

М239957

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

УШАКОВ Анатолий Иванович

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ**

(01.02.05 — Динамика, прочность, надежность машин,
приборов и аппаратуры)

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана
1239957
Ушаков А. И. Динамические

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

д. т. н., проф. Светлицкий В. А.

Научный консультант —

к. т. н., доц. Мещеряков Р. К.

Официальные оппоненты:

д. т. н., проф. Подураев В. Н.,

к. т. н., с. н. с. Левитан С. И.

Ведущее предприятие—Ново-Краматорский машиностроительный завод имени В. И. Ленина, г. Краматорск.

Автореферат разослан «

1974 г.

Защита ди

1974 г.

на заседании
прочности и
прочности м
дового Крас
имени Н. Э.
ская ул., дом

ике и
та Тру-
илища
ауман-

Ваши отзы
высылать по

ростьба

С диссер
лица.

у чи-

Ученый
кандидат т

1239957

Л-56503 от 15

А. А.

пр. 120.

Повышение требований к точности размеров и формы деталей при неуклонном росте производительности и экономичности технологических процессов приводит к необходимости более глубокого проникновения в физику динамических процессов, происходящих при обработке деталей на металлорежущих станках.

Разнообразие и сложность этих процессов нередко затрудняют или делают невозможным исследование их упрощенными методами, которые обычно используются при описании технологических процессов.

Примером одной из таких задач является процесс образования погрешностей при сверлении и растачивании глубоких отверстий, исследованию которого посвящена настоящая работа. До последнего времени методы повышения точности обработки глубоких отверстий не выходили за рамки эмпирических рекомендаций, не обладающих достаточной обоснованностью и универсальностью. Теоретический анализ процессов, возникающих при обработке глубоких отверстий, в настоящее время отсутствует. Исследовать эти процессы без привлечения современной теории колебаний и новейших математических методов решения дифференциальных уравнений практически невозможно. При точной формулировке задача исследования динамических процессов, возникающих при обработке резанием (в том числе отверстий), относится к задачам, лежащим на стыке двух дисциплин — теории обработки резанием и теории колебаний. Основной особенностью рассматриваемого процесса является копирование погрешностей с обработанного участка отверстия на обрабатываемый, что приводит к анализу динамических процессов с запаздывающим аргументом.

В данной диссертации делается попытка рассмотреть процесс обработки глубоких отверстий в наиболее полной постановке с учетом основных технологических и физических особенностей задачи, имеющих место в реальных условиях. В работе исследованы установившийся процесс образования погрешностей и его устойчивость при обработке глубокого отверстия на глубокорасточном станке. Проведен анализ влияния на точность обработки ряда параметров системы и технологических схем с определением оптимальных вариантов. Разработаны практические рекомендации по повышению точности обработки глубоких отверстий, которые проверены экспериментально и приняты к внедрению в производство.

Во ВВЕДЕНИИ изложены необходимые сведения из технологии обработки глубоких отверстий, которые в полной мере содержатся в работах таких авторов, как И.С.Веремейчук, В.Ю.Капцельсон, К.А.Минков, В.Н.Подураев, М.В.Потыгайло, Н.Д.Троицкий, С.А.Черничкин, Парсон Г., Окабе Р., Окубо Т. и др.

Описаны основные дефекты (погрешности размеров и формы) глубоких отверстий и проведен анализ их эмпирических величин, взятых как из литературы (Н.И.Бахтияров, М.А.Минков, Н.Д.Троицкий, Окабе Р. и др.), так и из опыта промышленности. При этом показано, что удовлетворение технических требований по точности обработки является сложной задачей, зачастую требующей многократного повторения технологических операций, больших материальных затрат.

Обработку глубоких отверстий ведут, опираясь на общие эмпирические рекомендации, не учитывающие особенности конкретных технологических систем. Например, точность обработки заходного участка определяет точность обработки всего отверстия. А существующие эмпирические зависимости являются излишком конкретными, не отражающими разнообразие действия факторов и сложность динамических процессов, происходящих при обработке. Так, Н.Д.Троицкий установил эмпирическую зависимость величины увода оси отверстия от поперечной разнотвердости (разнообрабатываемости) материала заготовки.

Отраслевая конференция, проведенная в июне 1971г. Отраслевой Лабораторией по технологии обработки глубоких отверстий при Ленинградском механическом институте, показала, что в последнее время ведутся широкие экспериментальные исследования процессов обработки глубоких отверстий. Различные исследователи изучают влияние на точность обработки тех или иных факторов, выдвигая их в качестве основной причины. Собственно процесс образования погрешностей остается при этом невыясненным. При этом теоретическому исследованию уделено недостаточно внимание по сравнению с экспериментальным, что частично объясняется спецификой и сложностью этого процесса.

Попытки теоретического исследования процессов при обработке глубоких отверстий наиболее последовательно и глубоко осуществлены в работах В.Н.Подураева, который решил задачу о статической жесткости технологической системы с учетом продольно-по-

перечного изгиба борштанги и податливости ее опор, исследовал влияние вращения шпинделя на технологическую жесткость системы, рассматривал вопросы динамической устойчивости борштанги при обычном и вибрационном сверлении. Проблемы жесткости и виброустойчивости технологических систем при обработке глубоких отверстий посвящены также работы В.И.Астанина, Г.Г.Инсземцева, М.А.Царенко и других авторов.

Анализ показал, что лежащее в основе работ указанных авторов представление о деформируемости технологической системы под воздействием внешних факторов, будучи необходимым, является недостаточным для описания и исследования динамического процесса образования погрешностей глубокого отверстия. Оно не позволяет объяснить ряд важных опытных фактов, например: превалирование величины увода оси над отклонением диаметра отверстия на один-три порядка, когда известно, что переменная составляющая силы резания не превышает постоянную; кольцообразность поверхности отверстия, постоянный рост величин погрешностей по мере обработки отверстия с постоянным вылетом борштанги и т.д.

Недостаточно изучены динамические особенности глубокорасточных станков, которые необходимо рассматривать как системы с распределенными параметрами, а также взаимодействие этих систем с процессом резания и другими рабочими процессами. Наличие копирования погрешностей с обработанной поверхности отверстия на обрабатываемую приводит к необходимости исследования динамических процессов с запаздыванием во времени, что совершенно не проводилось предыдущими исследователями. В результате этого в настоящее время отсутствуют обоснованные практические рекомендации по повышению точности и виброустойчивости при обработке глубоких отверстий в конкретных технологических системах.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена исследованию основных особенностей процесса образования погрешностей в статической и одномассовой системах с запаздыванием на примере обработки глубокого отверстия неуравновешенным инструментом, закрепленном на однопролетной невращающейся борштанге при работе прямой ("на сжатие") и обратной ("на растяжение") подачами.

В статической системе определяются поперечные перемещения точек борштанги под воздействием изгибающего момента, вызванного силами резания $M = P_x \cdot e - P_y \cdot a$ и смещения боковой колодки

инструмента (сверла или расточной головки) на величину погрешности обработанной поверхности

$$y(l, t) = -y(l + a, t - \tau) = -z(t - \tau), \quad (1)$$

Затем определяется перемещение поперечного сечения борштанги, в котором находится вершина периферийного резца, формирующего поверхность отверстия, и уравнение процесса образования погрешностей приводится к виду

$$z(t) = -P \cdot z(t - \tau) + Q_n \cdot V_n(t), \quad (2)$$

где $P = 1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon$; $Q_n = \frac{1}{4} \cdot \varepsilon$; $\varepsilon = \frac{Q}{E}$; $V_n(t) = \frac{M(t) \cdot l^2}{EJ}$

$z(t)$ - погрешность обработки поверхности отверстия;

$V_n(t)$ - приведенные силы резания;

P - коэффициент копирования;

Q_n - функция приведения сил резания;

l - длина борштанги;

a - расстояние от вершины периферийного резца до точки контакта колодки;

τ - время прохождения участка a , время запаздывания;

EJ - жесткость поперечного сечения борштанги при изгибе;

$\varepsilon > 0$ - прямая подача, $\varepsilon < 0$ - обратная подача.

Раскладывая возмущения и перемещения в ряд Фурье по углу взаимного поворота борштанги и детали и решая конечно-разностное уравнение (2), можно получить выражение для определения комплексной амплитуды k -ой гармоники погрешности на n -ом участке длины отверстия:

$$R_k(n) = (-1)^{n \cdot (k+1)} \cdot \left[\prod_{v=1}^n P(v) \cdot R_k(0) + \sum_{v=1}^n (-1)^{v \cdot (k+1)} \cdot \prod_{t=v+1}^n P(t) \cdot Q_n(v) \cdot V_k(v) \right], \quad (3)$$

где $R_k(0)$ - погрешность обработки заходного участка.

Причем $k = 0$ - соответствует отклонению диаметра; $k = 1$ - эксцентриситету (уводу) оси, $k = 2$ - овальности и т.д. В системе с постоянными параметрами анализ оценок изменения безразмерных погрешностей обработки, вызванных начальными отклонениями и силами резания (внешним фактором) показал, что эти изменения практически не зависят от жесткости борштанги; нечетные гармоники погрешности определяются прежде всего относительной длиной отверстия, равной отношению длины детали к длине борштанги ($x = l : l$), а четные пропорциональны также относительной длине

колодки" ε . Порядок отношения величин четной (отклонение диаметра) и нечетной (увод оси) гармоник равен $\varepsilon = 10^{-1} + 10^{-3}$, что подтверждается опытом промышленности. Причем знак отклонения четных гармоник меняется при переходе от участка к участку отверстия (длиной Q) и поверхность отверстия должна быть кольцеобразной, что также подтверждается практикой. При $\varepsilon > 0$ точность обработки тем выше, чем меньше (X), чем длиннее борштанга, при $\varepsilon < 0$ - наоборот. Рост погрешности от ее номера k не зависит. Показано, что ось борштанги и ось отверстия являются физически разными и судить об оси отверстия по поведению оси борштанги можно только косвенно. По однородной части уравнения (2) исследуется устойчивость процесса образования погрешностей, хотя собственно борштанга в данном случае устойчива. Показано, что при работе прямой подачей процесс неустойчив, а при обратной - устойчив.

В одномассовой системе решается задача о кинематическом возмущении колебаний борштанги запаздывающей обратной связью (I) и изучаются основные особенности динамических систем с запаздыванием. Уравнение процесса имеет вид:

$$\ddot{z}(t) = -P \cdot \ddot{z}(t-\tau) + Q_n \cdot \ddot{v}_n(t) + \int_0^t P \cdot \sin p(t-u) \cdot [P_1 \ddot{z}(u-\tau) - Q_n \ddot{v}_n(u)] du \quad (4)$$

Уравнение (4) с запаздыванием τ нейтрального типа решается либо методом шагов (Л.Э.Эльсгольц), либо методом асимптотических разложений сингулярно возмущенных уравнений (А.Б.Васильева). В настоящей работе исследуется установившийся процесс, решение которого получено в форме (3), а коэффициент копирования P^* и функция приведения Q_n^* имеют вид:

$$P^* = P \cdot P_1 \cdot \frac{1 - (k\omega)^2}{p^2 - (k\omega)^2} = 1 + \varepsilon \cdot \left[\frac{1}{4} - 2 \cdot \frac{(k\omega)^2}{1 - (k\omega)^2} \right],$$

$$Q_n^* = Q_n \cdot \frac{P^2}{p^2 - (k\omega)^2} = \frac{1}{4} \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{1 - (k\omega)^2},$$

где $P_1 = 2\varepsilon$, $\bar{\omega} = \frac{\omega}{p}$

p - частота собственных колебаний.

В динамической системе интенсивность роста погрешностей уже определяется динамической жесткостью системы, зависящей от относительной угловой скорости вращения $\bar{\omega}$

Показано, что амплитудно- и фазочастотные характеристики процесса являются функциями относительного пути X , пройден

ного системой и становятся постоянными, если время работы системы бесконечно.

Амплитудно-фазовым методом, разработанным Я.З.Цыпкиным, исследуется устойчивость процесса образования погрешностей на основе характеристического квазиполинома, полученного из (4):

$$K(z) = 1 + e^{-\tau z} \cdot (P - P_1 \cdot \frac{z^2}{z^2 + p^2}) = 0, \quad (5)$$

где z - аргумент преобразования Лапласа.

Показано, что при обратной подаче имеется одна область устойчивости, определяемая условием

$$1.53 \leq \frac{p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot S} \cdot \varepsilon \leq 2 \cdot (1 + \frac{1}{2} \varepsilon),$$

где S - подача резания, мм/об.

Асимптотические корни уравнения (5) показывают, что при прямой подаче в динамической системе процесс более неустойчив, чем в статической. Установлено, что уравнение (5) справедливо при бесконечном времени работы системы и позволяет исследовать устойчивость процесса при переходе между участками длительностью τ (длиной λ). Для исследования устойчивости внутри γ -го участка получен характеристический квазиполином для динамических отклонений

$$1 - P_1 \cdot \frac{z^2}{z^2 + p^2} \cdot [e^{-\tau z} - P \cdot e^{-i\tau z} + \dots + (-P)^{\gamma-1} \cdot e^{-\gamma\tau z}] = 0 \quad (6)$$

и показано, что при $\gamma \rightarrow \infty$ оба подхода дают одинаковые результаты. Амплитудно-фазовым методом исследована устойчивость на ряде последовательных участков и определены границы общих областей устойчивости на совокупности Π -участков отверстия:

$$(2k + 1 - \frac{2}{n+1}) \cdot (1 + \varepsilon) \leq \frac{p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot S} \cdot \varepsilon \leq (2k + 1) \cdot \sqrt{1 - \varepsilon \cdot \pi}, \quad \varepsilon > 0;$$

$$(2k - \frac{1}{3}) \leq \frac{p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot S} \cdot \varepsilon \leq 2k \cdot (1 + \varepsilon), \quad \varepsilon < 0,$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Показано, что области устойчивости при прямой подаче сжимаются в точки при $\pi \rightarrow \infty$, а при обратной - постоянны. Менее жесткая система является более устойчивой, так как ослабляет процесс копирования. Определены пределы изменения ε и x , в которых обеспечивается устойчивая обработка отверстия.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ изучается динамический процесс образования погрешностей при обработке глубокого отверстия вращающейся или невращающейся борштангой, установленной на произвольное число

стоек и рассматриваемой как система с бесконечным числом степеней свободы. Анализируется и обосновывается расчетная схема задачи, исследуются установившийся процесс и его устойчивость и другие вопросы. Принятая расчетная схема позволяет исследовать общие закономерности при сверлении и растачивании глубоких отверстий неуравновешенным инструментом как прямой, так и обратной подачами. Задача решается в линейной постановке.

Дифференциальные уравнения поперечных колебаний вращающейся борштанги имеют вид

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \alpha \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{EJ}{l^3} \cdot \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} &= q_x(z, t), \\ m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \alpha \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{EJ}{l^3} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} &= q_y(z, t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $z = z/l$ - безразмерная координата;

$x(z, t)$ - перемещение в основной плоскости: периферийный резец - боковая колодка - ось борштанги; m - погонная масса борштанги; α - коэффициент внешнего вязкого трения;

q - внешняя распределенная нагрузка.

Граничные условия в основной плоскости:

$$\begin{aligned} x(0, t) &= V_n(t), & x(1, t) &= V_1^*(t), \\ \frac{\partial x(0, t)}{\partial z} &= V_{n+1}(t), & \frac{\partial^3 x(1, t)}{\partial z^3} &= V_n(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$x(0, t) = V_i(t), \quad i = 2, 3, \dots, n-1,$$

$$V_1^*(t) = V_1(t) - z(t - \tau), \quad V_{n+1}(t) = \theta(t) \cdot l,$$

$$z(t) = x(1 + \varepsilon, t) - V_0(t) - V_1(t);$$

$\theta(t)$ - непараллельность в заделке борштанги;

$V_i(t)$ - смещения на стойках борштанги;

$V_0(t)$ - износ резца и другие факторы при его вершиниз;

$V_1(t)$ - биение детали;

$V_n(t)$ - несоосность в заделке борштанги;

$n-1$ - число стоек борштанги.

В случае вращения борштанги сделан переход к вращающейся системе координат, связанной с периферийным резцом и введена замена координат

$$\bar{x}_1 = x_1 + i y_1, \quad \bar{x}_2 = x_1 - i y_1, \quad i^2 = -1,$$

позволяющая получить систему двух независимых уравнений:

$$m \cdot \frac{\partial^2 z_{12}}{\partial t^2} + (\alpha \pm i 2m\omega) \cdot \frac{\partial z_{12}}{\partial t} + \frac{EJ}{l^3} \cdot \frac{\partial^4 z_{12}}{\partial z^4} - (m\omega^2 \mp i\alpha\omega) \cdot z_{12} = q_{12}(z, t), \quad (9)$$

где верхний знак соответствует индексу 1, нижний - 2.

Соответственно преобразуются граничные условия.

Решение задачи о кинематическом возмущении колебаний балки на произвольном числе опор проведено методом, разработанным такими авторами, как С.П. Тимошенко, Mindlin R., Goodman L. и др., суть которого состоит в том, что решение ищется в виде суммы двух слагаемых. Первое слагаемое удовлетворяет статическому уравнению равновесия и неоднородным граничным условиям, второе - полному уравнению и однородным граничным условиям. За начальные условия приняты статические отклонения на заданном участке отверстия. С помощью метода Галеркина получено окончательное решение этой задачи и на его основе уравнение процесса образования погрешностей в форме

$$\begin{aligned} z(t) = & -P(1+\varepsilon) \cdot z(t-\tau) + Q(1+\varepsilon) \cdot V(t) + \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} P_j \cdot \varphi_j(1+\varepsilon) \cdot \int_0^t Y_j(t-u) \cdot [\ddot{z}(u-\tau) + 2n \cdot \dot{z}(u-\tau)] \cdot du + \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} Q_j \cdot \varphi_j(1+\varepsilon) \cdot \int_0^t Y_j(t-u) \cdot [\ddot{V}(u) + 2n \cdot \dot{V}(u)] \cdot du \end{aligned} \quad (10)$$

в случае вращения детали, и в случае вращения борштанги:

$$\begin{aligned} z(t) = & -P(1+\varepsilon) \cdot z(t-\tau) + Q(1+\varepsilon) \cdot V_x(t) + \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} P_j \cdot \varphi_j(1+\varepsilon) \cdot \int_0^t Y_j(t-u) \cdot \{ \cos \omega(t-u) \cdot [L_1 z(u-\tau) - L_2 z(u-\tau+\tau_1)] + \\ & + \sin \omega(t-u) \cdot [L_1 z(u-\tau+\tau_1) + L_2 z(u-\tau)] \} \cdot du + \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} Q_j \cdot \varphi_j(1+\varepsilon) \cdot \int_0^t Y_j(t-u) \cdot \{ \cos \omega(t-u) \cdot [L_1 V_x(u) - L_2 V_y(u)] + \\ & + \sin \omega(t-u) \cdot [L_1 V_y(u) + L_2 V_x(u)] \} \cdot du \end{aligned} \quad (11)$$

где
$$L_1 A(u) = \frac{\partial^2 A}{\partial u^2} + 2n \cdot \frac{\partial A}{\partial u} - \omega^2 \cdot A; \quad L_2 A(u) = 2\omega \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial u} + n \cdot A \right);$$

$$Y_j(t) = \frac{e^{-nt}}{P_j} \cdot \sin p_j \cdot t; \quad p_j = \sqrt{P_j^2 - n^2}, \quad 2n = \frac{\alpha}{m};$$

P_j - частота собственных колебаний;

P_j, Q_j - коэффициенты разложения статических функций $P(x)$ и $Q(x)$ в ряд по собственным $\varphi_j(x)$;

$V(t)$ - произвольный приведенный внешний фактор.

В работе определены выражения P_j, Q_j, P, Q для всех рассматриваемых внешних факторов. Решение уравнений уста-

новившегося процесса получено в форме (3), причем P^* и Q^* имеют вид:

$$A^* = A - \sum_{j=1}^{\infty} A_j^* \cdot \frac{-(k\omega)^2 + i2nk\omega}{-(k\omega)^2 + i2nk\omega + p_j^2}$$

при вращении детали и в случае вращении борштанги:

а) для геометрических внешних факторов и силы веса борштанги

$$A^* = A - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} A_j^* \cdot [B_1 \cdot (1 + i^{k+1}) + B_2 \cdot (1 - i^{k+1})],$$

б) для сил резания

$$A^* = A - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} A_j^* \cdot [B_1 \cdot e^{i\varphi_n} + B_2 \cdot e^{-i\varphi_n}],$$

где $B_1 = \frac{-\omega^2(k+1)^2 + i2n\omega \cdot (k+1)}{-\omega^2(k+1)^2 + i2n\omega \cdot (k+1) + p_j^2}$; $A_j^* = A_j \cdot \varphi_j(n\varepsilon)$; $\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{V_{nx}}{V_{ny}}$;

k - номер гармоники погрешности или возмущения; A - статическая величина.

Анализ показывает, что k -я гармоника погрешности имеет резонансные частоты, равные $\frac{p_j}{k}$ при вращении детали, и $\frac{p_j}{k+1}$ - при вращении борштанги. В последнем случае смежные гармоники одинаковой четности имеют общие резонансные частоты. Поэтому, например, увод оси всегда должен сопровождаться отклонением диаметра - овальностью и т.д., что наблюдается на практике. При вращении борштанги геометрические внешние факторы и сила веса борштанги, вызывающие эксцентриситет (увод) оси, преобразуются системой статически, а отклонения диаметра, динамически, имеют резонансные частоты возмущения, равные частотам колебаний борштанги.

Рассмотрена сходимость разложений перемещений в ряды по собственным функциям в окрестности точки кинематического возмущения (колодки инструмента) и показано, что запись кинематических возмущений в правую часть уравнений движения с помощью обобщенных функций нерациональна.

Исследована устойчивость процесса в системе с бесконечным числом степеней свободы и показано, что процесс всегда неустойчив. Причем, степень неустойчивости определяется числом копируемых (передаваемых от участка к участку) форм колебаний.

Чем шире и короче колодки инструмента, тем меньше степень неустойчивости. Максимальное отклонение от начальных возмущений зависит от относительной длины отверстия x .

Показано, что формы колебаний связаны слабо и дальше задача устойчивости рассматривается в одномассовой системе. Для одной формы колебаний получены условия устойчивости с учетом вязкого внешнего трения. Так, на бесконечном отрезке времени при обратной подаче ($\varepsilon < 0$) необходимо, чтобы

$$(1 - 4\varepsilon \cdot \frac{\delta}{\pi^2 p}) \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot (1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{\delta^2}{\pi^2 p^2}) \leq \frac{pT}{\pi} \leq (2 + \frac{4}{3} \cdot \frac{\delta}{\pi^2 p}) \cdot (1 - \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{8} \cdot \frac{\delta^2}{\pi^2 p^2}),$$

где δ - логарифмический декремент затухания.

В этом же случае получено условие абсолютной устойчивости, не зависящей от T

$$\frac{\delta}{2\pi} > 0,169 \cdot (1 + 1,75 \cdot \varepsilon).$$

Условия устойчивости внутри конечных отрезков времени на совокупности Π участков при прямой подаче имеют вид

$$(2k+1 - \frac{2}{\pi+1} - \frac{2}{\pi+1} \cdot \frac{\delta}{\pi^2} \cdot \frac{1+3\varepsilon}{2\varepsilon}) \cdot (1+\varepsilon) \leq \frac{pT}{\pi} \leq (2k+1 + \frac{2}{\pi+1} \cdot \frac{\delta}{\pi^2} \cdot \frac{1-3\varepsilon \cdot \Pi}{2\varepsilon \cdot \Pi}) \cdot (1-\varepsilon \cdot \Pi),$$

А условие абсолютной устойчивости

$$k=1,2,3,\dots,\infty. \quad |x| \leq \frac{2}{9} \cdot \frac{\delta}{\pi}.$$

Показано, что трение существенно расширяет границы областей устойчивости. Определены пределы изменения ε и x , обеспечивающие устойчивость процесса в системе с трением.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена анализу технологических систем, наиболее часто применяемых в промышленности. Полагается, что в системе имеется внутреннее трение, которое записывается в комплексной форме, предложенной Е.С.Сорокиным.

Проведен анализ динамической характеристики процесса развала в форме, разработанной В.А.Кудиновым и показано, что для исследования установившегося процесса образования основных погрешностей отверстий средних и крупных диаметров достаточна статическая характеристика.

Получено замкнутое решение в нормальных фундаментальных функциях уравнения процесса образования погрешностей в общем случае и разработаны формулы для конкретных случаев обработки как при вращении детали, так и при вращении борштанги, работающей как с прямой, так и с обратной подачами. Исследовано влияние

обратной связи по силам резания на точность обработки отверстий.

Получены формулы для определения кривизны оси отверстия, определяемой как интегральный критерий качества установившегося процесса:

$$K_0 = \frac{1}{8} \pi \cdot \sum_{j=1}^n \{ [P^*(y) - 1]^2 \cdot \prod_{k=1}^j P^2(k) \} \cdot R_k(0),$$

$$K_1 = \frac{1}{8} \pi \cdot \sum_{j=1}^n \{ [P^*(y) - 1] \cdot E_1(y) + Q_1^*(y) \} \cdot V_1, \quad (12)$$

где ϵ — безразмерный эксцентриситет.

Построены амплитудно- и фазочастотные характеристики эксцентриситета, кривизны оси и отклонения диаметра для случаев одно-, двух- и трехпролетных борштанг в практически возможных пределах изменения параметров системы. Результаты расчета представлены в графической форме и позволяют рассчитать ожидаемую величину погрешности обработки глубокого отверстия.

Анализом установлено, что основными параметрами системы, в значительной мере определяющими точность обработки отверстий, являются: относительная длина отверстия X ; относительный начальный вылет борштанга X ; относительная угловая скорость вращения $\bar{\omega}$; число стоек борштанга. А неосновными — относительная длина участка отверстия (колодки) ϵ , коэффициент обратной связи по силам резания, осевая сила резания и др.

Установлены такие области изменения $\bar{\omega}$, в которых точность обработки в динамической системе не ниже, чем в статической. В частности, при прямой подаче это первая дорезонансная область. Разработана методика выбора основных параметров, обеспечивающих работу в областях точной обработки.

Установлено, что наиболее рациональной, обеспечивающей высокую точность обработки, является двухпролетная борштанга с одной стойкой. Показано, что в особых случаях схема работы с обратной подачей ("на растяжение") может обеспечить повышенную точность. Наибольший вес в общем балансе погрешностей обработки принадлежат таким внешним факторам, как: смещение первых опор борштанга, погрешности обработки заходного участка, биение обрабатываемой детали на люнетах. Результаты исследований в этой главе могут быть применены при проектировании инструментов и станков для обработки глубоких отверстий, при проектировании технологических процессов и при внедрении их в производство с целью выбора оптимальных условий, обеспечивающих

ших точность и виброустойчивость при обработке.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена экспериментальным исследованиям основных положений и результатов теории. В ней также изложены результаты производственных испытаний при внедрении практических рекомендаций и новых конструкций инструмента и виброгасящей муфты, разработанных в данной работе. Приведены указанные конструкции и рекомендации.

Планирование, проведение и обработка экспериментов проведены по методу дробного факторного эксперимента (ДФЭ)

В первой серии опытов с тремя факторами: смещение заходного участка отверстия, смещение первой стойки борштанги, неравномерность глубины резания было подтверждено наличие процесса копирования и его линейность. Получено хорошее совпадение теоретической зависимости эксцентриситета оси от указанных факторов с эмпирическим уравнением регрессии.

Во второй серии опытов с тремя факторами: относительный начальный вылет борштанги; относительная угловая скорость вращения ^{и с} было проверено влияние параметров системы на точность обработки, которое подтвердило теоретические выводы.

Производственные испытания, проведенные при совершенствовании процесса скоростной расточки отверстия диаметром 120 мм и длиной 4-9 мм, показали, что в результате применения теоретических рекомендаций точность обработки (по кривизне оси) увеличилась в 1,5-2 раза по сравнению с существующим технологическим процессом и в 2,0-3 раза по сравнению с применением быстроточущего инструмента. Производительность увеличилась в 1,2-1,5 раза за счет устранения необходимости повторения операций растачивания.

В ПРИЛОЖЕНИИ приведены программы, составленные на алгоритмическом языке АКМ-400 и предназначенные для расчетов на ЭЦВМ "Минск-22" амплитуд и фаз отклонения диаметра отверстия, эксцентриситета и кривизны оси для одно-, двух- и трехпролетных борштанг при прямой и обратной подачах как в случае вращения детали, так и борштанги. Даны пояснения к этим программам и показаны образцы таблиц вывода результатов счета. Дан метод определения нормальных фундаментальных функций и приведены формы для конкретных практических случаев.

Помежаны также акт внедрения результатов исследования в промышленность и расчет экономической эффективности от их

внедрения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые проведено теоретическое исследование динамического процесса образования погрешностей при обработке глубоких отверстий неуравновешенным инструментом.

2. Рассмотрены основные особенности этого процесса в статической и одномассовой системах с запаздыванием при обработке вращающейся детали однопролетной борштангой при прямой и обратной подачах.

3. Проведено теоретическое исследование процесса в системе с распределенной массой как при вращении детали, так и при вращении борштанги, установленной на произвольное количество опор, работающей с прямой или обратной подачей. Для указанных систем рассмотрены: установившийся процесс образования погрешностей и его устойчивость как на бесконечном, так и конечном отрезках времени.

4. Разработан метод исследования устойчивости динамических процессов в системах с запаздыванием при ограниченном времени работы системы.

5. Получено замкнутое решение в нормальных фундаментальных функциях уравнения установившегося процесса в общем случае и дан метод определения указанных функций.

6. Построены амплитудно- и фазочастотные характеристики отклонения диаметра, эксцентриситета и кривизны оси, определенной как интегральный критерий качества установившегося процесса, для ряда практических случаев: одно-, двух- и трехпролетных борштанг как при их вращении, так и при вращении детали, при работе с прямой подачей и обратной.

7. Выделены и проанализированы основные и неосновные параметры технологической системы, схемы обработки и внешние факторы, определяющие точность обработки глубоких отверстий.

8. Предлагается классифицировать погрешности глубоких отверстий по номеру гармоники их разложения в ряд Фурье, а особенно глубокие отверстия — по относительным размерам и динамическим свойствам борштанг, которыми они обрабатываются.

9. Основные положения и результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально. Разработаны практические рекомендации по повышению точности обработки глубоких

отверстий, а также новые конструкции инструмента и оснастки, которые прошли производственные испытания и приняты к внедрению. По отношению к существующему технологическому процессу растачивания глубоких отверстий точность обработки повысилась в среднем в 1,5-2 раза.

10. Методы, использованные в работе, могут быть применены к исследованию динамических процессов и в других системах с запаздыванием.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ:

1. Анализ точности обработки глубоких отверстий, "Изв. ВУЗов. Машиностроение", 1970, № 10 (в соавторстве с Р.К.Мещеряковым).

2. К расчету точности обработки глубоких отверстий, "Изв. ВУЗов. машиностроение", 1971, №10 (в соавторстве с Р.К.Мещеряковым).

3. Колебания борштанги глубокорасточного станка. "Изв. ВУЗов. Машиностроение", 1973, № 12.

4. Устойчивость процесса образования погрешностей глубокого отверстия, "Изв.ВУЗов. Машиностроение", 1974, №6 (в соавторстве с В.А.Светляцким).