при гидрообработке. Повышение производительности процесса резания конструкционных материалов составило 12% в производственных условиях ОАО Орловский завод "Стекломаш".

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Степанов Ю.С., Николаев В.В. Численный метод интерполяции дискретно заданных поверхностей соприкасающимися параболами // Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии. Матер. Всерос. науч. конф. Орел, 2004. С. 193-196.

2. Николаев В.В. Численный метод параболической интерполяции дискретно заданной линии // Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии. Матер. Всерос. науч. конф. Орел, 2004. С.141-144.

3. Белкин Е.А., Николаев В.В. Моделирование тепловых полей при абразивном шлифовании в рамках теории микроформообразования // Справочник. Инженерный журнал, 2004. №9. С.5-8.

4. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Николаев В.В. Моделирование тепловых полей при абразивном шлифовании в рамках теории микроформообразования. Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения

- Технология - 2004. Матер, междунар. науч.-техн. конф. // Известия Орел-ГТУ. Серия "Машиностроение. Приборостроение", 2004. N4. С.32-34.

5. Барсуков Г.В., Белкин Е.А., Николаев В.В., Первых И.П. Моделирование топографии поверхности при гидроабразивной обработке // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология - 2003. Матер, междунар. науч.-техн. конф. Орел, 2003. С.303-307.

6. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Белкин Е.А., Николаев В.В. Разработка численного аппарата для оценки шероховатости поверхностного слоя деталей машин // Справочник. Инженерный журнал, 2003. №9. С. 61-64.

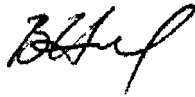
7. Белкин Е.А., Барсуков Г.В., Николаев В.В. Численное моделирование реального микрорельефа абразивного зерна // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология - 2002: Матер, междунар. науч.-техн. конф. Орел, 2002. С.5-9.

8. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Белкин Е.А., Николаев В.В. Обобщенная математическая модель комплексного анализа формирования геометрических параметров качества поверхности деталей машин после плоского шлифования // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. Т.2. М.: Академия наук о Земле, 2002. С. 111.

9. Белкин Е.А., Барсуков Г.В., Николаев В.В. Численное моделирование реального микрорельефа поверхностного слоя деталей машин // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология - 2001. Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Орел, 2001. С.5-11.

10. Николаев В.В. Об использовании априорной информации для определения нижней оценки надежности конструкции // Несущая способность и долговечность конструкций: Сб. науч. тр. АН УССР. Ин-т техн. механики. Киев: Наук, думка, 1990. СП 1-115.

05.12 - 05.13



Николаев Владимир Вениаминович

Моделирование дискретно заданных поверхностей на основе
численных методов параболической интерполяции

Автореферат

Подписано к печати 11.03 2005г.
Тираж - 100 экз Объем 1 п.л.
Заказ № 09/05М

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
Орловского государственного технического университета
Адрес 302020, г.Орел, Наугорское шоссе, 29

22 АПР 2005

