


Малютин Геннадий Евгеньевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОЙ ОБЪЕМНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОГНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ  
СФЕРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

По специальностям 05.02.08 – Технология машиностроения  
05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки



Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» ФБГОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: Козлов Александр Михайлович  
Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой технологии  
машиностроения ФБГОУ ВО Липецкого  
государственного технического  
университета

Официальные оппоненты: Гузеев Виктор Иванович  
Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой технологии  
машиностроения Южно-Уральского госу-  
дарственного университета

Лукьянов Александр Дмитриевич  
Кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой автоматизации произ-  
водственных процессов Донского государ-  
ственного технического университета

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский  
государственный университет».

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ на  
заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государ-  
ственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005,  
Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,  
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского госу-  
дарственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2016г,

Ученый секретарь совета  
д.т.н., доцент

Валерий Павлович Михайлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для современного инструментального производства характерно создание большой номенклатуры деталей с вогнутыми поверхностями сложной формы, с высокими требованиями к точности и качеству обработки. К характерным представителям данного класса деталей относятся матрицы пресс-форм и штампов. Основным методом изготовления деталей подобного класса является объемное фрезерование на станках с ЧПУ. Развитие САМ систем существенно упростило процесс разработки управляющих программ, но все существующие САМ системы не учитывают геометрии зоны обработки и процессов, происходящих при стружкообразовании, что приводит к снижению параметров точности и качества обработанных поверхностей, а в некоторых случаях к поломке дорогостоящего инструмента.

Для повышения эффективности объемного фрезерования на станках с ЧПУ применяются дополнительные адаптивные устройства, но так как данные устройства работают с некоторым запаздыванием, а стоимость составляет 20-30% от стоимости оборудования, их применение ограничено.

Анализ литературных источников показал, что наиболее эффективным методом повышения производительности объемного фрезерования является покадровое управление режимами резания.

**Цель работы:** Повышение производительности и качества объемного чистового фрезерования на основе моделирования силовых параметров процесса обработки.

### **Основные задачи исследования.**

1. Разработать методику аналитического определения силы резания при объёмном чистовом фрезеровании, позволяющей системе ЧПУ, без применения дополнительных устройств, выбирать оптимальные режимы обработки.
2. Разработать закономерности, позволяющие прогнозировать погрешность обработки и обеспечивать выполнение требований чертежа без дополнительных проходов, с учетом меняющихся условий стружкообразования.
3. Разработать методику проектирования операций объемного фрезерования при наличии нарастающего припуска в ранее необработанных зонах, позволяющей исключить вероятность образования подрезов профиля и обеспечивающей стабильность отклонения формы на всей обработанной поверхности.
4. Разработать методику проектирования управляющих программ позволяющих системам ЧПУ по траектории инструмента самостоятельно определять ранее не обработанные зоны.
5. Провести экспериментальные испытания по влиянию изменения геометрических параметров зоны резания на производительность и качество обработки.

### **Научная новизна:**

1. Разработана методика аналитического расчета погрешности формы при объемном фрезеровании сферическими фрезами, учитывающая изменения геометрических и кинематических параметров в зоне резания при обработке сложнопрофильных деталей (п.7 паспорт специальности 05.02.08).
2. Разработана математическая модель определения параметра подачи в зависимости от изменения геометрических параметров зоны резания и с учетом меняющейся скорости резания (п.2 паспорт специальности 05.02.08).
3. Разработана аналитическая зависимость влияния изменения глубины, скорости и подачи резания на силу резания на произвольном участке обрабатываемой вогнутой поверхности сложной формы при объемном фрезеровании сферическими фрезами, включая режим фрезерование-сверление в ранее необработанных зонах (п.2 паспорт специальности 05.02.07).

**Практическая значимость работы** заключается в совершенствовании технологического процесса объемного фрезерования на станках с ЧПУ, основанного на покадровом управлении режимами резания с искажением траектории движения инструмента, обеспечивающем повышение качества и производительности обработки.

### **Основные положения выносимые на защиту:**

1. Методика аналитического расчета погрешности формы при объемном фрезеровании сферическими фрезами.
2. Методика регулирования подачи в зависимости от изменения геометрических параметров зоны резания и с учетом меняющейся скорости резания.
3. Доказательство зависимости влияния изменения глубины, скорости и подачи резания на силу резания при объемном фрезеровании сферическими фрезами.

**Объект исследования:** процесс многокоординатного фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы.

**Предмет исследования:** точность и производительность чистового объемного фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы.

**Методика исследования.** Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, научных основ технологии машиностроения. При проведении исследований применялся лицензированный пакет программы UNIGRAPHICS (SIEMENS NX V9 – 2014г.в).

Экспериментальные исследования проводились в реальных условиях промышленного производства с использованием 3-х осевого вертикально-фрезерного станка 6Б52Ф3, со системой ЧПУ SINUMERIK 802Dsl.

Для контроля полученных результатов применялась;

- динамометр УДМ-600;
- контрольно-измерительная машина DEA IOTA 1204.

Данное диссертационное исследование соответствует пунктам специальности 05.02.08:

2. Технологические процессы, операции, установовы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости.

7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин;

пункту специальности 05.02.07:

2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на V Международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России» (Курск, 2013 г.), на областной научно-практической конференции по проблемам технических наук (Липецк, 2013г.), на международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2015).

**Достоверность** полученных научных результатов, представленных в диссертации основывается на рационально выбранных и примененных методах научного исследования, подтверждается результатами анализа экспериментальных данных с использованием стандартных средств и методов измерений, совпадением результатов производственных испытаний с теоретически прогнозируемыми.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 11 печатных работах, из которых 4 - в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Общий объем публикаций 3,41 п.л. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы составляет 139 страниц, в том числе 111 страница текста, 77 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 69 наименований и приложений на 18 страницах.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснован выбор темы, её актуальность, дана краткая характеристика направления исследования, определено научное и практическое значение решаемой проблемы.

**В первой главе** рассмотрены основные типы сечений вогнутых поверхностей сложной формы и проблемы их обработки.

Рассмотрен технологический процесс механической обработки поверхностей сложной формы, проанализированы методы повышения производительности объемного фрезерования.

Сделан вывод о необходимости теоретических и экспериментальных исследований и разработке новой методики разработки управляющих программ для чистового фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы учитывающей нестабильность процесса резания. Поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** разработана методика искажения траектории движения инструмента с автоматическим покадровым управлением режимами резания, которая учитывает изменение геометрии зоны резания.

Предварительная механическая обработка вогнутых поверхностей сложной формы производится концевыми цилиндрическими фрезами, после которой, вблизи «дна» формируются необработанные зоны (Рис.1), глубина которых определяется по выражению:

$$H_1 = \frac{R_{фр.} \cdot \operatorname{tg}\left(a \sin \frac{R_{фр.}}{R_{нов.}}\right)}{2} + T, \quad (1)$$

где  $R_{фр.}$  – радиус сферы фрезы;  $R_{нов.}$  – радиус произвольного участка обрабатываемой поверхности;  $T$  – предварительный припуск, мм.

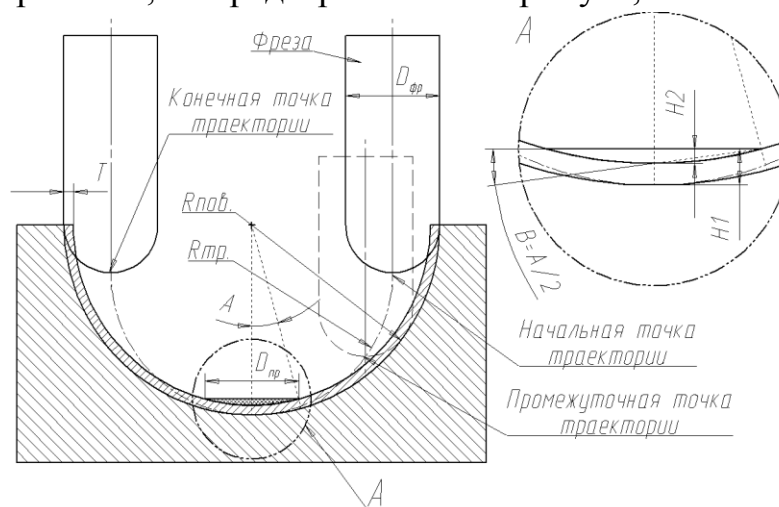


Рис.1. Расчетная схема нарастающего припуска

Чистовая обработка производится концевыми фрезами со сферическим торцом, по нормали к обрабатываемой поверхности. При этом, из-за непостоянства глубины резания и угла контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, образуются погрешность, величина которой на различных участках одной обрабатываемой поверхности непостоянна.

Разработка управляющих программ для механической обработки подобных поверхностей производится в САМ (*Computer-aided manufacturing* — автоматизированная система, предназначенная для подготовки управляющих

программ для станков с ЧПУ) системах. Но существующие системы не учитывают отжима инструмента при механической обработке, по этой причине, в условиях производства, механическую обработку производят с искажением траектории, которое формируется изменением размеров программируемого инструмента при разработке управляющей программы.

Подобный способ управления точностью обработки при объемном фрезеровании вогнутых поверхностей применяется давно, но из-за отсутствия расчетной методики производится методом проб. И существует необходимость в аналитическом определении параметров компенсации.

Диаметр инструмента при разработке управляющей программы определяется по выражению:

$$D_{\text{прогр.}} = D_{\text{фак.}} - 2 \bullet_{\Delta} N - \frac{\Delta T}{2}, \quad (2)$$

где  $D_{\text{фак.}}$  - фактически используемый диаметр инструмента;  $D_{\text{прогр.}}$  - диаметр инструмента используемый при проектировании программы в САМ системе;  $\Delta T$  - допуск;  $\Delta N$  - упругие перемещения, формируемые изменениями сил резания.

Методика аналитического расчета составляющих сил резания, а так же выражения по определению погрешности обработки, вызванных отжимом инструмента приведена в работах, выполненных под руководством д.т.н. проф. Гузеева В.И.

$$dP_z^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} \frac{a}{\sin \beta_1} \cos \beta R d\varphi + 0,252\mu\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} I_3 R d\varphi; \quad (3)$$

$$dP_x^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \cos \varphi R d\varphi + 0,252\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} I_3 \cos \varphi R d\varphi; \quad (4)$$

$$dP_y^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \sin \varphi R d\varphi + 0,252\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_6} I_3 \sin \varphi R d\varphi; \quad (5)$$

$$\Delta N = \frac{\left( (P_z^{\Sigma} \bullet \sin \psi - P_y^{\Sigma} \bullet \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + (P_z^{\Sigma} \bullet \cos \psi + P_y^{\Sigma} \bullet \sin \psi) \frac{\partial Z}{\partial Y} \right) \frac{l^3}{2,4 E R_{\text{фр.}}^4}}{\sqrt{\left( \frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 + 1}}, \quad (6)$$

где  $Z$  - количество зубьев фрезы;  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений при резании;  $a$  - толщина срезаемого слоя;  $\beta_1$  - угол наклона плоскости сдвига стружки;  $\beta$  - угол между линией среза и направлением равнодействующей силы  $R_p$ ;  $\mu$  - коэффициент трения;  $\varphi$  - угол профиля фрезы;  $R$  - радиус фрезы;  $I_3$  - степень износа зуба;  $\varphi_6$  - угол между осью фрезы и верхней точкой пересечения лезвия с заготовкой;  $\varphi_n$  - угол между осью фрезы и нижней точкой пересечения лезвия с заготовкой;  $E$  - модуль упругости первого рода;  $l$  - вылет инструмента.

Выражения (3), (4), (5) были выведены для расчета изменения силы резания при объемном фрезеровании сферическими фрезами при наличии ступенчатого припуска, и не учитывают особенностей обработки вогнутых поверхностей сложной формы, когда фреза одновременно работает в двух режимах – фрезерование и сверление. Кроме того, в данных выражениях не рассматривается изменение коэффициента трения, при изменении режимов резания, кроме того, применение интегральной формы недопустимо для применения на станках с ЧПУ.

По этим причинам существует необходимость в дополнении данных выражений и приведения к форме приемлемой к применению на станках с ЧПУ.

Выражение по определению коэффициента трения выводится из выражения по определению коэффициента усадки стружки при механической обработке, которая была представлена в «НОВОЙ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ» авторами Воронцовым А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиевым А.Ю.;

$$K_a = \frac{1}{\sin\left(40^\circ + \frac{\lambda - \arctg \mu}{2}\right)} \Rightarrow \mu = \operatorname{tg}\left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K_a}\right). \quad (7)$$

Методика аналитического определения коэффициента усадки стружки наиболее полно описана д.т.н. проф. Швецовым И.В. и определяется по выражению:

$$K_a = \frac{vx}{\ln \left[ 1 - \left( 1 - th \frac{1}{(yv + z)^2} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

где  $v$ - скорость резания;  $y$ ,  $x$ ,  $z$ - поправочные коэффициенты;  $th$ - гиперболический тангенс.

Данное выражение позволяет с высокой точностью определить коэффициент усадки стружки, и на скоростях свыше 40м/мин., теоретические и практические значения совпадают с точностью менее 10%, но при значениях скорости резания менее 30м/мин., расчетные параметры коэффициента усадки принимают значение менее 1, что не соответствует фактическим значениям.

Обработка вогнутых поверхностей сферическими фрезами производится в достаточно широком диапазоне скоростей резания, включая скорости близкие нулю, по этой причине предлагается выражение привести к виду:

$$K_a = \frac{\left[ \frac{vx}{\ln \left[ 1 - \left( 1 - th \frac{1}{(yv + z)^2} \right)^2 \right]} \right]^2}{4} + 1. \quad (9)$$



Исходя из того, что чистовое фрезерование концевыми фрезами производится на подачах менее  $S_{z\max}/\leq 0,1\text{ мм/зуб}$ , на скоростях менее  $V<400\text{ м/мин.}$  т.е. в зоне повышения коэффициента усадки стружки, и так как, применение функции гиперболического тангенса при программировании станков с ЧПУ недопустимо, примем:

$$K_{a\sin} = \sin(V(65,79 \bullet S_{\text{зуб}}^{2,0654})) \bullet (K_{a\max} - 1) + 1. \quad (10)$$

Данное выражение позволяет определить не столько действительное значение коэффициента усадки стружки, сколько характер его изменения в широком диапазоне скоростей и подач при чистовом фрезеровании сферическими фрезами сложных вогнутых поверхностей, кроме того, подобная архитектура удовлетворяет требованиям систем ЧПУ.

Учитывая выше изложенное, выражения для определения изменений сил резания при фрезеровании сферическим инструментом вогнутых поверхностей сложной формы примут вид:

$$dP_z^\Sigma = 0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \left( 15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (11)$$

$$dP_x^\Sigma = 0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \cos \varphi_1 \left( 5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (12)$$

$$dP_y^\Sigma = 0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \sin \varphi_1 \left( 5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right), \quad (13)$$

где  $\Delta \varphi$  - угол контакта, инструмента с обрабатываемой поверхностью при обработке “стенки”

$$\Delta \varphi = \arcsin \frac{(R_{mp.} + R_{\phi p.} - T) \bullet \sin \left( \arccos \left( \frac{R_{mp.}^2 + (R_{mp.} + R_{\phi p.} - T)^2 - R_{\phi p.}^2}{2R_{mp.}(R_{mp.} + R_{\phi p.} - T)} \right) \right)}{R_{\phi p.}}, \quad (14)$$

при обработке “дна”

$$\Delta \varphi = \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{\phi p.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{\phi p.}}. \quad (15)$$

Соответственно погрешность механической обработки при фрезеровании вогнутых поверхностей сложной формы на произвольном участке определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \Delta N_{Ci} = & ((0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \left( 15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \sin \psi - \\ & - 0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \left( 5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + \\ & + (0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \left( 15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \text{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi + \end{aligned} \quad (16)$$

$$+ 0,252 \sigma_i R_{\phi p.} \Delta \varphi \left( 5,24 S_{зуб.} \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + I_3 \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \sin \psi \frac{\partial Z}{\partial Y} \bullet$$

$$\bullet \frac{l^3}{2,4 ER_{\phi p.}^4} \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 + 1}} .$$

Выражение (16) позволяет определять формируемую погрешность обработки с учетом кинематических и геометрических изменений зоны резания, а так же с учетом жесткости режущего инструмента.

Исходя из того, что величина погрешности обработки в любой точке обрабатываемой поверхности должна быть постоянной:

$$\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = \Delta N_i = const , \quad (17)$$

изменения геометрии зоны резания можно компенсировать соответствующим изменением режимов резания.

С целью компенсации погрешности обработки и приведению ее к постоянным значениям, в данной работе была выведена формула для определения величины подачи на произвольном участке обрабатываемой поверхности:

$$S_{зуб.} = \frac{\frac{4,76 ER_{\phi p.}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha + 1}}{\sigma_i \Delta \varphi l^3 \cos \alpha} - I_3 \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9 I_3}{\left( 15,87 \sqrt{\frac{H}{2R_{\phi p.}}} + 30 I_3 \sin \left( \frac{V}{2,23} \right) \right)} . \quad (18)$$

Данная математическая модель позволяет рассчитать значения подачи с учетом геометрических и скоростных изменений стружкообразования на произвольном участке обрабатываемой поверхности, для фрез диаметром Ø1мм.-Ø20мм., на скоростях резания от  $V \approx 0$ м/мин до  $V = 400$ м/мин.

При разработке управляющей программы в САМ системе нет необходимости в использовании выражения (18) для определения подачи на произвольном участке обрабатываемой поверхности, достаточно определить ее значение на наиболее загруженном участке – «дно», на остальных участках значение подачи система ЧПУ станка сможет устанавливать самостоятельно, в зависимости от обрабатываемого участка по выражениям:

для участка «стенка»

$$K_{стенка} \approx 0,18 S R_{\phi p.}^{-1,3} \operatorname{Ln}(R_{тр.} + R_{\phi p.}); \quad (19)$$

для участка «дно»

$$K_{дно} \approx (0,006 S + 4) R_{\phi p.}^{-1,3} \operatorname{Ln}(R_{тр.} + R_{\phi p.}), \quad (20)$$

где S- частота вращения шпинделя.

Полученные выражения (19), (20) могут использоваться при написании управляющих программ обработки, которые позволят значительно сократить время механической обработки вогнутых поверхностей сложной формы, ис-

ключат вероятность поломки дорогостоящего инструмента и повысят точность обрабатываемых поверхностей.

**В третьей главе** приведены методика и результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились на трех- координатном вертикально-фрезерном станке 6Б52ФЗ с системой ЧПУ SIEMENS 802.

Цель экспериментов – проверка теоретических исследований направленных на повышение производительности и точности механической обработки вогнутых поверхностей сложной формы.

При проведении экспериментов использовались образцы из нержавеющей стали 40Х13, твердостью HRC, 40...45 единиц. Размер - 62х40х35, радиус обрабатываемой поверхности  $R_{\text{пов.}} = 20\text{ мм}$ . Предварительный припуск на обработку  $T=0,2\text{ мм}$ . Режущий инструмент - сферическая фреза фирмы HANITA с геометрическими параметрами: диаметр  $D=10\text{ мм}$ , радиус сферы торца  $R=5\text{ мм}$ , длина режущей части  $L_1=30\text{ мм}$ , вылет  $L_2=50\text{ мм}$ .

Проводилось сравнение результатов для двух групп образцов, обработанных по разным технологиям, которые затем соединялись, точность соединения обеспечивали два штифта.

В первом случае обработка двух образцов производилась без искажения траектории на постоянных параметрах подачи и частоты вращения шпинделя. Режимы резания назначались по наиболее загруженному участку – «дно»,  $N=4700\text{ мин}^{-1}$ ,  $S=10\text{ мм/мин}$ . Время одного прохода составило  $T=7,5\text{ мин}$ .

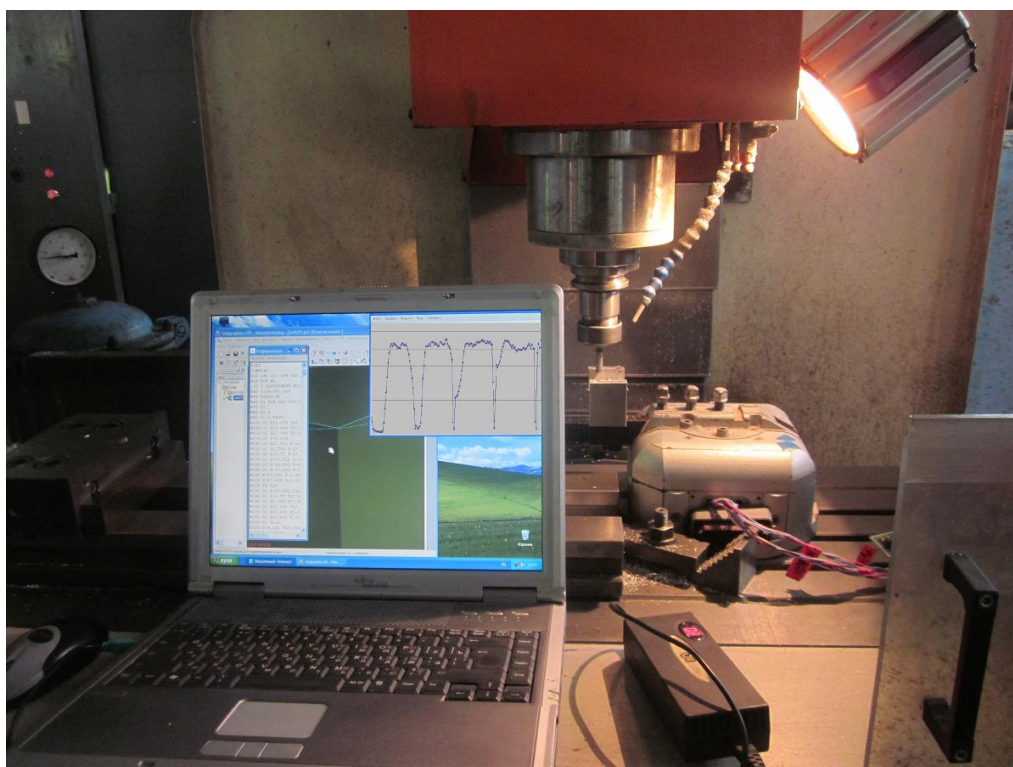


Рис.2. Установка для определения силы резания

Измерения силы резания производился динамометром УДМ-600 (Рис.2), показания параметров выводились программой Microsoft Excel.

Результаты экспериментов показали, что при врезании инструмента в ранее необработанную зону силы резания увеличились в 6 раз (Рис.3).

Два собранных образца образовали окружность диаметром на участке “стенка” в пределах  $\varnothing 40_{-0,12} - \varnothing 40_{-0,18}$  мм., на участке “дно” в пределах  $\varnothing 40_{-0,22} - \varnothing 40_{-0,24}$  мм.

Во втором случае образцы обрабатывались на переменных режимах резания.



Рис.3. График изменения силы резания при обработке «дна»

Регулирование подачи осуществлялась по выражениям (19), (20). Для участка “стенка”  $S=1126$  мм/мин, для участка “дно”  $S=13$  мм/мин. Частота вращения шпинделя устанавливалась в зависимости от угла наклона обрабатываемого участка ( $N4700 - N6000$  мин<sup>-1</sup>). Время первого прохода составило  $T=1$  мин.

На участках “стенка”, “дно”, “стенка”, а так же врезание в ранее необработанную зону и выход инструмента из нее, показания динамометра находились в пределах от 140Н до 145Н. (Рис.3.).

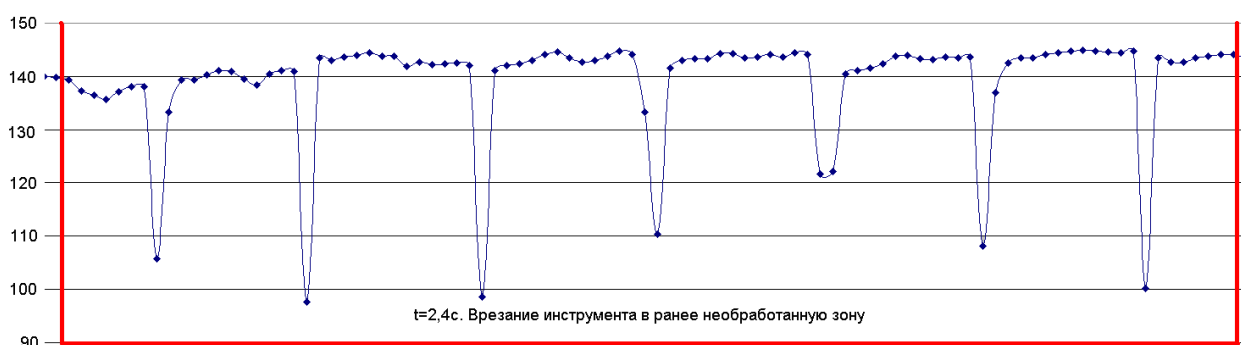


Рис.4. График изменения силы резания при врезании в ранее необработанную зону

**В четвертой главе** приведены результаты исследований в условиях инструментального производства, на примере механической обработки сопрягаемых вогнутых поверхностей сложной формы. Точность поверхностей детали «МАТРИЦА» (Рис.4) должна соответствовать 7 качеству.

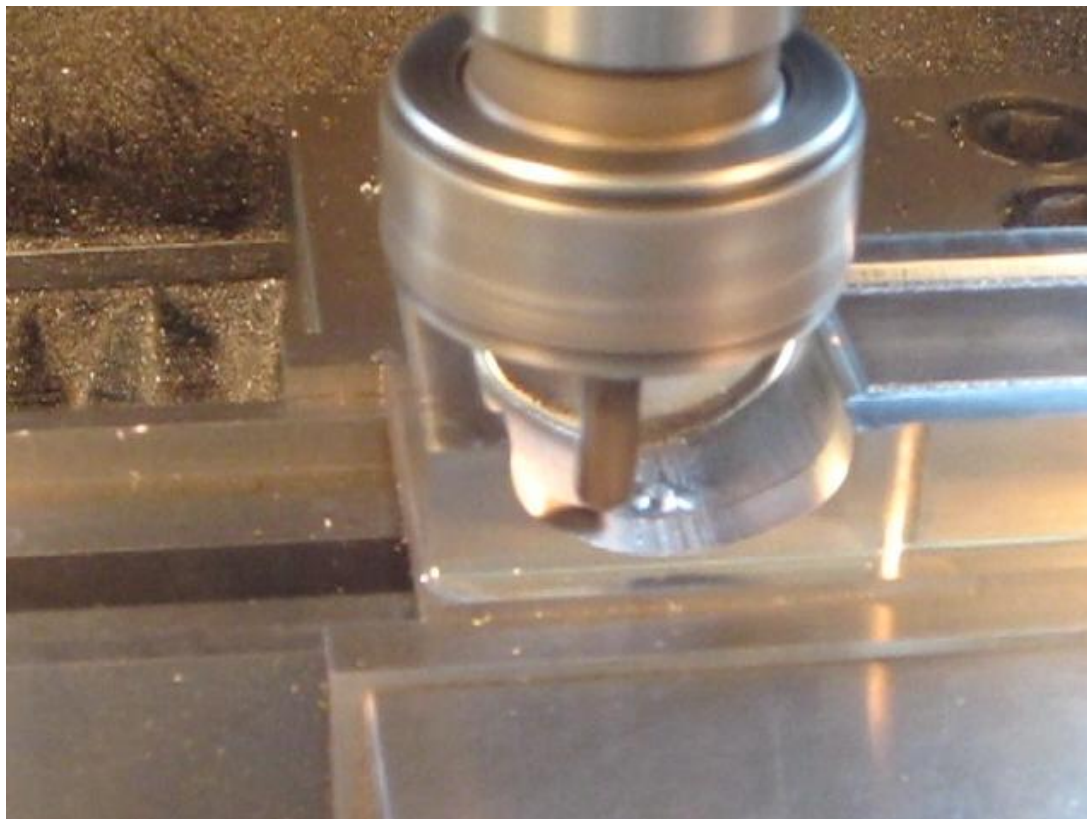


Рис.4. Чистовая обработка матрицы

Заготовка - инструментальная нержавеющая сталь 40X13 ГОСТ 5632-72.

Предварительная обработка вогнутой поверхности производилась цилиндрической фрезой фирмы HANITA Ø10мм. Припуск на обработку  $T_{ст.} = 0,25\text{мм.}$ , припуск ранее необработанной зоны  $T_{дно.} = 0,72\text{мм.}$  Твердость HRC 40...45.

Окончательная обработка проводилась фрезой фирмы HANITA Ø10мм. со сферическим торцом R5мм., по нормали к обработанной поверхности.

Так как в описанной пресс-форме имеются две одинаковых матрицы, то были опробованы два метода обработки. В первом случае, сопрягаемая поверхность обрабатывалась без коррекции траектории инструмента, при постоянной подаче  $S=10\text{мм/мин}$ , частоте вращения шпинделя  $S=4700\text{мин}^{-1}$ , расстояние между проходами  $L=0,1\text{мм}$ . Время обработки данной поверхности составило  $T=576\text{ мин}$ .

Контроль точности обработанных вогнутых сопрягаемых поверхностей производился на координатно-измерительной машине DEA IOTA 1204, по схеме замеров, представленных на Рис.5.

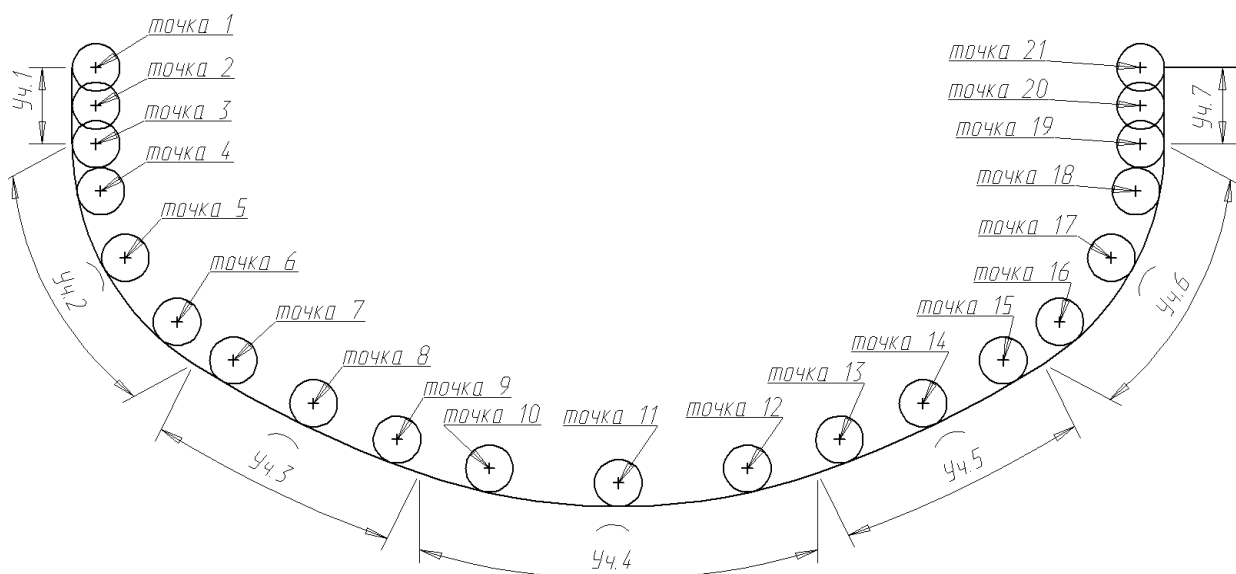


Рис.5. Схема замера поверхности на КИМ

Результаты произвольных замеров предоставлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры сопрягаемой поверхности по первому варианту.

Участок	Точка	Координаты			Параметр по чертежу		Фактический параметр
		X	Y	Z	max	min	
2	4	18,5272	-25	-7,745	12,088	12,07	<b><u>11,953</u></b> <b>Размер не выдержан</b>
	5	19,6725	-25	-10,834			
	6	22,1038	-25	-13,8053			
3	7	24,7566	-25	-15,5894	50,318	50,3	<b><u>51,058</u></b> <b>Размер не выдержан</b>
	8	28,5	-25	-17,5856			
	9	32,4061	-25	-19,26			
4	10	36,904	-25	-20,5993	27,678	27,66	27,65 Размер выдержан
	11	42,2344	-25	-21,1421			
	12	47,5648	-25	-20,5993			
5	13	52,0626	-25	-19,26	50,318	50,3	<b><u>51,111</u></b> <b>Размер не выдержан</b>
	14	55,9688	-25	-17,5856			
	15	59,7122	-25	-15,589			
6	16	62,365	-25	-13,8053	12,088	12,07	<b><u>11,934</u></b> <b>Размер не выдержан</b>
	17	64,7953	-25	-10,834			
	18	65,9416	-25	-7,7464			

Сравнение заданных и фактических размеров показывает, что применение способа обработки по номинальной поверхности 3D модели без регу-

лирования режимов резания, не позволяет выполнить требования, заданные в конструкторской документации, а выбор подачи по наиболее загруженному участку (ранее необработанная зона) существенно повышает время обработки.

Во втором случае, при обработке второй матрицы (зеркальное отображение первой), параметры инструмента были установлены с учетом погрешности вызванной изгибом инструмента -  $D = 9,87$  мм, радиус сферы  $R = 4,935$  мм.

Управляющая программа была разработана с расчетно-исполнительными блоками, позволяющими системе ЧПУ по меняющейся траектории инструмента, самостоятельно определять раннее необработанные зоны, устанавливая кинематические режимы резания близкие к оптимальным, на произвольном участке обрабатываемой поверхности, без применения дополнительных адаптивных систем.

Применение покадрового управления режимами резания сокращает время обработки до  $T = 48$  мин.

Результаты замеров по второму варианту предоставлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры сопрягаемой поверхности по второму варианту.

Участок	Номер точки	Координаты			Параметр по чертежу, мм		Фактический параметр, мм
		X	Y	Z	max	min	
2	4	-66,075	-25	-7,745	12,088	12,07	12,087 Размер выдержан
	5	-64,9438	-25	-10,834			
	6	-62,5634	-25	-13,8053			
3	7	-59,9667	-25	-15,5894	50,318	50,3	50,309 Размер выдержан
	8	-56,2753	-25	-17,5856			
	9	-52,4273	-25	-19,26			
4	10	-48,1763	-25	-20,5993	27,678	27,66	27,678 Размер выдержан
	11	-42,2344	-25	-21,272			
	12	-36,2925	-25	-20,5993			
5	13	-32,0415	-25	-19,26	50,318	50,3	<b><u>50,269</u></b> <b><u>Размер</u></b> <b><u>не выдержан</u></b>
	14	-28,1935	-25	-17,5856			
	15	-24,502	-25	-15,589			
6	16	-21,9053	-25	-13,8053	12,088	12,07	12,081 Размер выдержан
	17	-19,525	-25	-10,834			
	18	-18,3948	-25	-7,7464			

Замерами на КИМ определялись точки центра измерительного шарика ( $\varnothing 2,2$  мм), на рисунке 14 изображены фактические параметры обработанной поверхности, которые строились по касательным к окружностям  $\varnothing 2,2$  мм.



Применение результатов теоретических и экспериментальных исследований в условиях производства, при изготовлении поверхностей с жесткими геометрическими требованиями показал, что время обработки существенно снизилось, при этом были выполнены требования конструкторской документации.

### **Общие выводы по диссертации:**

1. В диссертационной работе решена важная задача повышения производительности и точности обработки объемных вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ на основе покадрового управления режимами резания и предсказания траектории движения инструмента.
2. Разработана математическая модель процесса силового взаимодействия сферической фрезы с поверхностью произвольного профиля при объёмном чистовом фрезеровании, позволяющая системе управления процессом обработки автоматически, без дополнительных адаптивных устройств, выбирать режимы обработки, повышающие стойкость инструмента и исключаящие его поломку.
3. Разработаны закономерности, описывающие изменение силы резания в зависимости от геометрических и кинематических параметров процесса резания на любом участке обрабатываемой поверхности произвольной формы, позволяющие прогнозировать погрешность обработки и обеспечивать выполнение требований чертежа без дополнительных проходов.
4. Предложена новая методика проектирования операций объемного фрезерования при наличии нарастающего припуска в ранее необработанных зонах, позволяющая исключить вероятность образования подрезов профиля и обеспечивающая стабильность отклонения формы на всей обработанной поверхности.
5. Использование предложенной методики проектирования операций чистового объемного фрезерования вогнутых поверхностей, после черновой обработки позволяет системе ЧПУ по траектории инструмента самостоятельно определять ранее не обработанные зоны.
6. По результатам исследования был разработан постпроцессор CAM системы UNIGRAPHICS для систем ЧПУ SINUMERIK (802D, 828D, 840D), генерирующий управляющие программы для чистового объемного фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы, которые позволяют проводить управление режимами резания в автоматическом режиме.
7. Проведены опытно-промышленные испытания разработанной методики проектирования операций чистового объемного фрезерования вогнутых поверхностей на предприятиях АО «Энергия», (г. Елец), АО Липецкий опытно-экспериментальный завод «Гидромаш» (г. Липецк). Результаты испытаний



показали повышение производительности обработки от 3-х до 10 раз при повышении стойкости инструмента и исключения вероятности его поломки.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Предложенный метод проектирования операций чистового объемного фрезерования вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ при дальнейших исследованиях может быть использован в технологических системах других видов обработки - электрохимической, поверхностно-пластического деформирования.

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности объемного фрезерования необработанных зон // Машиностроение – основа технологического развития России: сб. науч. статей V междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2013. С. 307-310. (0,4п.л/0,2п.л)
2. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 11. С. 14-18. (0,3 п.л. /0,15 п.л.)  
Автором рассмотрена методика определения радиуса дуги окружности произвольного участка обрабатываемой поверхности на станках с ЧПУ.
3. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Обеспечение точности объемного фрезерования на станках с ЧПУ при наличии ранее необработанных зон: матер. обл. профильного семинара «Школа молодых ученых по проблемам технических наук». 26-27 сентября 2013г. Липецк, 2013. С. 81-86. (0,38п.л/0,19п.л)
4. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Пошаговое регулирование скоростью резания при объемном фрезеровании сферическими фрезами: матер. обл. науч.-практ. конф. по проблемам техн. наук. 24-25 октября 2013г. Липецк, 2013. С. 83-88. (0,38п.л/0,19п.л)
5. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Расчет коэффициента усадки стружки при чистовой обработке сферическими фрезами // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы III междунар. науч.-практ. конф. М., 2014. С. 89-94. (0,38п.л/0,19п.л)
6. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 6 С. 39-43. (0,3п.л/0,15п.л)
7. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 2014. № 12. С. 71-75. (0,3п.л/0,15п.л)
8. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Расчет подачи при чистовом фрезеровании вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь 2015: матер. междунар. науч.-техн. конф. 14-15 сентября 2015 г. Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». 2015. 178 с. С. 40-45 (0,38п.л/0,19п.л)

9. Козлов А.М. Технологическое обеспечение точности обработки при чистовом фрезеровании вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Современные материалы, техника и технология // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Курск 2015. С. 68-71. (0,25п.л/0,13п.л)
10. Малютин Г.Е. Автоматическое управление частотой вращения шпинделя при 3-х осевой чистовой обработке фасонных поверхностей сферическими фрезами // Современные материалы, техника и технология: матер. 2-й международ. науч.-практ. конф. Курск, 2012. С. 177-178. (0,13п.л/0,13п.л)
11. Малютин Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. №4(306). С. 74-81. (0,38п.л/0,38п.л)
12. Малютин Г.Е., Кирющенко Е.В. Расчет параметров обработки поверхностей сложной формы для станков с ЧПУ: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617322.