


05.02.08
B92



На правах рукописи


Выбойщик Александр Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 05.02.08 "Технология машиностроения"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2000



Работа выполнена на кафедре «Технология, бизнес и компьютерное управление машиностроительного производства» Южно-Уральского государственного университета

Научный руководитель – заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор Корчак С.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Султан-заде Н.М.,
кандидат технических наук, доцент Орлов А.А.

Ведущее предприятие – АО «Челябинский тракторный завод»

Защита состоится 26 июня 2000 г., в 14 часов, на заседании диссертационного Совета Д053.13.05 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 503.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Ученый секретарь специализированного Совета
д.э.н., проф.



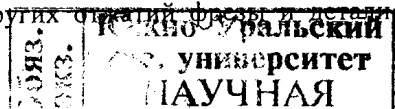
И.А.Баев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Для современного уровня развития техники характерно создание все большего количества деталей пространственно-сложной формы. К таким деталям относятся, например, штампы, пресс-формы, металлические модели для точного литья, кулачки, крыльчатки, сложные корпуса и др.

Основным средством автоматизации механической обработки деталей пространственно-сложной формы являются фрезерные станки с ЧПУ, повышение эффективности использования которых может быть достигнуто за счет повышения точности объемного фрезерования, дающего возможность, с одной стороны, уменьшить количество переходов при машинной обработке, а с другой, - уменьшить слой металла, снимаемый при последующей слесарной обработке, которая, например, для обработки точных штампов и пресс-форм занимает 30...70% всего времени обработки пространственно-сложных поверхностей.

Одной из главных задач технологии машиностроения является установление связей между технологическими параметрами, определяющими производительность и точность обработки. Из работ Б.С.Балакшина, Ю.М.Соломенцева, Б.М.Базрова, С.Н.Корчака, В.Г.Митрофанова, В.А.Кудинова, М.Л.Орликова и других исследователей известно, что основным фактором, влияющим на погрешность обработки, является силовая нестабильность процесса резания и вызываемые ей переменные по величине и направлению взаимные упругие перемещения инструмента и заготовки, на которые и приходится основная доля погрешности обработки. Особенно выражено силовая нестабильность проявляется при обработке на станках с ЧПУ концевыми радиусными фрезами пространственно-сложных поверхностей, т.к. после черновых переходов, связанных со снятием напуска, контур черновой поверхности лишь приближенно описывает требуемую чертежом форму из-за довольно больших «ступенчатых» макронеровностей (несколько миллиметров), образующихся как след концевой фрезы на наклонных и криволинейных поверхностях обработки из-за больших периодических подач на строку. Поэтому чистовые и получистовые переходы, имеющие целью получение требуемой формы с заданной чертежом точностью, выполняются в условиях резко переменной глубины резания и меняющегося положения «пятна контакта» фрезы с металлом относительно оси фрезы. Это обуславливает значительные колебания по величине и направлению сил резания, которые, в свою очередь, приводят к переменности упругих деформаций фрезы и детали и погрешностям обработки.



Исследованиями В.А.Батуева и В.И.Гузеева установлена взаимосвязь между составляющими сил резания, геометрическими параметрами зоны обработки, подачей и точностью при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей для процессов фрезерования, выполняемых при работе по схеме «вдоль» следа, оставшегося от черновых переходов.

Так как на последующих одном (чистовом) или двух (получистовом и чистовом) переходах стремятся с наименьшими погрешностями приблизиться к чертежной форме, то направление строк выбирают из условий, во-первых, формирования контура в перпендикулярном (или под углом) направлении к черновым переходам, во-вторых, фрезерования ранее недоступных мест и, в-третьих, получения требуемой точности обработки в этом новом направлении (со снятием «ступенчатых» макронеровностей от черновых переходов). Иногда требуется повторить смену направления на чистовых переходах относительно получистовых для последующего уменьшения «ступенек» макронеровностей. Поэтому в большинстве (до 70%) случаев получистовая и чистовая обработка ведется по схеме «поперек» следа или "под углом" к следу.

Таким образом, направление получистовых и чистовых переходов может быть любым: «вдоль» следа, «поперек» следа, «под углом» к следу от предшествующего чернового перехода. В «Общемашиностроительных нормативах времени и режимов резания для технического нормирования работ на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением» (1990 г.), приводятся величины подач для чистовых переходов, обеспечивающих требуемую точность обработки, только для схемы фрезерования «вдоль» следа, т.е. при совпадении направления скоростей подач на чистовых (и получистовых) переходах с направлением скоростей подач на черновых переходах. Так как в существующих нормативах и в работах исследователей отсутствуют рекомендации по схеме фрезерования «поперек» следа, составление технологического процесса обработки пространственно-сложных поверхностей деталей, т.е. определение числа переходов на них и назначение режимов резания, основывается на практическом опыте технолога-программиста, что зачастую приводит к занижению режимов резания и снижению производительности обработки. Поэтому исследование процесса объемного фрезерования на станках с ЧПУ при работе по схеме «поперек» следа является актуальным.

Исследованием динамики процесса резания для случаев точения, цилиндрического и контурного фрезерования занимались В.А.Кудинов, М.Л.Орликов, Ю.Н.Санкин, М.М.Аршанский, И.В.Сурков. Ими показано, что учет переходных динамических процессов позволяет более точно определить погрешности обработки, связанные с упругими отжатиями в технологической

системе. Динамика процесса объемного фрезерования не исследовалась. Из-за ярко выраженной переходности процессов при схеме обработки «поперек» следа учет динамических характеристик позволяет более точно определить величину наследственно формируемых погрешностей обработки.

Работа выполнена на кафедре «Технология, бизнес и компьютерное управление машиностроительных производств» Южно-Уральского государственного университета в соответствии с развитием работ по программе ГКНТ СССР на 1986...1990 гг. в рамках решения научно-технической проблемы 0.76.01 «Разработать и внедрить систему методических и нормативных материалов, типовых решений по научной организации труда, обеспечивающих эффективное использование техники и трудовых ресурсов» по заданию ЦБНТ Госкомтруда СССР 0.8.01.А: «Разработать и внедрить методические рекомендации по расчету норм времени на ЭВМ в едином цикле с автоматизированным проектированием технологических процессов».

Цель работы состоит в повышении точности и производительности обработки пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ при фрезеровании по схеме «поперек» следа с учетом динамических процессов на полуступенчатых и чистовых переходах.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Разработана методика расчета для определения геометрических параметров макронеровностей для различных сочетаний конструкций фрез и форм участков обрабатываемых пространственно-сложных поверхностей.

2. Установлены зависимости изменения сил резания при срезании макронеровностей различных высот и форм при работе «поперек» следа.

3. Разработана модель образования погрешностей обработки пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами при обработке по схеме «поперек» следа (для переменных глубин резания) с учетом динамических характеристик процесса объемного фрезерования.

4. Разработана методика проектирования операций объемного фрезерования, основанная на использовании на чистовых переходах схемы работы «поперек» следа и нормативная база по выбору режимов резания (скоростей подачи для разных глубин резания и числа переходов) для достижения требуемой точности.

Автор защищает:

1. Методику определения геометрических параметров макронеровностей для различных сочетаний конструкций фрез и форм обрабатываемых поверхностей деталей.

2. Модель образования погрешностей обработки с учетом динамических характеристик процесса фрезерования пространственно-сложных поверхностей по схеме «поперек» следа, разработанную на основе расчетного определения изменения сил резания в зависимости от изменения технологических условий обработки.

3. Методику определения режимов резания и число переходов, обеспечивающих требуемую точность обработки, с использованием нормативных таблиц и информационного массива данных, разработанных по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы.

1. Разработана методика расчета геометрических параметров макронеровностей, образующихся при фрезеровании различных по форме участков пространственно-сложных поверхностей, определяющих переменную глубину резания.

2. Разработаны зависимости, описывающие изменение сил резания при фрезеровании макронеровностей по схеме обработки «поперек» следа.

3. Результаты исследования динамических процессов в зоне резания позволили рассчитать передаточную функцию процесса объемного фрезерования, с учетом которой разработана модель образования погрешностей обработки при фрезеровании поверхностей по схеме «поперек» следа.

Практическая ценность.

1. Разработана методика проектирования операции объемного фрезерования на основе использования схемы чистового фрезерования «поперек» следа предшествующей обработки с назначением величины подачи на зуб S_z , обеспечивающей требуемую точность формы обрабатываемой поверхности и минимальную трудоемкость ручной доработки для снятия макронеровностей фрезерной обработки.

2. Разработаны нормативные таблицы по выбору наибольшей периодической подачи на строку на черновых переходах, обеспечивающей, с одной стороны, максимальную производительность а, с другой - требуемую точность на чистовых переходах.

3. Разработаны нормативные таблицы по выбору подач на чистовых переходах, учитывающих требуемую точность обработки с учетом высоты ступенек и других конкретных условий обработки (параметров обрабатываемой поверхности и режущего инструмента).

Указанные рекомендации внедрены на ЗАО «ТехАртКом» и в инструментальном производстве ПО «Полет» (г. Челябинск).

Основные положения работы используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Технология обработки деталей на станках с ЧПУ» и «Математическое моделирование технологических процессов».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях при I, II, III Международных выставках "Машиностроение. Новые технологии" в 1997, 1998, 1999 гг. (г. Челябинск), заседаниях XVIII Российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций (г. Миасс) в 1999 г., научно-технических конференциях ЧГТУ и ЮУрГУ в 1997, 1998, 1999 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы и 2 приложений. Работа содержит 181 страниц машинописного текста, включая 9 таблиц, 38 рисунков, список литературы из 109 наименований, приложения на 15 страницах.

Основное содержание работы

1. Расчет геометрических и силовых параметров обработки пространственно-сложных поверхностей

Методика расчета геометрических параметров.

Наиболее часто применяемые в практике варианты обработки типовых участков пространственно-сложных поверхностей представлены на рис. 1. Особенностью обработки по схеме «поперек» следа является наличие «ступенек», высота которых B (рис. 2) определяется конфигурацией обрабатываемой поверхности (радиусом R и углом наклона поверхности к горизонтальной плоскости ω в текущей точке), радиусом фрезы R'_f и периодической подачей на строку $S_{пер}$ на предшествующем переходе. Эти параметры определяют переменную глубину резания при обработке, которая, в свою очередь, влияет на упругие перемещения и, в итоге, точность обработки.

В случае обработки на предшествующем переходе наклонного участка поверхности концевой цилиндрической фрезой (рис. 2) максимальная глубина резания t_{max} определяется как:

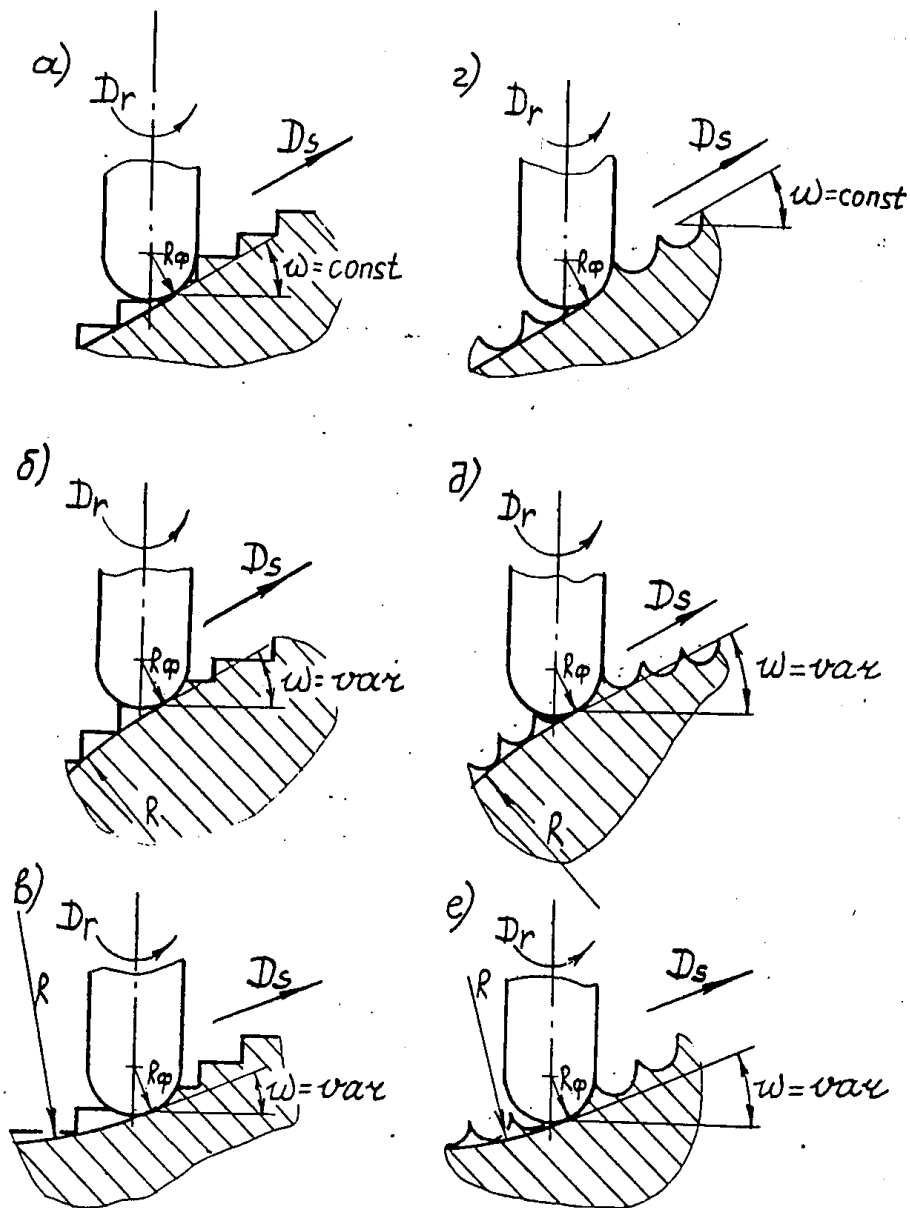


Рис. 1. Типовые схемы обработки пространственно-сложных поверхностей: а), г) плоского участка; б), д) выпуклого участка; в), е) вогнутого участка.

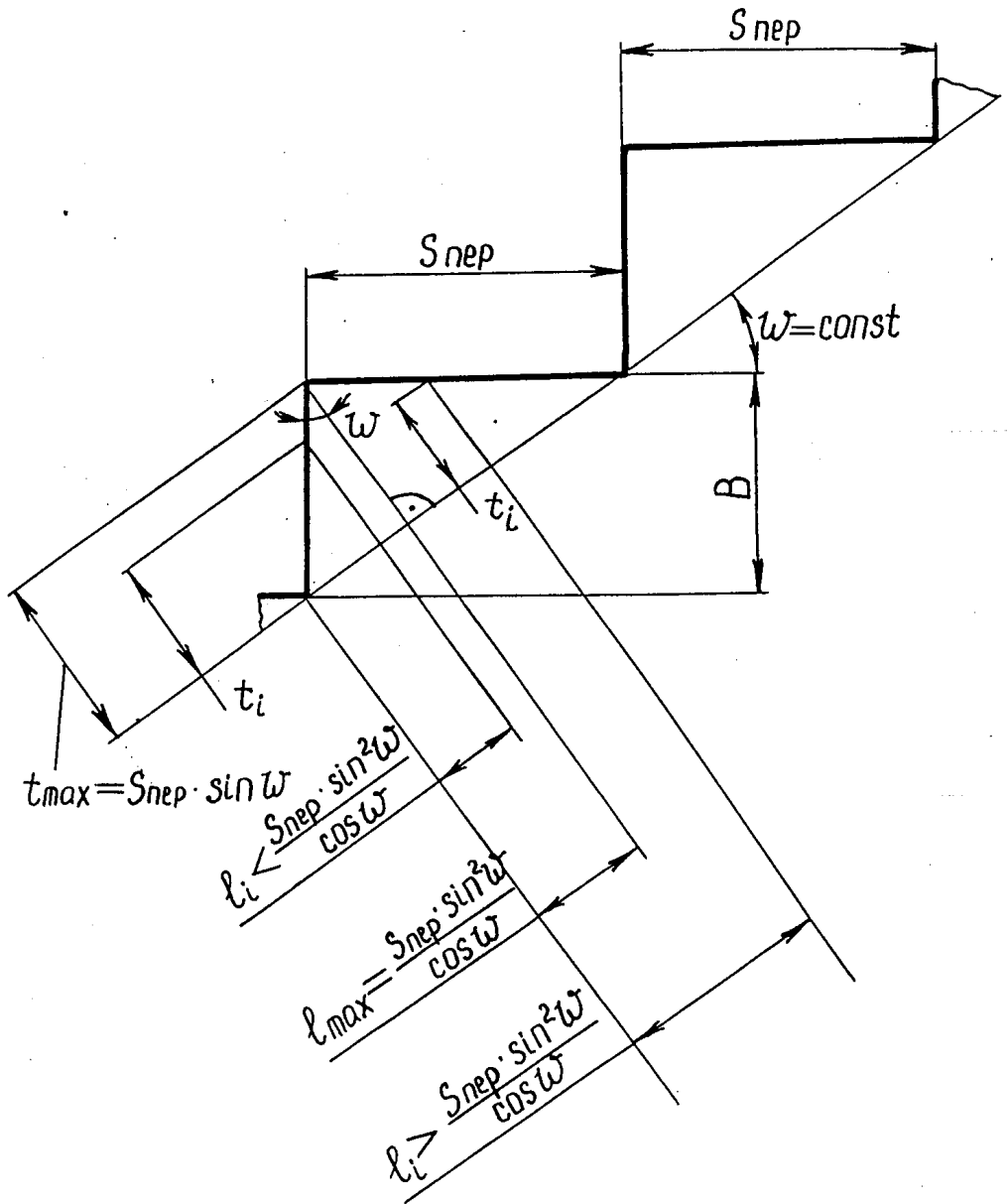


Рис. 2. Геометрические параметры срезаемого слоя при фрезеровании прямоугольной «ступеньки» на плоском участке пространственно-сложной поверхности

$$t_{max} = S_{nep} \sin \omega = B \cos \omega. \quad (1)$$

Текущая глубина резания t_i определяется как

$$\begin{cases} t_i = l_i \operatorname{ctg} \omega & \text{при } l_i \in \left[0; S_{nep} \frac{\sin^2 \omega}{\cos \omega} \right]; \\ t_i = S_{nep} \frac{\sin \omega}{\cos^2 \omega} - l_i \operatorname{tg} \omega & \text{при } l_i \in \left[S_{nep} \frac{\sin^2 \omega}{\cos \omega}; \frac{S_{nep}}{\cos \omega} \right]. \end{cases} \quad (2)$$

В первом случае (при $l_i \in \left[0; S_{nep} \frac{\sin^2 \omega}{\cos \omega} \right]$) глубина резания возрастает в связи с плавным входом в "ступеньку", во втором - уменьшается (при $l_i \in \left[S_{nep} \frac{\sin^2 \omega}{\cos \omega}; \frac{S_{nep}}{\cos \omega} \right]$) в связи с плавным выходом из "ступеньки".

В случае обработки на предшествующем переходе вогнутого участка поверхности концевой радиусной фрезой радиусом R'_ϕ (рис. 3) максимальная глубина резания t_{max} определяется как

$$t_{max} = R - \frac{R'_\phi \cos(\omega' + \kappa_1)}{\sin\left(\frac{\omega'' - \omega'}{2}\right)}. \quad (3)$$

Текущая глубина резания t_i для участков возрастания и убывания глубины определяется как

$$\begin{cases} t_i = R'_\phi \left(1 - \cos \arcsin \frac{l_i}{R'_\phi} \right) + l_i \sin\left(\frac{\omega'' - \omega'}{2}\right) \\ \text{при } \varphi_i \in \left[0; \frac{\omega'' - \omega'}{2} \right]; \\ t_i = R'_\phi \left(1 - \cos \arcsin \frac{S_{nep} - l_i}{R'_\phi} \right) + l_i \sin\left(\frac{\omega'' - \omega'}{2}\right) \\ \text{при } \varphi_i \in \left[\frac{\omega'' - \omega'}{2}; \omega'' - \omega' \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Подобные зависимости текущей t_i и максимальной t_{max} глубин резания от геометрических параметров обрабатываемых макронеровностей получены и для остальных возможных сочетаний ω , R , R_ϕ и S_{nep} , приведенных на рис. 1.

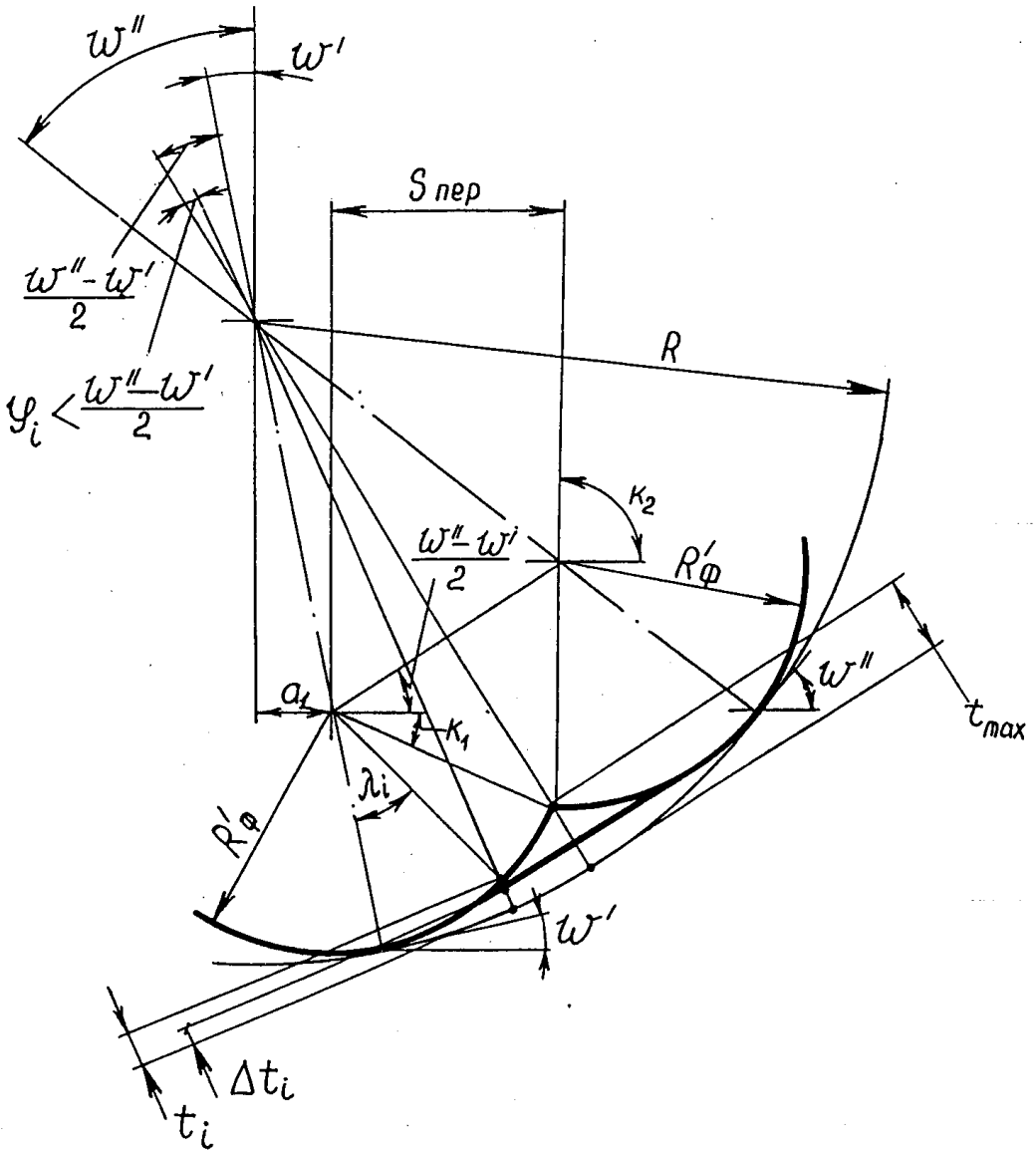


Рис. 3. Геометрические параметры срезаемого слоя при фрезеровании радиусной «ступеньки» на вогнутом участке пространственно-сложной поверхности

Расчет сил резания

За основу вывода силовых зависимостей приняты аналитические связи между режимами обработки и силами резания, разработанные С.Н.Корчаком, использующие принцип механики о равенстве работ (мощностей) действующих сил резания и сил сопротивления пластической деформации материала обрабатываемой детали. При определении силовых зависимостей для схемы обработки «поперек» следа использовалась методика, приведенная в работах В.А.Батуева и В.И.Гузеева для работы «вдоль» следа.

Закономерность изменения нормальной составляющей силы резания (в направлении формирования погрешностей от упругих перемещений) P_n (рис. 4) от параметров срезаемого слоя по схеме «поперек» следа имеет вид:

$$P_n = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_s} \frac{a \sin \beta (\sin \varphi \sin \omega + \cos \varphi \cos \omega) R_\varphi d\varphi}{\sin \beta_1} + 0,252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_s} l_z (\sin \varphi \sin \omega + \cos \varphi \cos \omega) R_\varphi d\varphi, \quad (5)$$

где σ_i – интенсивность напряжений при резании;

a – толщина срезаемого слоя;

β – угол между линией среза и направлением равнодействующей силы;

β_1 – угол наклона плоскости сдвига в срезаемом слое;

l_z – длина площадки затупления по задней поверхности зубьев фрезы;

φ – текущий угол профиля фрезы;

φ_s – верхний угол профиля фрезы; φ_n – нижний угол профиля фрезы.

Различные сочетания углов профиля φ_n и φ_s формируют различные глубины резания и различное расположение "пятна контакта" радиусной части фрезы с металлом, определяющее, в свою очередь, изменение направления нормальной составляющей силы относительно оси фрезы.

В случае обработки на предшествующем переходе плоского наклонного участка поверхности концевой цилиндрической фрезой (рис. 5) нижний угол

профиля φ_n определяется как $\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \psi}$, а верхний φ_s – как

$$\cos \varphi_s = \left(1 - \frac{B}{R_\varphi} \right).$$

Для остальных вариантов схем обработки (рис. 1) также рассчитаны значения углов профиля φ_n и φ_s , необходимых для определения текущей глубины резания и нормальной составляющей силы резания.

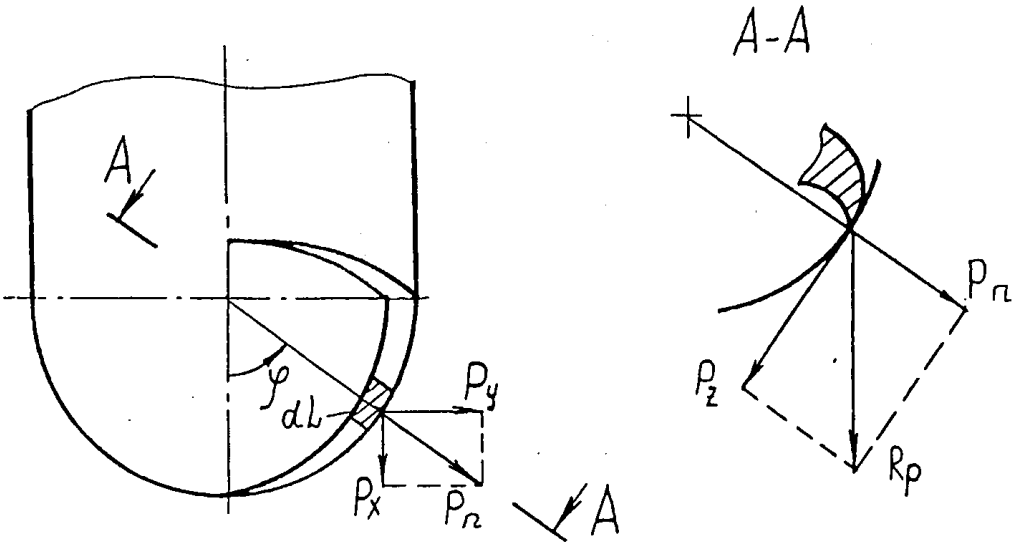


Рис. 4. Составляющие силы резания, действующие на элементарном участке dl режущей кромки концевой радиусной фрезы

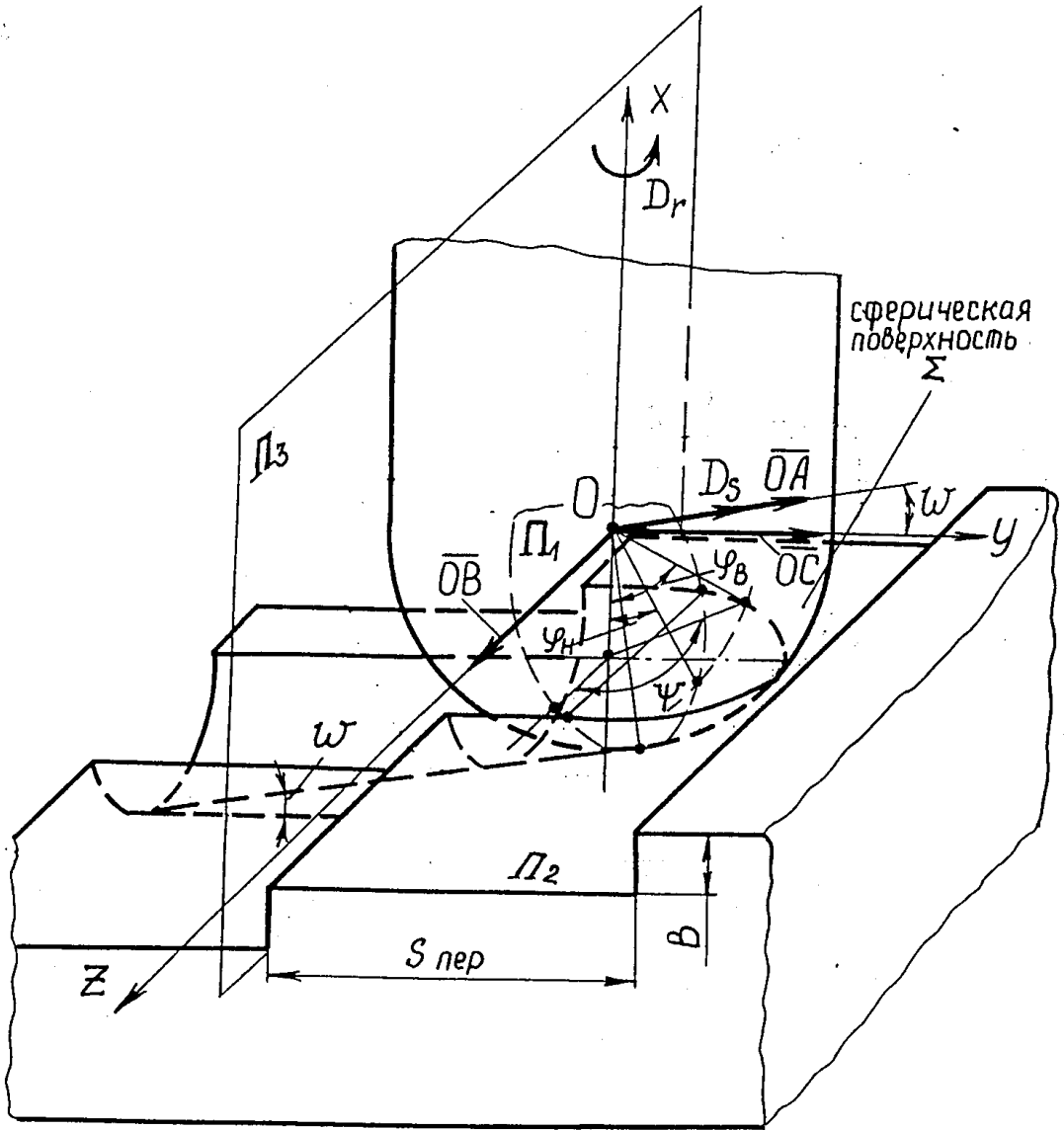


Рис. 5. Определение силовых параметров при фрезеровании радиусной «ступеньки» на плоском участке пространственно-сложной поверхности

Расчет погрешностей обработки с учетом динамических характеристик процесса объемного фрезерования.

На рис. 5 приведена схема для расчета погрешностей при обработке "ступенек" по схеме "поперек" следа.

Взаимосвязь факторов, влияющих на погрешность обработки, с учетом динамических характеристик технологической системы (рис. 6), выражается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_n(\tau) = K_{in} \Delta t'(\tau) + K_{Sn} S_z + K_n; \\ \Delta t'(\tau) = \Delta t(\tau) - [n(\tau) - n(\tau - \tau_0)]; \\ W_{ЭУС n}(p) = W_{ЭУС y}(p) \sin \omega + W_{ЭУС x}(p) \cos \omega; \\ n(\tau) = W_{ЭУС n}(p) P_n(\tau); \\ n(\tau - \tau_0) = W_{ЭУС n}(p) P_n(\tau) e^{-p\tau_0}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Полученная на основе решения системы (7) передаточная функция $W_{ЭУС n}$ дала возможность при помощи решения дифференциальных уравнений первого порядка (с постоянными коэффициентами) рассчитать упругие перемещения фрезы n при обработке пространственно-сложных поверхностей.

2. Управление точностью и производительностью процесса объемного фрезерования

Взаимосвязь точностей обработки с динамической характеристикой процесса объемного фрезерования. Текущая погрешность обработки пространственно-сложных поверхностей n_i (рис. 7) зависит от кривизны обрабатываемой поверхности (для наклонной прямой поверхности - от угла наклона обрабатываемой поверхности к горизонтальной плоскости ω) и переменной жесткости технологической системы $j_{ТС_n}$ в направлении действия нормальной составляющей силы резания P_n . Она определяется как:

$$n_i = \frac{P_{n_i}}{j_{ТС_n}}.$$

Переменная глубина резания влияет на изменение нормальной составляющей силы резания P_n и на упругие перемещения инструмента, которые происходят с некоторым запаздыванием (инерционно), что изменяет величину погрешности формы обрабатываемой поверхности.

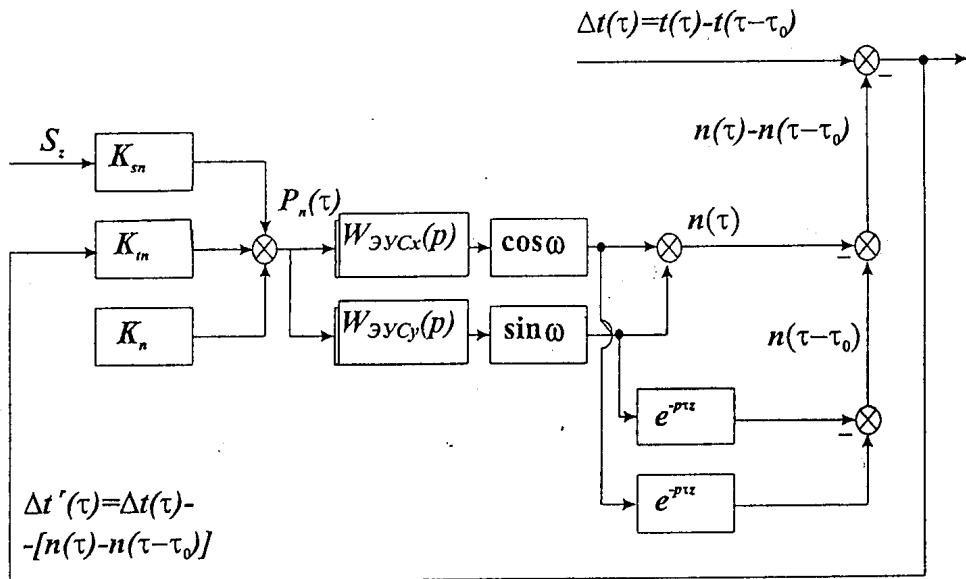


Рис. 6. Структурная схема изменения погрешностей формы $n(\tau)$ с учетом динамики технологической системы:

K_m , K_{sn} , K_n – постоянные коэффициенты, зависящие от геометрических параметров обрабатываемой детали и инструмента;

$n(\tau)$ – упругое перемещение фрезы по нормали к обрабатываемой поверхности на текущей «ступеньке»;

$n(\tau - \tau_0)$ – упругое перемещение фрезы по нормали к обрабатываемой поверхности на предшествующей «ступеньке»;

$t(\tau)$ – кинематическая глубина резания на текущей «ступеньке»;

$t(\tau - \tau_0)$ – кинематическая глубина резания на предшествующей «ступеньке»;

$\Delta t(\tau)$ – разность между кинематической глубиной резания на предшествующей и текущей «ступеньках»;

$W_{ЭУСx}(p)$ – передаточная функция эквивалентной упругой системы (включающей технологическую систему, процессы трения и процессы в двигателе) фрезерного станка по координате X (в осевом направлении фрезы);

$W_{ЭУСy}(p)$ – передаточная функция эквивалентной упругой системы фрезерного станка по координате Y (в направлении, перпендикулярном оси фрезы);

$e^{-p\tau_0}$ – функция запаздывающего аргумента;

$\Delta t'(\tau)$ – разность между фактической глубиной резания на предшествующей и текущей «ступеньках».

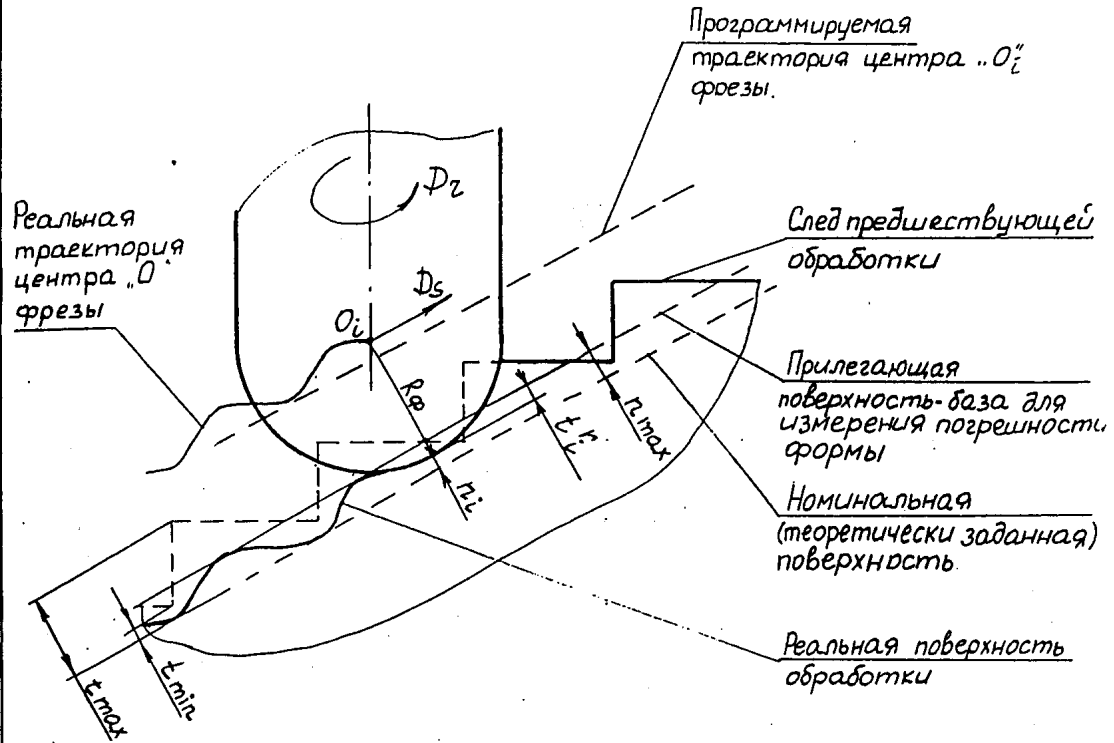


Рис.7. Схема формирования погрешности обработки при объемном фрезеровании

Учитывая, что наименьшей жесткостью в технологической системе обладает фреза, можно свести с определенными допущениями передаточные функции всей системы к передаточной функции процесса резания $W_p(p)$.

Тогда динамическую погрешность обработки $n(\tau)$ можно выразить следующим дифференциальным уравнением:

$$n(\tau) = W_p(p) \Delta t(\tau) \left(\frac{x}{j_{\phi_x}} \cos \omega + \frac{y}{j_{c_y}} \sin \omega \right), \quad (10)$$

где j_{c_y} – жесткость технологической системы, приведенная к жесткости фрезы в радиальном направлении;

y – упругие перемещения фрезы в радиальном направлении;

j_{ϕ_x} – жесткость фрезы в осевом направлении;

x – упругие перемещения фрезы в осевом направлении.

Решение дифференциального уравнения (10) позволило рассчитать взаимосвязь точности обработки пространственно-сложных поверхностей при «ступенчатом» характере макронеровностей от предшествующей обработки с последующей обработкой по схеме «поперек» следа.

Экспериментальная проверка расчетных зависимостей по изменению сил резания и погрешностей обработки от изменения влияющих на них переменных технологических факторов показала удовлетворительную сходимость (в пределах 12...15%) теоретических данных с данными экспериментов. В качестве примера на рис. 8 приведен один из графиков.

На предприятии ЗАО «ТехАртКом» внедрены рекомендации по выбору рациональной схемы снятия припуска и назначения периодической подачи на строку при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ. Результаты внедрения показали, что время проектирования рациональной схемы снятия припуска, отладки управляющей программ и основное время на обработку сократилось на (25...30)%.

В инструментальном производстве ПО «Полет» внедрены результаты производственных исследований фрезерования пространственно-сложных поверхностей по схемам «вдоль» следа, «поперек» следа, «под углом» к следу при обработке поверхностей концевыми радиусными фрезами. Исследования подтвердили результаты теоретических расчетов и показали, что объем металла, остающегося на слесарную доработку при схемах «вдоль» следа, «под углом» к следу, «поперек» следа, составляют соотношение 100:75:67. В этом же

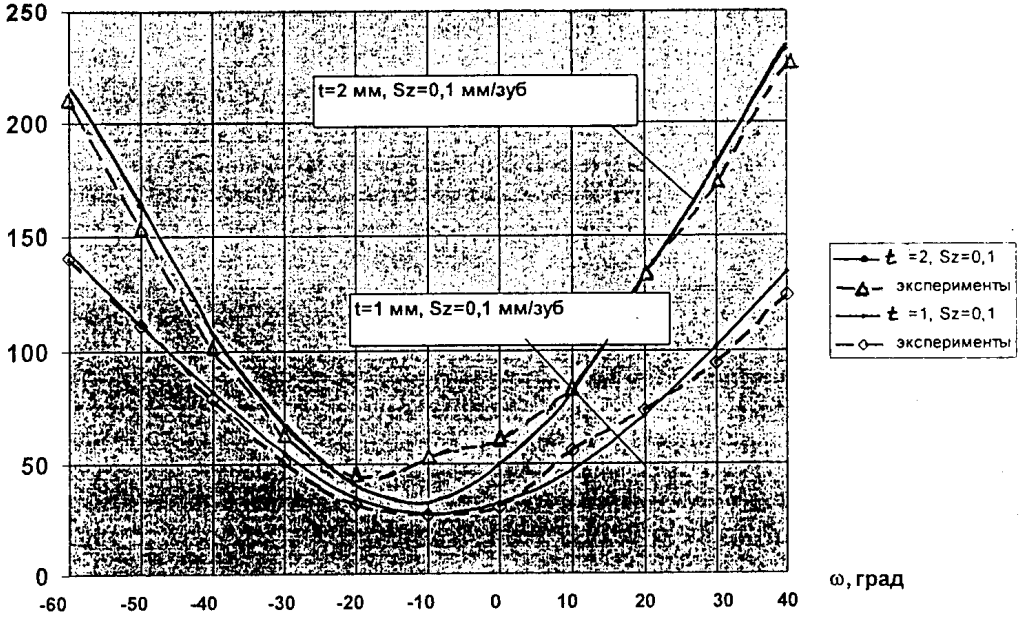
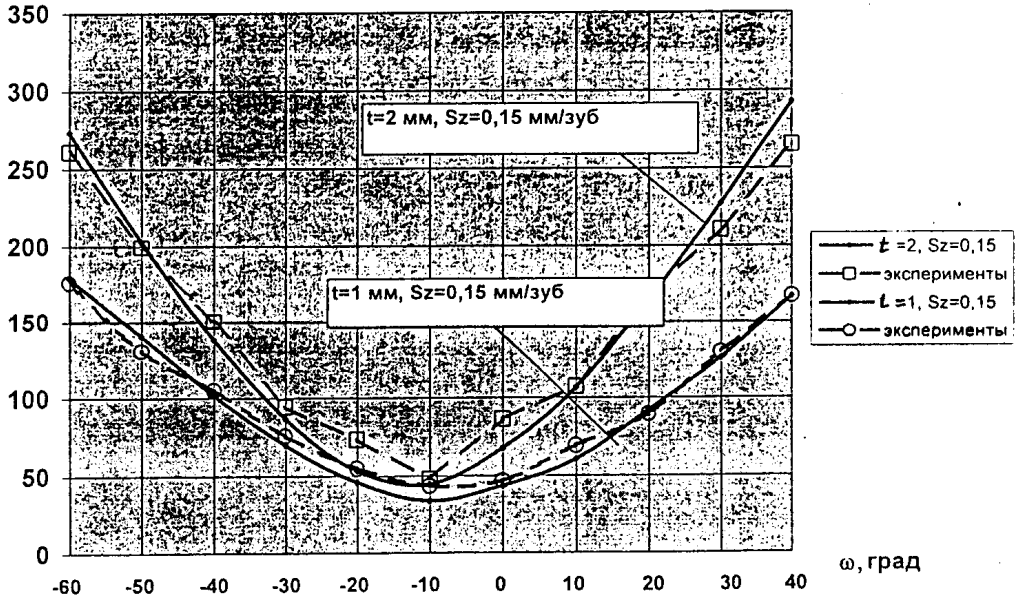
а) n , МКМб) n , МКМ

Рис.8. Графики изменения динамических погрешностей n в зависимости от угла наклона обрабатываемой поверхности к горизонтальной плоскости ω для фрезы $R_f = 8$ мм :

а) при $t = 1$ мм, $t = 2$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб; б) при $t = 1$ мм, $t = 2$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб

соотношении находятся затраты времени на финишную слесарную обработку фрезерованных поверхностей после схем обработки «вдоль» следа, «под углом» к следу, «поперек» следа соответственно.

Общие выводы

1. Разработана методика определения геометрических параметров макронеровностей (следов предшествующей обработки) при фрезеровании по схеме «поперек» следа для различных сочетаний конструкций фрез, применяемых на черновом и чистовом переходах, и конфигураций участков обрабатываемых поверхностей, определяющих переменную глубину резания.

2. Получены закономерности, позволяющие рассчитать изменение глубины резания при обработке различных участков (плоских, выпуклых, вогнутых) пространственно-сложных поверхностей при работе по схеме «поперек» следа с учетом величины макронеровностей предшествующей обработки, зависящих от параметров обрабатываемой поверхности (радиуса кривизны обрабатываемой поверхности и ее угла наклона к горизонтальной плоскости), конструкций и величин периодической подачи на строку.

3. Разработаны силовые зависимости при работе по схеме «поперек» следа, учитывающие изменение величины подач на зуб, геометрических параметров обрабатываемой поверхности, радиусов фрез на текущем и предшествующем переходах и величин периодических подач на строку на предшествующих переходах, которые в совокупности и определяют переменную глубину резания.

4. Получена передаточная функция процесса объемного фрезерования, позволяющая при известных законах изменения глубины резания от времени рассчитать погрешность формы при обработке пространственно-сложных поверхностей с учетом динамических характеристик процесса резания. Результаты расчетов позволяют обеспечить требуемую точность обработки путем изменения скоростей подач и определять число переходов получистовой и чистовой обработки.

5. Установлено, что объем металла, который должен быть удален при слесарной обработке, различается в зависимости от предшествующей схемы обработки – «вдоль» следа, под «углом» к следу или «поперек» следа в соотношении 100:75:67. Таково же и соотношение времен, затрачиваемых на ручную доработку поверхностей, обрабатываемых по указанным схемам. Для сокращения трудоемкости слесарной операции рекомендуется на получистовых и чистовых переходах использовать схему обработки «поперек» следа.

6. Разработана новая методика проектирования операции объемного фрезерования, основанная на использовании на чистовых переходах схемы обработки «поперек» следа. Для обеспечения заданной точности формы на чистовых переходах и для уменьшения трудоемкости при снятии макронеровностей фрезерной обработки разработаны нормативные таблицы выбора подач для различных параметров обрабатываемой поверхности, радиусов фрез и периодических подач на строку на предшествующей обработке. Для получения максимальной производительности на черновых переходах по этой методике разработана таблица максимально допустимой периодической подачи при снятии напуска фрезами различных диаметров, дающая возможность получить заданную точность формы на последующих переходах обработки.

7. Результаты исследований, внедренные на ЗАО "ТехАртКом" и ПО "Полет", позволили повысить производительность фрезерования на 15...20%, а ручной слесарной доводки - на 25...30%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Выбойщик А.В. Алгоритм расчета оптимального числа рабочих ходов при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами //1 Международная специализированная выставка «Машиностроение. Прогрессивные технологии» Сборник тезисов докладов конференции (Челябинск, 17...20 июня 1997 г.). – Челябинск, 1997, с. 51.

2. Выбойщик А.В. Динамические процессы при обработке деталей сложной формы //3 Международная научно-техническая выставка «Машиностроение-99. Прогрессивные технологии». Сборник докладов. – Челябинск, 1999. – С. 54...59.

3. Выбойщик А.В. Информационно-измерительный стенд для автоматизированного исследования процесса объемного фрезерования концевыми радиусными фрезами //Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1997. – С. 101...106.

4. Выбойщик А.В. Методика определения времени переходного процесса при объемном фрезеровании. – Деп. в ВИНТИ 17.07.1997, № 2441-В97.

5. Выбойщик А.В. Методика разработки расчетной схемы, описывающей динамическую систему станка при объемном фрезеровании //Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С. 57...61.

6. Выбойщик А.В. Разработка методики стабилизации силовых параметров объемного фрезерования на основе учета динамических процессов // XVIII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященная 75-летию со дня рождения академика В.П.Макеева: Тез. докл. – Миасс: МНУЦ, 1999. – С. 180.

7. Выбойщик А.В. Управление режимными параметрами обработки при объемном фрезеровании на станках с ЧПУ //2 Международная специализированная выставка «Машиностроение. Прогрессивные технологии»: Сборник тезисов докладов конференции (Челябинск, 17...20 марта 1998 г.). – Челябинск, 1998, с. 47.

8. Выбойщик А.В. Учет динамических характеристик процесса объемного фрезерования с целью повышения точности обработки //Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С. 98...102.

