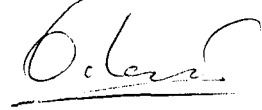


На правах рукописи



КОРОЛЕВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ ИЗ  
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОЛОВНОГО АНТЕННОГО  
ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА)**

Специальность 05.13.06. – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (в машиностроении)

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва 2010

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Технологии машиностроения металлорежущих станков и инструментов» инженерного факультета в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН), г. Москва.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Рогов В.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор

Левин А.И.

доктор технических наук,  
профессор

Куликов М.Ю.

Ведущее предприятие: ОАО ЦКБ «СПЕЦРАДИОМАТЕРИАЛОВ», г. Москва

Защита состоится 22 июня 2010 г. в 13 час. на заседании диссертационного совета Д 212.203.16 при Российском университете дружбы народов по адресу:  
113090, Москва, Подольское шоссе, дом 8/5 ауд. 109

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

Автореферат разослан 19 мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Соловьев В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современном машиностроении все более широкое применение находят детали, изготовленные из композиционных материалов с различными матрицами и наполнителями, из керамики, полимеров и т.д. Предъявляются и особые требования к качеству обработанного поверхностного слоя (жесткие требования к наличию микротрещин, остаточная деформация, знак напряжений и др.). Очень часто такие детали имеют сложную форму, представляющую сочетание нескольких фасонных поверхностей, и при этом обладают малой жесткостью, например, могут быть выполнены в виде тонкостенных оболочек. Так, при обработке керамических деталей в виде оболочек двойной кривизны необходимо обеспечивать шероховатость обработки  $R_a$  не более 1 мкм и точность линейных размеров не ниже 7 – го качества.

Отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по способам и условиям обработки фасонных деталей из керамических материалов, выбору рациональных характеристик абразивных инструментов и режимов шлифования, не позволяют обеспечивать требуемые точность и качество поверхности.

В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к точностным параметрам обтекателей летательных аппаратов из керамических материалов, и большими трудностями получения этих обтекателей на существующих универсальных копировальных станках настоящая работа, направленная на автоматизацию технологического процесса механической обработки, контроля, нового оборудования для механической обработки оболочек, повышение точности обработки и доводки профиля стенки, является актуальной и своевременной.

**Цель работы.** Повышение эффективности и качества механической обработки оболочек двойной кривизны из керамических материалов за счет автоматизации технологического процесса их изготовления и контроля.

**Методы исследования.** Все разделы работы выполнены с единых методологических позиций с использованием основных положений технологии машиностроения, теории резания, теории шлифования материалов, теории моментных оболочек вращения, дифференциального и интегрального исчислений, с использованием численно-аналитических методов вычислительной математики, теории вероятности и математической статистики, основ математической теории эксперимента.

В исследовании применялось компьютерное моделирование с использованием современного программного обеспечения и средств вычислительной техники.

Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях с использованием промышленного оборудования и современных измерительных средств.

Обработка результатов экспериментов осуществлялась с применением современных компьютерных и цифровых технологий.

### **Научная новизна работы состоит в том, что:**

Разработана методика управления перемещением инструмента, позволяющая в автоматическом режиме позиционировать ось вращения шлифовального круга параллельно касательной к поверхности оболочки в зависимости от кривизны поверхности.

Разработана методика активного контроля и измерения действительных размеров наружной поверхности детали типа оболочка.

На основании разработанного метода активного контроля реализовано автоматизированное устройство активного контроля, позволяющее осуществлять контроль отклонения наружной поверхности оболочки, не снимая заготовку со станка. На разработку подана заявка на Патент (№ 2010 102 653 от 26.01.2010).

Создана математическая модель технологического процесса механической обработки оболочки, позволяющая определить рациональные режимные параметры резания на стадии проектирования, необходимые для обеспечения максимальной производительности.

На основе разработанных оригинальных технологических схем, устройств, методик моделей был реализован автоматизированный комплекс механической обработки активного контроля оболочек двойной кривизны из керамических материалов.

**Практическая ценность.** По результатам исследований на основе существующих теоретических подходов разработан и изготовлен автоматизированный комплекс механической обработки и активного контроля оболочек двойной кривизны из керамических материалов, повысивший точность механической обработки за счет введения активного контроля в процессе обработки и системы адаптивного управления позиционирование инструмента.

**Апробация.** Наиболее значимые результаты, полученные в ходе работы и диссертацией, доложены на следующих конкурсах и конференциях:

Конкурс научных работ молодых учёных и специалистов ФГУП «ОНПП «Технология» Обнинск, 2007.

Областной конкурсе профессионального мастерства среди молодых специалистов профессии «Инженер – технолог промышленного производства». *Диплом за 3-е место* Калуга, 2008.

Областной конкурсе профессионального мастерства среди молодых специалистов профессии «Инженер – технолог промышленного производства». Калуга, 2009.

Конкурс научных работ молодых учёных и специалистов ФГУП «ОНПП «Технология» *Диплом за 2-е место*. Обнинск, 2009.

XVIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск, 2007.

Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2008.

Вторая всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2009

Международная научно – практическая конференция «Инженерные системы – 2010» Москва, 2010.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 6 работ, в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК. Подана 1 заявка на патент.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, 4 главы заключение, список использованных библиографических источников (117 наименований) Общий объем текста диссертации 146 страницы, в него включены 76 рисунков, 13 таблиц, 5 формул).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана ее направленность, сформулированы основные цели исследования, даётся её общ-характеристика работы.

**В первой главе** представлен обзор работ, посвященных проблемам механической обработки деталей из керамических материалов в области точности и качеств криволинейных, фасонных поверхностей детали. Рассмотрены особенности и технические характеристики керамических материалов, приведены требования, предъявляемые инструменту для их обработки. Проанализированы основные физические процессы сопровождающие механическую обработку керамических материалов. Отмечено, что, результате процесса механической обработки шлифованием поверхностные слои испытывают со стороны зерен алмазного инструмента циклические динамические нагрузки условиях всестороннего сжатия, приводящие к накоплению усталостных повреждений последующему разрушению деформируемых микрообъемов поверхностных слоев.

Рассмотрены виды механической обработки и технологический процесс изготовления оболочек двойной кривизны из керамических материалов. Приведён анализ оборудования для обработки деталей с криволинейными, фасонными поверхностями. Рассмотрены схем

обработки на станках оснащённых копируемыми системами, СЧПУ. Представлена структура автоматизированного производства с применением гибких производственных модулей и информационных технологий.

На основе анализа и обобщения литературных данных сформулирована цель и определены следующие задачи исследования:

- разработать новые методы обработки деталей с применением автоматизированных систем, станков с ЧПУ;
- разработать новые методы контроля геометрии формы оболочек, позволяющие контролировать геометрию обрабатываемой детали в процессе обработки, не снимая ее со станка;
- разработать теоретические положения и методику по корректировке режимов резания (подачи и глубины резания) по критерию точности механической обработки оболочки (геометрия контура и толщина стенки);
- подтвердить правильность и работоспособность методик контроля, методики автоматизированного управления режимами резания и корректировки режимных параметров резания в производственных условиях;
- разработать и создать автоматизированный комплекс механической обработки и активного контроля оболочек двойной кривизны из керамических материалов.

Во второй главе диссертации были разработаны общие методологические принципы создания многоуровневой конструкторско-технологической и измеряемой модели детали типа оболочка вращения.

Рассмотрена методика проектирования конструкторской теоретической модели детали типа оболочка вращения, в которой конструкторская теоретическая модель фасонного изделия представляет собой геометрическую виртуальную модель, воссозданную с чертежа на основе сплайн геометрии с использованием САПР (например, САПР AutoCAD).

Для создания конструкторской теоретической модели изготовления оболочки типа тело вращения применялась теория моментных оболочек вращения. На базе конструкторской модели разрабатывались ассоциативно- связанные с ней рабочие чертежи детали, оснастки для ее изготовления, управляющие программы для оборудования с ЧПУ.

При создании измеряемой модели был проведен анализ существующих методов измерения и контроля геометрии формы оболочки и сделан вывод, что обеспечение качества выпускаемой продукции в современном производстве невозможно без автоматизированных систем активного контроля.

Для создания измеряемой модели детали был разработан метод активного контроля и измерения геометрии формы оболочки. На рисунке 1 представлена схема контроля наружного контура оболочки.

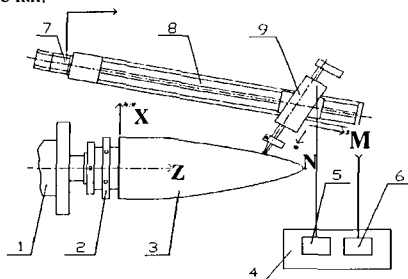


Рисунок 1 - Схема контроля наружного контура оболочки

- 1 - шпиндель станка; 2 - оправка; 3 - оболочка; 4 - промышленный компьютер;
- 5 - интерфейсная плата; 6 - интерфейсная плата; 7 - энкодер сервопривода;
- 8 - модуль перемещения ШВП; 9 - датчик линейного перемещения Newall.

В работе представлена разработанная методика контроля геометрических параметров наружного контура оболочки, приведен алгоритм расчета координат наружного контура подробно описан математический аппарат разработанного программного обеспечения.

Для расчета абсолютных значений радиусов наружной поверхности сканировал массив координат  $[M, N]$  центра щупа датчика Newall. Далее полученный массив фильтровали методом скользящего среднего (Moving Average - MA) (1):

$$MA = \frac{\sum_{i=1}^n N_i(M_i)}{n} \quad (1)$$

где:  $N(M)$  – ряд значений массив координат  $[M, N]$  центра щупа датчика,  
 $n$  – размер окна (количество точек).

Далее выполняли преобразование системы координат. Координаты наружного контура оболочки исчислялись в косоугольной системе координат (СК) устройства  $(M, N)$ . Для определения геометрических параметров контура в СК детали  $(Z, X)$  применялись формулы преобразования координат (2):

$$\begin{cases} Z = M \cdot \cos(\gamma) - N \cdot \cos(\beta) + Z_0 \\ X = -M \cdot \sin(\gamma) - N \cdot \sin(\beta) + X_0 \end{cases} \quad (2)$$

где:  $\gamma, \beta$  – углы наклона осей  $N, M$  к оси  $Z$  соответственно,  
 $Z_0, X_0$  – смещение начала СК устройства относительно СК детали.

С помощью метода аппроксимации полиномами 1-го и 2-го порядка (3) сглаживали отклонения исходных данных.

$$p(z) = a_2 z^2 + a_1 z + a_0 \quad (3)$$

Критерием выбора полинома являлась сумма возведенных в квадрат отклонений для всех заданных точек (4). Отклонения показывают, на сколько значения  $p(z)$ , вычисленные заданных точках, отличаются от значений  $f(z)$  для этих же точек. Метод наименьших квадратов минимизирует относительно коэффициентов полинома  $p(z)$  выражение:

$$S = \sum_{i=0}^k \delta_i^2 = \sum_{i=0}^k [a_2 z_i^2 + a_1 z_i + a_0 - f_i]^2 \quad (4)$$

Разработанный алгоритм системы управления устройством позволяет пользователь выполнить настройку алгоритма аппроксимации полинома. Пользователь может выбрать: степень полинома для аппроксимации исходного набора данных: 1-го порядка или 1-го и 2-го порядка, задать максимальную и минимальную длину линии или параболы (количество точек), определить предельное отклонение  $\delta_i$ .

Затем выполняли расчет координат точки касания щупа датчика с поверхностью оболочки (5):

$$\begin{cases} Z_k = Z_m - r \cdot \sin\left(\frac{1}{k}\right) \\ X_k = X_m - r \cdot \cos\left(\frac{1}{k}\right) \end{cases} \quad (5)$$

где:  $r$  – радиус щупа датчика,  
 $k$  – угловой коэффициент касательной.

Таким образом, разработанный алгоритм программного обеспечения позволял рассчитать абсолютные значения радиусов наружной поверхности оболочки.

На рисунке 2 представлены графики погрешности измерения устройства при контроле эталонной оболочки с поперечными поверхностями диаметров цилиндров:

$$D_1 = 300 \text{ мм}, D_2 = 40 \text{ мм}.$$

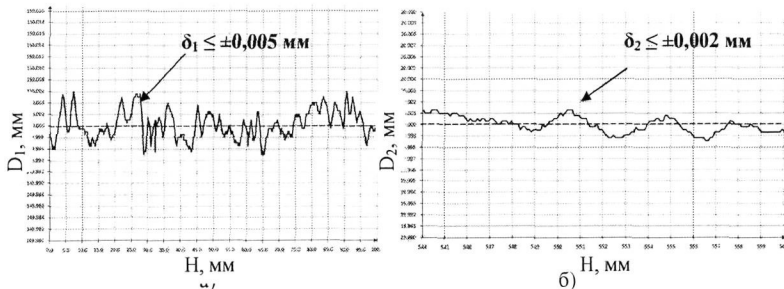


Рисунок 2 – Погрешность ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ) измерения эталонных диаметров:

а) при измерении диаметра  $D_1$ ; б) при измерении диаметра  $D_2$ ;

Предельную погрешность устройства ( $\Delta$ ) определяли по формуле

$$\Delta = \sqrt{(\delta_{сис}^2 + \delta_u^2)} \quad (6)$$

где:  $\delta_{сис}$  - систематическая погрешность измерения,

$\delta_u$  - случайная погрешность измерения эталонного диаметра.

Таким образом, предельная погрешность ( $\Delta$ ) устройства активного контроля геометрии наружного контура оболочки:

$\Delta \leq \pm 0,003$  мм - при измерении диаметров до 100 мм

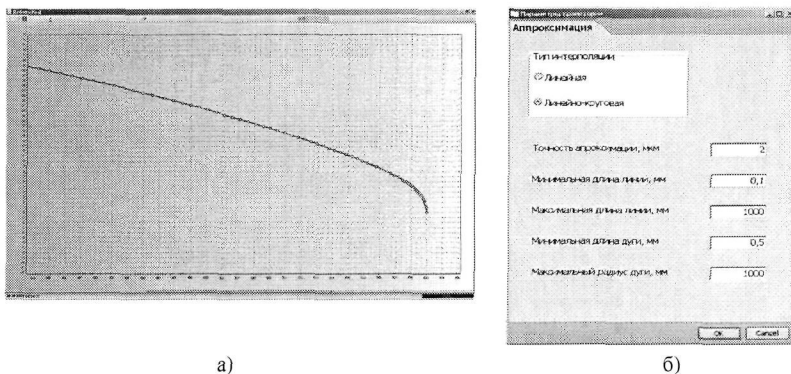
$\Delta \leq \pm 0,006$  мм - при измерении диаметров от 100 до 300 мм

В работе представлена разработанная методика проектирования технологической модели детали типа оболочка вращения, рассмотрена созданная САМ – система. Для автоматизации разработки УП была создана САПР - система Radome CAM, состоящая из двух модулей:

– Radome Post – постпроцессора, *геометрическая информация УП* (координаты опорных точек траектории, величины перемещения режущего инструмента, координаты исходной точки движения режущего инструмента и т.д.).

– Radome Simulation – математическая модель технологического процесса механической обработки, *технологическая информация УП* (режимные параметры).

В работе представлено разработанное на языке C++ в среде Builder 6 программное обеспечение (рисунок 3).



а)

б)

Рисунок 3 – Интерфейс программы Radome Post:

а) вид главного окна с построенной траекторией движения инструмента; б) окно настроек.

В работе описан алгоритм работы программы Radome Post (рисунок 4).

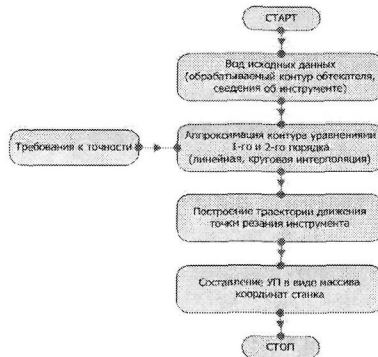


Рисунок 4 - Общая блок-схема алгоритма постпроцессора Radome Post. Контур облоочки задавался аналитическим способом, в виде полинома, набором функций вида:

$$\begin{cases} x_1 = f_1(z), & z_0 \leq z < z_1 \\ x_2 = f_2(z), & z_1 \leq z < z_2 \\ \dots \\ x_n = f_n(z), & z_{n-1} \leq z < z_n \end{cases} \quad (7)$$

или массивом координат точек  $(z, x)$ .

Аппроксимация функций заключалась в приближенной замене заданной функции  $f(x)$  некоторой функцией  $\Phi(x)$  так, чтобы отклонение функции  $\Phi(x)$  от  $f(x)$  в заданной области было наименьшим. При разработке САМ системы был применён локальный вид интерполяции многочленами 1-й и 2-й степени. Формула линейной интерполяции алгебраическим двучленом  $P_1(x) = ax + b$  функции  $f$ , заданной в двух точках  $x_0$  и  $x_1$  отрезка  $[a, b]$  имеет вид:

$$f(x) \approx y = P_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (8)$$

В случае *квадратичной интерполяции* в качестве интерполяционной функции на отрезке  $[a, b]$  принимался квадратный трехчлен  $y = aix^2 + bix + ci$

Результат проведенной аппроксимации контура – набор линий и дуг заданными каноническими параметрами. Для прямой линии в качестве канонических были приняты параметры  $(k, b)$  её уравнения с угловым коэффициентом. Для дуги окружности – координаты центра и радиус  $(x, y, R)$ .

Построение математической модели ТП заключалось в установлении зависимости производительности процесса механической обработки облоочки (затраченное время) от режимных параметров. Общий вид окна программы Radome Simulation (рисунок 5)

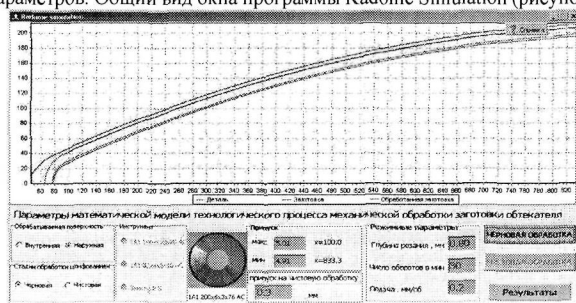


Рисунок 5 - Вид окна Radome Simulation



Исходными данными для построения контура детали и заготовки являются конструкторская документация (чертежи). При этом в чертеже контуры задаются в аналитическом виде. Контур каждой поверхности задавался аналитически.

$$\begin{cases} 77,739 \leq X \leq 96,279 \\ Y = -4,302 \times 10^{-13} + (\sqrt{28,2605^2 - \sqrt{(X-106)^2}}) \\ 96,279 \leq X \leq 165,982 \\ Y = (-3,278 \times 10^{-4}) \times X^2 + 0,485 \times X - 17,158 \\ 165,982 \leq X \leq 373,279 \\ Y = (-2,55 \times 10^4) \times X^2 + 0,465 \times X - 15,719 \\ 373,279 \leq X \leq 650,279 \\ Y = (-2,466^{-4}) \times X^2 + 0,456 \times X - 13 \\ 650,279 \leq X \leq 929 \\ Y = (-2,431^{-4}) \times X^2 + 0,451 \times X - 12,468 \end{cases} \quad (9)$$

Данные интерполяционные функции второго порядка описывают контур оболочки с точностью не менее 0,01 мм. Таким же образом задавались остальные контуры.

В модели был реализован алгоритм расчета основного машинного времени. Исходными данными являлись следующие параметры: глубина резания  $t$ , подача  $s$  и скорость резания  $v$ .

$$t_o = (L / S_m) * I = [(l + y + \Delta) / (S * n)] * I \quad (10)$$

где:  $L$  – длина прохода, мм;  $S_m$  – минутная подача, мм/мин;  $i$  – число проходов (рабочих ходов);  $l$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $y$  – длина врезания (подхода инструмента), мм;  $\Delta$  – длина перебега инструмента, мм;  $S$  – подача, мм/об или мм/дв.ход;  $n$  – частота вращения, об/мин, или число двойных ходов в минуту.

Режимы резания выбирают таким образом, чтобы была обеспечена наибольшая производительность процесса механической обработки с обеспечением заданных в чертеже допусков.

Результат работы программы – файл с таблицей результатов расчетов. В заголовке таблицы указываются: название изделия, № технологического процесса, № чертежа и наименование промоделированного процесса. Далее следует детальное отображение каждой операции, перехода технологического процесса с указанием количественных характеристик режимных параметров и затраченного времени на каждую процедуру. Анализируя данные, представленные в итоговой таблице, технолог получает информацию о каждом проходе: длина прохода, значения режимных параметров, затраченное время. Также в таблице выводится суммарное время, затраченное на каждый переход.

Созданное устройство активного контроля геометрии наружного контура оболочки позволяло измерять профиль шлифовального круга в процессе механической обработки (рисунок 6). Во второй главе работы представлена разработанная методика контроля формы профиля шлифовального круга.

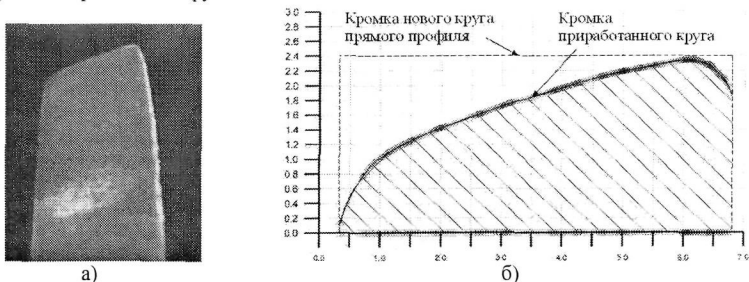


Рисунок 6 - Профиль режущей кромки круга  
а) общий вид профиля; б) измеренный профиль режущей кромки

В процессе обработки заготовки оболочки с помощью автоматизированного устройства контроля проводили измерение профиля режущей кромки инструмента. Полученный массив координат  $[X_n, Y_n]$  передавался в САПР УП **Radome CAM**. Далее полученные измерения  $[X_n, Y_n]$  аппроксимировались полиномом 8-го порядка. Затем находили производные в каждой точке функций профиля режущей кромки круга и контура оболочки. Равенство значений производной в точке контура оболочки  $X_k$  значению производной интерполяционной функции в точке профиля кромки  $X_k$  означало, что в точке контура  $X_k$  будут соответствовать координаты точки резания на профиле круга  $X_k$ . Таким образом, находились массивы коррекции на смещение координаты точки резания. Далее в постпроцессоре **Radome Post** массивы коррекции учитывались при расчете УП (рисунок 7).

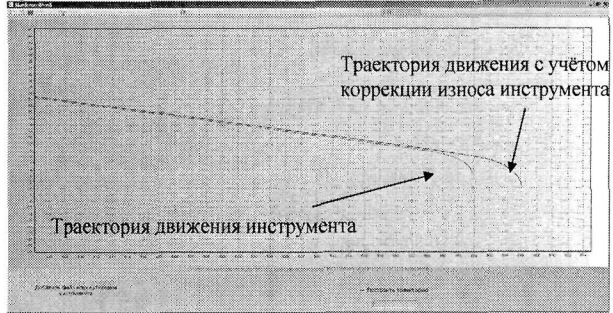


Рисунок 7 - Отображение построенной траектории в постпроцессоре **RadomePost**

Разработанное программное обеспечение САПР УП позволяет также составлять файлы УП для управления перемещением по трём координатам. Предлагаемый метод управления более предпочтителен, поскольку нет необходимости контролировать форму профиля шлифовального круга или править его по специальному лекалу. В этом случае при обработке любого участка контура участвует только одна точка резания с определёнными координатами. На рисунке 8 приведена схема управления перемещением инструмента по трём координатам одновременно.

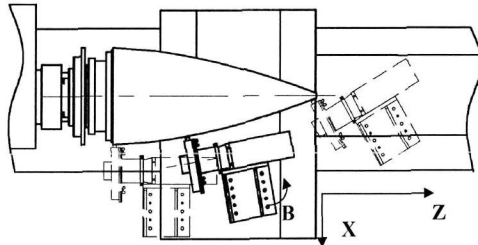


Рисунок 8- Схема управления перемещением инструмента по трём координатам

Управляемые оси:  $Z$  – продольное перемещение суппорта;  $X$  – поперечное перемещение;  $B$  – поворот привода инструмента в плоскости  $ZX$  на угол  $\theta$

Для проектирования УП по 3-м координатам в постпроцессор вводится информация об углах наклона касательной в каждой точке контура поверхности.

Уравнение касательной к окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $O(x_0, y_0)$  имеет вид

$$(x_1 - x_0) * (x - x_0) + (y_1 - y_0) * (y - y_0) = R^2 \quad (11)$$

В этом случае угловой коэффициент касательной равен:

$$k = - \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} \quad (12)$$

Касательная к прямой линии  $y = kx + b$  есть она сама. Угловым коэффициентом равен  $k$ . Искомый угол  $\theta$  между касательной и осью  $OZ$  находится по следующей формуле:

$$\theta = \arctan\left(\frac{1}{k}\right) \quad (13)$$

Результат работы постпроцессора – файл УП для СЧПУ. Структура файла УП – набор кадров. В каждом кадре указывается первая точка элемента линии или дуги и угол  $\theta$  наклона касательной к оси  $OZ$ .

**Третья глава диссертации** содержит сведения о разработанном и созданном автоматизированном комплексе механической обработки и активного контроля. Данный комплекс был разработан и создан на основании проведенных исследований для реализации спроектированной многоуровневой конструкторско-технологической модели детали типа оболочка вращения.

В работе приведена общая схема комплекса, состоящей из:

- станины универсального токарного станка 1М63 (производства Рязанского станкостроительного завода),
- автоматизированного устройства активного контроля и измерения действительных размеров радиусов наружного контура оболочки,
- системы ЧПУ.

На рисунке 9 представлен общий вид комплекса

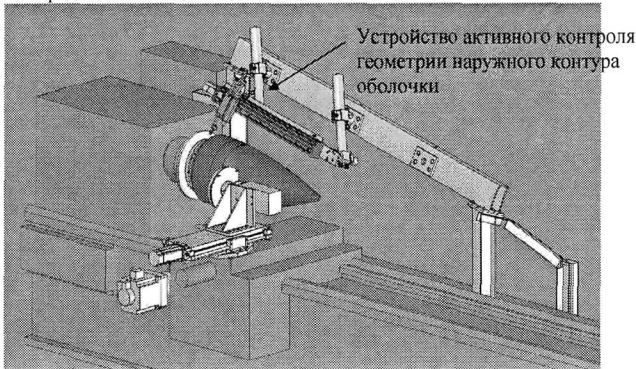


Рисунок 9 – Автоматизированный комплекс обработки и активного контроля оболочки

Разработана структурная схема комплекса, за основу которой взята система числового программного управления (СЧПУ) класса PCNC (Personal Computer Numerical Control) с персональным компьютером в качестве терминала. Представлена электрическая принципиальная схема комплекса.

Также рассмотрена разработанная адаптивная система управления (САУ) перемещением инструмента. В работе отмечено, что для обеспечения шероховатости обработки  $R_a$  не более 1 мкм и точности линейных размеров не ниже 7 – го качества в процессе обработки на станке необходимо контролировать и корректировать рабочую подачу инструмента и глубину резания, положение точки резания. В работе процесс управления обеспечен за счет созданной САУ, при этом вышеперечисленные параметры контролировались двумя датчиками линейного перемещения инструмента типа Spherosyn SP фирмы Newall (Англия). Блок - схема, поясняющая сущность разработанной САУ приведена на рисунке 10.

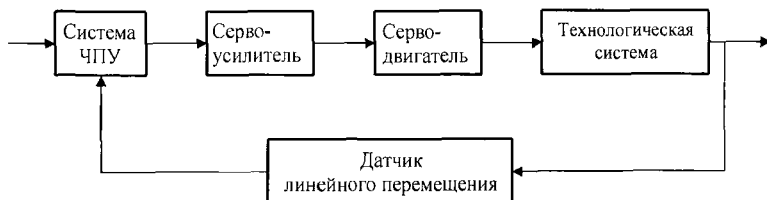


Рисунок 10 – Общая блок - схема САУ приводом перемещения инструмента

На вход СЧПУ поступал файл управляющей программы (УП) – массив координат отрезков прямых линий  $[x_k, y_k]$ . В процессе работы установки с датчиков линейного перемещения координаты X,Z снималась информация в крайних точках линий. Далее результаты выполнения задания сравнивались с заданными значениями УП. Рассчитывалась коррекция перемещения, выполнялось корректирующее перемещение инструмента.

Для управления комплексом было разработано специальное программное обеспечение на языке Си++, использовалась система визуального объектно-ориентированного программирования Builder 6.

При испытании комплекса были проведены эксперименты для установления точности и повторяемости позиционирования привода инструмента по координатам X, Z. Для этого была составлена специальная УП. С помощью датчиков линейного перемещения в реальном времени автоматически считывали координаты местоположения привода инструмента. Далее фактические координаты сравнивали с заданием УП. Результаты экспериментов представлены на рисунках 11 – 12.

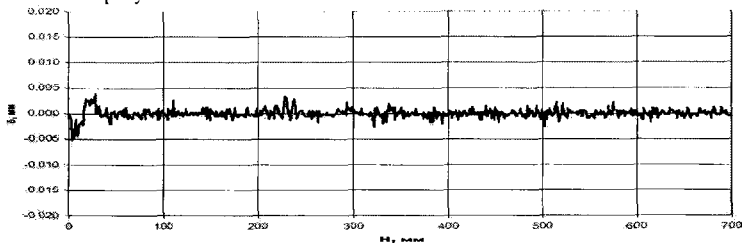


Рисунок 11 – Погрешность ( $\delta$ ) выполнения УП по координате X

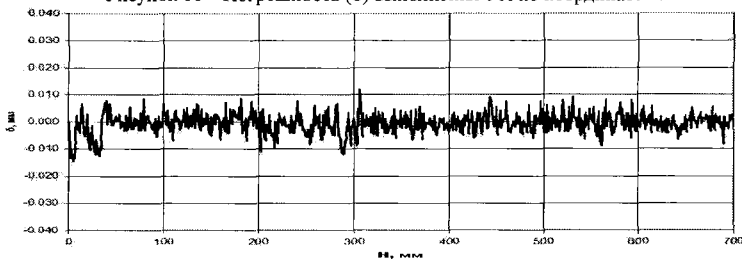


Рисунок 12 – Погрешность ( $\delta$ ) выполнения УП по координате Z

Из представленных выше графиков следует, что точность позиционирования по координате X находится в диапазоне  $\pm 2 - 4$  мкм, по координате Z в диапазоне  $\pm 8 - 11$  мкм.

Повторяемость выполнения УП комплексом с применением САУ по координате X находится в диапазоне  $\pm 3 - 4$  мкм, по координате Z в диапазоне  $\pm 7 - 9$  мкм. Это объясняется тем, что абсолютные перемещения по координате X в 7 раз меньше чем по

координате Z, а также тем, что перемещение по координате X выполнено с помощью направляющих качения (модуль ШВП фирмы Hiwin).

В четвертой главе рассмотрены цеховые испытания автоматизированного комплекса механической обработки и активного контроля оболочек.

Описаны предварительные этапы технологического процесса механической обработки оболочки. Предварительную обработку наружной поверхности завершали при достижении припуска по толщине стенки 1 – 1,5 мм.

Далее оболочку устанавливали на оправку автоматизированного комплекса механической обработки оболочек и выполняли окончательную обработку наружной поверхности согласно требованиям чертежа на деталь оболочки. Контроль толщины стенки оболочки выполняли на станке с помощью установки активного контроля геометрии наружного контура оболочки.

Для контроля припуска по толщине использовали первичную информацию о толщине стенки и информацию о геометрии наружного контура, полученную на предварительном этапе обработки. Толщину стенки измеряли в определенных реперных (контрольных) точках согласно таблице в технологическом паспорте изделия. Измерения проводили на специальной установке замера толщины стенки. С помощью устройства активного контроля измеряли геометрию наружного контура в процессе обработки оболочки. Далее система управления комплексом автоматически рассчитывала оставшийся припуск по толщине стенки оболочки. Обработку завершали при достижении указанных в чертеже геометрических параметров.

Далее с помощью устройства активного контроля проводили окончательный контроль геометрии наружного контура и толщины стенки оболочки. Деталь снимали с оправки комплекса, измеряли на специальной установке толщину стенки, результаты заносили в таблицу технологического паспорта. Шероховатость обработанной поверхности измеряли портативным цифровым измерителем шероховатости поверхности TR-200 фирмы Time Group Inc (Корея).

В диссертации представлена таблица, содержащая основные этапы технологического процесса механической обработки оболочки. Приведены снимаемый на каждом этапе припуск материала по толщине, точностные характеристики, оборудование и инструмент.

В работе приведены результаты цеховых испытаний. Были обработаны семь однотипных обтекателей ЛА. Внешний вид обтекателей представлен на рисунке 13.

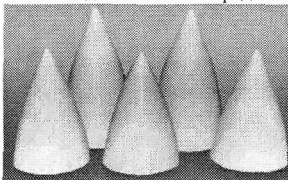


Рисунок 13– Внешний вид обтекателей ЛА

В качестве схемы механической обработки обтекателя была выбрана схема круглого наружного шлифования. Обработка производилась плоским алмазным (АС 4) шлифовальным кругом прямого профиля формы 1А1 (ГОСТ 16167-90) на металлической связке М2-01 зернистостью 160 /125. Износ и форма профиля шлифовального круга учитывались в процессе обработки. По результатам контроля вносилась коррекция в УП перемещения инструмента. В процессе обработки использовалась смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) – чистая вода. Окончательную обработку наружной поверхности выполняли автоматизированным комплексом на следующих режимах:

- $V_{кр} = 6000$  об/мин (окружная скорость круга);
- $V_d = 100$  об/мин; (окружная скорость детали);
- $S = 20 - 30$  мм/мин (линейная скорость перемещения инструмента);

–  $t = 0,02 - 0,4$  мм (глубина резания).

В диссертации приведена таблица результатов механической обработки обтекателей ЛА, приведены габариты, полученные после обработки отклонения параметров макро и микро геометрии, представлены режимные параметры и общее время обработки.

График отклонения ( $\delta$ ) координат фактического наружного контура детали от теоретических значений представлен на рисунке 14

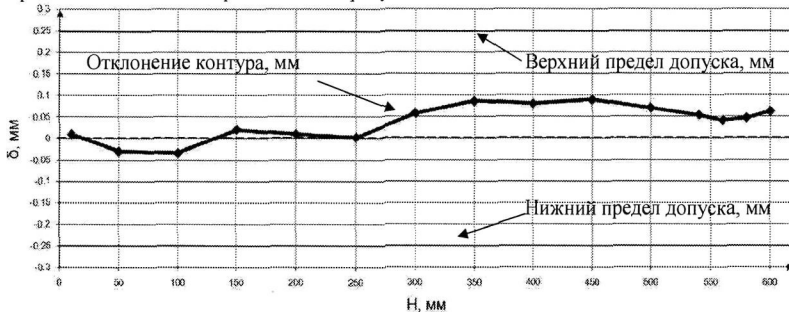


Рисунок 14 – Отклонение координат наружного контура детали

На рисунке 15 представлен график отклонения ( $\Delta_t$ ) толщины стенки детали от теоретических значений.

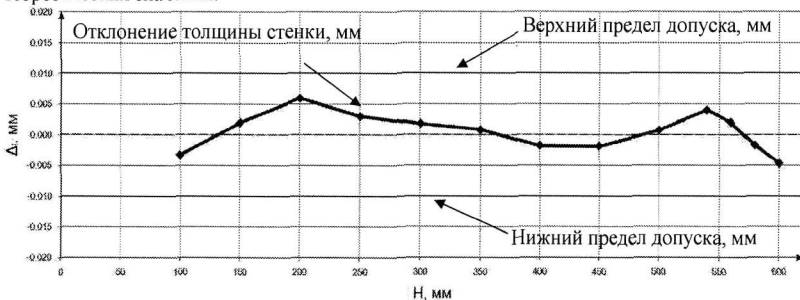


Рисунок 15 – Отклонение толщины стенки детали

На рисунке 16 представлен график – профилограмма шероховатости обработанной поверхности детали.

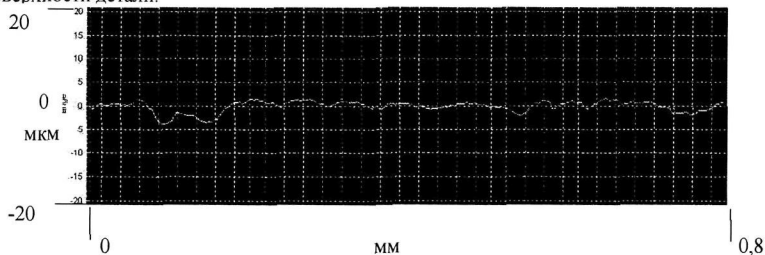


Рисунок 16 - Профилограмма контура наружной поверхности ( $R_a=0,893$  мкм)

Созданный автоматизированный комплекс механической обработки оболочек обеспечил выпуск годных деталей обтекателей в соответствии с требованиями чертежа.

За счёт введения в технологический процесс автоматизированного комплекса обработки оболочки удалось достичь точности выполнения задания по толщине стенки не менее 0,015мм. Колебание диаметра по высоте заготовки уменьшилось с 0,5мм до 0,15 – 0,2мм. В сравнении со станком, оснащённым копировальной системой качество механической обработки улучшилось в 2 – 3 раза.

Автоматизация ТП механической обработки и введение активного контроля геометрических параметров позволили повысить качество производимой продукции не менее чем в 2 – 3 раза и увеличить эффективность механической обработки обтекателей на 20 – 30% в сравнении с предыдущей схемой ТП.

Разработанная система управления автоматизированного рационального распределения припусков заготовки и управления глубиной резания позволила исключить субъективный подход к определению величины припуска и глубины резания, что также повысило точность изготовления детали. Это показывает анализ оцифровки реальной формы поверхности. По предыдущей схеме ТП - отклонение толщины стенки от номинальных значений составляет 0,03мм - 0,05мм. По новому варианту отклонение находится в пределах от 0,005мм до 0,02мм.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан и внедрён в производство автоматизированный комплекс механической обработки и активного контроля оболочек двойной кривизны из керамических материалов, обеспечивающий заданные точность, качество и эффективность процесса обработки наружных поверхностей оболочки. Применение в технологическом процессе механической обработки автоматизированного комплекса в 2,5 – 3 раза повысило точность обработки по параметру толщины стенки оболочки, позволило на 30% сократить машинное время по сравнению с альтернативной схемой обработки включающей в себя станки, оснащённые копировальными системами.

2. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что наибольшее влияние на точность механической обработки, по сравнению с другими погрешностями, оказывает смещение шлифовального круга от теоретически рассчитанной траектории движения. Разработана и реализована система адаптивного управления приводом перемещения инструмента, обеспечивающая точность линейного перемещения не менее  $\pm 4$  мкм.

3. Впервые разработана и реализована оригинальная схема активного контроля и измерения действительных размеров наружного контура оболочки. Создано автоматизированное устройство активного контроля контура наружной поверхности оболочки. Разработанное устройство в 4 раза повысило точность контроля геометрии наружного контура оболочки. За счёт автоматизации процесса и реализации схемы активного контроля время на контрольную операцию сократилось в 4 – 6 раз. Создана методика активного контроля геометрических параметров оболочки (действительных размеров радиусов в поперечных сечениях оболочки) с точностью  $\pm 3$  мкм.

На разработку подана заявка на Патент (№ 2010 102 653 от 26.01.2010).

4. Разработаны теоретические положения и математический аппарат численных расчетов процесса механической обработки и повышения точности обработки наружных поверхностей обтекателей ЛА. Создана САМ система проектирования управляющих программ для автоматизированного комплекса. Эффективность разработанной САМ системы, за счёт упрощения интерфейса и узкой направленности (разработка УП только для контуров оболочек), в 1,5 – 2 раза выше по сравнению с общеизвестными САПР.

5. На основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований разработана методика обработки наружной поверхности оболочки, позволяющая проводить обработку по всему контуру за одну операцию. Создана система управления автоматизированным комплексом механической обработки и активного контроля оболочки. Созданная система управления обеспечила равномерный съём припуска по всей высоте заготовки в независимости от кривизны обрабатываемой поверхности и заданного профиля толщины стенки оболочки, позволила отказаться от многоэтапного процесса обработки поверхности оболочки. Эффективность реализованной на практике методики обработки в 2 – 2,5 раза выше в сравнении с предыдущей схемой. На обработанных поверхностях не наблюдаются сколы, трещины.

6. Создана оригинальная методика активного контроля формы профиля режущей кромки алмазного шлифовального круга, в которой на единой основе алгоритмизации и программного обеспечения рассчитывались координаты точки резания для каждой точки обрабатываемой поверхности, определялась коррекция траектории движения инструмента.

7. Создана математическая модель технологического процесса механической обработки оболочки, устанавливающая зависимость между машинным временем и режимами резания. Математическая модель позволила определить рациональные режимы резания на стадии проектирования технологического процесса, необходимые для обеспечения максимальной производительности.

8. Разработаны рекомендации по выбору параметров элементов технологической системы автоматизированного комплекса механической обработки и активного контроля



оболочек, позволяющие снизить колебание диаметра по высоте заготовки с 0,5 мм до 0,2 мм, снизить отклонение толщины стенки оболочки с 0,05 мм до 0,02 мм, при повышении производительности финишной обработки в 2,5 раза.

9. Результаты диссертационной работы, представленные в виде созданного автоматизированного комплекса механической обработки и активного контроля оболочки, методик и рекомендаций по применению комплекса внедрены в производство антенных обтекателей ЛА на предприятии ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

1. Дзема Н.В., Эпов А.Г., Харахонов Г.А., Королёв Д.А. Контроль отклонений профиля поверхности обтекателей в процессе обработки // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. Тезисы докладов. XVIII международной научно-технической конференции, - Обнинск, 2007. с. 136 – 137.

2. Рогов В.А., Эпов А.Г., Королёв Д.А. Контроль отклонений профиля поверхности обтекателей в процессе обработки // Вестник РУДН, Сер. «Инженерных исследования», Москва, 2008. - № 2., с. 10 – 14.

3. Рогов В.А., Королёв Д.А. Моделирование технологического процесса механической обработки деталей укрупнённый расчет основного машинного времени // Будущее машиностроения России. Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов. Сборник трудов. Москва, 2008., с. 283 – 286.

4. Королёв Д.А. Анализ методов контроля геометрии формы оболочки летательного аппарата // Будущее машиностроения России. Вторая всероссийская конференция молодых учёных и специалистов. Сборник трудов. – М., 2009., с. 186 – 189.

5. Рогов В.А., Королёв Д.А. Моделирование технологического процесса механической обработки деталей в виде параболической оболочки из керамики // Технология машиностроения. Москва, 2009. - № 5., с. 46 – 50

6. Рогов В.А., Королёв Д.А. Анализ методов контроля геометрии формы оболочки летательного аппарата // Технология машиностроения. – М., 2009. - № 10., с. 36 – 39.

7. Королёв Д.А., Ромашина В.Г., Шадрин А.П., Неповинных О.В. Эффективность применения системы адаптивного управления в механической обработке обтекателя летательного аппарата // Инженерные системы - 2010. Международная научно – практическая конференция. Тезисы докладов. Москва, 2010., с. 133 – 134.

Королёв Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ ИЗ  
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОЛОВНОГО АНТЕННОГО  
ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА)**

В диссертации рассмотрены вопросы повышения эффективности и качества обработки оболочек двойной кривизны из керамических материалов за счёт автоматизации технологического процесса их обработки и контроля. Приведены разработанные методика и устройство активного контроля наружного контура оболочки. Представлена разработанная система управления перемещением инструмента по трём координатам одновременно. Разработана система автоматического проектирования управляющих программ. Приведён математический аппарат разработанного программного обеспечения. На основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований разработана методика обработки наружной поверхности оболочки, позволяющая проводить обработку по всему контуру за одну операцию. Результатом проведённых исследований явился разработанный и внедрённый в серийное производство обтекателей автоматизированный комплекс механической обработки и активного контроля оболочек двойной кривизны из керамических материалов, что позволило в 2,5 – 3 раза повысить точность обработки по параметру толщины стенки оболочки, на 30% сократить машинное время.

Korolyov Dmitriy Aleksandrovich

**AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF GRINDING AND  
CONTROL OVER DOUBLE CURVE SHELLS FROM CERAMIC MATERIALS (WITH  
REFERENCE TO HEAD RADOMES)**

The present dissertation examines way of improving efficiency and quality of grinding of double curvature ceramic shells by automating the processes around their handling and control. It sets out the developed methods and organization of active control of external contours of shell. It presents the proposed system of control over the movements of the tool in a three-dimensional space simultaneously. The system of automatic design of control programs is set out. The mathematical apparatus of developed software is presented. The method of treatment of the outer surface of the shell is developed on the basis of theoretical and experimental researches. The method enables to carry out the treatment of the whole contour in a single operation. As the result of this research a set of automated grinding and control processes over double curvature ceramic shells was developed. These processes were successfully implemented into production. This allowed to improve the accuracy of the grinding of shells wall thickness in 2.5 - 3 times and to reduce machine operation time by 30%.

Отпечатано в ПЦ «Фан»  
Москва, ул. Шухова, 18  
Тел.: (495) 956-19-07  
ООО «Техноком»  
101000, Москва, ул. Покровка, 12, стр. 3  
Заказ № 58. Тираж 100 шт.