

05.02.08
K592
Министерство науки, высшей школы и
технической политики Российской Федерации

Челябинский государственный
технический университет

На правах рукописи

Козлов Александр Васильевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ
ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОНЦЕВЫМИ МЕРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ
И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НА ОСНОВЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1993

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения, станки и инструмент" Златоустовского филиала Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Лакирев С.Г.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Пономарев В.П.,
кандидат технических наук, доцент
Мясников Ю.И.

Ведущее предприятие - ПО Машиностроительный завод
"Булат", г.Златоуст.

Защита состоится " 26 " января 1993 г. в 11-00 часов,
на заседании специализированного совета Д 053.13.05 в Челябинском
государственном техническом университете по адресу:
454080, г.Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76.

Просим Вас принять участие в заседании специализированного
совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью
учреждения, по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского
государственного технического университета.

Автореферат разослан " " декабря 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор экономических наук,
профессор

 И.А.Баев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Для получения точных отверстий широко используются процессы многопереходной обработки концевыми мерными инструментами (КМИ), к числу которых относятся спиральные сверла, многолезвийные зенкеры и развертки, сверла и другие мерные инструменты одностороннего резания, расточные блоки, абразивные и деформирующие инструменты. При многопереходной обработке точных отверстий, как правило, необходимо обеспечивать одновременно несколько параметров точности, для чего необходимо иметь четкое представление о закономерностях возникновения тех или иных погрешностей на каждом технологическом переходе и закономерностей технологического наследования погрешностей от перехода к переходу при многопереходной обработке концевыми мерными инструментами различных типов. Учет таких закономерностей при технологической подготовке производства (ТПП) точных отверстий позволит исключить операционный брак, уменьшить длину технологических маршрутов и повысить надежность технологических процессов. Многообразие применяемых КМИ, отсутствие четких рекомендаций по применению каждого из них, приводит к тому, что несмотря на то, что технологические маршруты обработки точных отверстий в два-три раза "длиннее" соответствующих маршрутов обработки наружных поверхностей, точность обработки обеспечивается лишь с большими затратами труда и времени. Отсутствие четкой методики точностной оценки спроектированных процессов обработки приводит к тому, что их натурная отладка занимает значительную часть времени, отведенного на ТПП, а успех ее чаще всего определяется личным опытом и квалификацией занимающихся ей технологов. Поэтому разработка научно обоснованной методики точностной диагностики и отладки процессов обработки отверстий, которая позволит существенно повысить эффективность процессов последовательной обработки отверстий КМИ, является актуальной задачей.

Данная работа выполнена в соответствии с научным направлением ЧТУ - "Совершенствование оборудования и технологии в машиностроении" (направление 2).

Цель работы. Совершенствование ТПП и повышение эффективности процессов многопереходной обработки отверстий КМИ за счет существенного увеличения надежности прогнозирования, диагностики причин образования погрешностей и отладки на основе адекватного

математического моделирования таких процессов.

Научная новизна работы. Разработана система математических моделей, представляющая собой ансамбль уравнений с отклоняющимся аргументом, описывающих формирование отверстий КМИ различного типа; компьютерное исследование этих моделей позволило выявить закономерности и механизмы искривления оси отверстия, образования огранки и разбивки отверстия, обусловленные осевыми биениями инструмента, а также погрешностей многопереходной обработки. Кроме того выявлено, что при диссимметрии инструмента уменьшение текущего радиус-вектора предварительно обработанного отверстия вызывает увеличение текущего радиус-вектора обрабатываемого отверстия, что позволило определить пути повышения точности обработки.

Разработана методика точностной диагностики и отладки процессов многопереходной обработки отверстий КМИ, которая может быть эффективно использована на различных этапах ТПП.

Практическая ценность работы. Разработаны рекомендации по прогнозу, диагностике и устранению причин, приводящих к образованию различных погрешностей при многопереходной обработке отверстий, разработаны пакеты прикладных программ расчета конкретных погрешностей обработки отверстий; разработаны, опробованы и рекомендованы к использованию 11 новых способов обработки отверстий, позволяющие снизить увод и искривление оси, повысить на 1-2 качества точность обработки отверстий по диаметру, в 2-3 раза увеличить размерную стойкость инструментов при снижении номенклатуры. Предложены рациональные планы обработки отверстий КМИ, которые могут быть использованы при проектировании процессов обработки отверстий в различных деталях.

На защиту выносятся: система математических моделей процессов формообразования отверстий, разработанные с учетом диссимметричности рабочей части КМИ, банк физических эффектов, отражающих закономерности образования и технологического наследования погрешностей обработки, методика точностной диагностики и отладки операций и процессов многопереходной обработки отверстий КМИ.

Реализация результатов работы. Результаты работы позволили эффективно проводить диагностику и отладку реальных процессов обработки отверстий, что обеспечило:

- повышение прямолинейности оси и точности формы отверстий, что полностью исключило брак деталей по этим параметрам;
- повышение размерной стойкости инструмента и снижение его расхода в

2-3 раза;

- снижение числа технологических переходов при обработке отверстий на I-2 перехода.

В результате был получен экономический эффект в сумме 200 т.руб.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на 7-ой Всесоюзной конференции "Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий", г.Москва, 1991 г.; на Первой Всесоюзной школе-конференции "Математическое моделирование в машиностроении", г.Самара, 1990 г.; на межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы автоматизации технологических процессов в машиностроении", г.Волгоград, 1989 г.; на республиканской научно-практической конференции "САПР конструкторской и технологической подготовки автоматизированного производства в машиностроении", г. Харьков, 1990 г.; на Уральской зональной научно-технической конференции "Повышение эффективности и уровня использования станков с ЧПУ, ПР и ППС", г.Екатеринбург, 1990 г.; на научно-технических конференциях ЧТУ в 1982-1992 годах; на объединенном семинаре кафедр "Техническая механика" и "Технология машиностроения, станки и инструмент" ЭФ ЧТУ в 1992 г.; на объединенном заседании технологических кафедр ЧТУ в ноябре 1992 г.

Публикации по теме диссертационной работы. Опубликовано 22 работы, в том числе 12 авторских свидетельств и патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов основного текста, заключения и приложения.

Объем работы: 242 страницы машинописного текста, в том числе 171 рисунок на 72 стр., 17 таблиц. В списке использованной литературы содержится 102 наименования.

Содержание работы

Состояние вопроса, задачи исследования

В настоящее время многими исследователями /Виноградов А.А., Денисенко В.И., Стралец А.А., Подураев В.Н., Синельников А.К., Уткин Н.Ф., Костюкович С.Г., Дечко Э.М. и др./ отмечалось влияние несимметрии инструмента на точность обработки отверстий, предлагались математические модели процессов обработки такими инструментами. Однако, приведенные ими модели в ряде случаев не могли объяснить причины и механизмы увода и искривления оси отверстия, погрешностей формы и размера. В то же время в работах ученых ЧТУ /Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М./ были разработаны достаточно простые модели, описывавшие формообразование отверстий

ружейным сверлом при его базировании на поверхность резания в процессе захода в отверстие и при установившемся резании, расточным блоком при различных режущих свойствах и осевом сдвиге лезвий и др. Исследование этих моделей позволило выявить и объяснить влияние осевых колебаний инструмента на искривления его траектории при базировании на поверхность резания, разбивку отверстия при диссимметрии режущих свойств и осевом сдвиге лезвий и некоторые другие закономерности. Вместе с тем не было исследовано влияние осевых биений и их фазо-частотных характеристик на точность обработки отверстий инструментами других типов. Приведенные математические модели учитывали лишь один вид диссимметрии инструмента - различную заостренность режущих кромок.

Этого оказалось недостаточно для надежной ТПД деталей с точными отверстиями, поскольку осталось невыясненным влияние таких факторов как погрешности главных углов в плане в сочетании с осевыми биениями лезвий, смещение перемычки с оси симметрии сверла и др.

Подобное положение подтверждается статистическими исследованиями точности и стойкости, проведенными при осуществлении реальных процессов многопереходной обработки точных отверстий КМИ на различных предприятиях.

Исходя из цели настоящей работы, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка системы математических моделей, адекватно учитывающих влияние диссимметрии инструмента и заготовки, а также их осевых вибраций, на точность обработки отверстий при их последовательном формообразовании КМИ, компьютерное исследование разработанной системы математических моделей с целью выявления основных закономерностей и механизмов образования погрешностей.
2. Экспериментальная проверка теоретически предсказанных закономерностей.
3. Разработка методики точностной диагностики и отладки процессов многопереходной обработки отверстий КМИ на различных этапах ТПД.
4. Прогноз, диагностика и устранение погрешностей при ТПД реальных процессов обработки отверстий КМИ, внедрение результатов работы в производство.

Система математических моделей формообразования отверстий КМИ

Наиболее полно процесс формообразования отверстия может быть описан системой дифференциальных уравнений, учитывающей наличие всех

возможных перемещений и действующих сил, в том числе и инерционных. Рассматривая лишь поперечные колебания, как наиболее существенно влияющие на параметры отверстия, можно свести эту систему к системе из 2-х уравнений, учитывающих действие только радиальных и тангенциальных сил, а также сил упругости. Эта система является сложной и нелинейной, что затрудняет её решение и использование для выявления закономерностей. Экспериментально установлено, что если допустить 10^{ти}-15^{ти}-процентную погрешность моделирования, можно пренебречь инерционными силами и тангенциальными перемещениями. Тогда формообразование отверстий КМИ с несимметричной рабочей частью может быть описано системой радиально-статических (рис.1) и геометро-кинематических моделей, описывающих соответственно процессы обработки лезвийными инструментами и инструментами одностороннего резания.

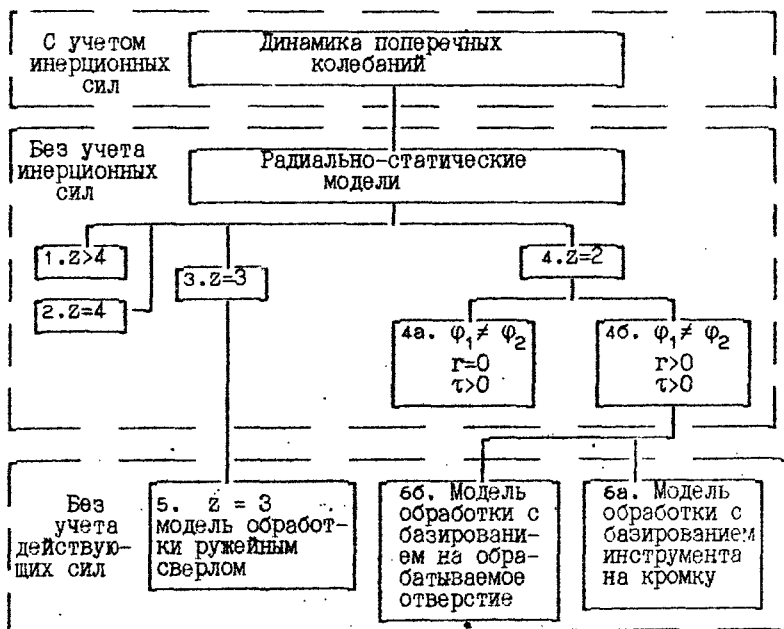


Рис. 1. Структура системы математических моделей

Рассмотрим процесс формообразования отверстия многолезвийным инструментом с различными режущими свойствами лезвий (мод.1, рис.1) прием осевой сдвиг лезвий $\tau=0$, главные углы в плане одинаковыми, угловой шаг лезвий $\phi = \frac{2\pi}{z}$, где z - число лезвий, вспомогательный угол

в плане $\varphi \gg 0$ (то есть влиянием калибрующих ленточек пренебрегаем).

Рассмотрим равновесие инструмента в процессе обработки только под действием на инструмент радиальных сил. Примем упрощающее предположение о том, что эти силы пропорциональны площадям срезаемого слоя Δ с соответствующими коэффициентами пропорциональности.

$$P_{y_i} = k_i \cdot h_i \cdot \delta_i,$$

где h_i - высота срезаемого слоя,

δ_i - основание срезаемого слоя,

k_i - коэффициенты пропорциональности сил резания площадям срезаемых слоев.

Можно приближенно считать, что срезаемый слой имеет форму параллелограмма (рис.2), размеры которого определяются радиус-вектором вершины рассматриваемого лезвия и значением радиус-вектора лезвия, опережающего рассматриваемое на $2\pi/z$ оборота. Таким образом, каждое последующее положение вершины любого лезвия зависит от положения предыдущего.

Тогда уравнение равновесия многолезвийного инструмента может быть записано (в системе XoY):

$$\left\{ \begin{aligned} J_x \cdot x(\varphi) &= -\sum_{i=1}^z k_i \cdot h_i \cdot \cos\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \left[\frac{z}{2} + \frac{x(\varphi) \cdot \cos\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) + y(\varphi) \cdot \sin\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right)}{\operatorname{tg} \varphi} \right. \\ &\quad \left. - \frac{x\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \cos\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) - y\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \sin\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right)}{\operatorname{tg} \varphi} \right] \quad (I) \\ J_y \cdot y(\varphi) &= -\sum_{i=1}^z k_i \cdot h_i \cdot \sin\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \left[\frac{z}{2} + \frac{x(\varphi) \cdot \cos\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) + y(\varphi) \cdot \sin\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right)}{\operatorname{tg} \varphi} \right. \\ &\quad \left. - \frac{x\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \cos\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) - y\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right) \cdot \sin\left(\varphi - \frac{1 \cdot 2\pi}{z}\right)}{\operatorname{tg} \varphi} \right] \end{aligned} \right.$$

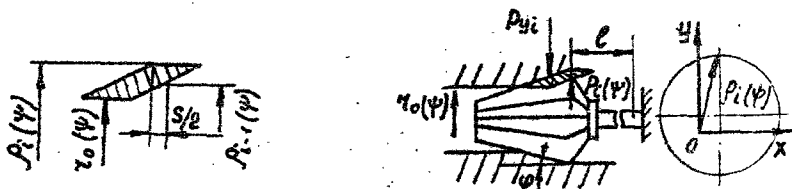


Рис. 2. Расчетная схема формообразования отверстий многолезвийным инструментом

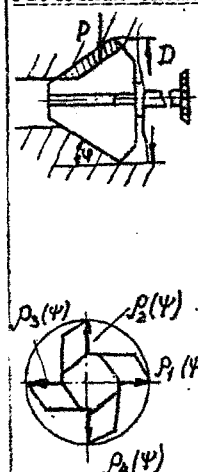
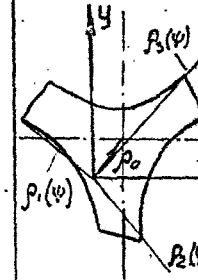
Подобным образом были составлены модели обработки 4^X и 3^X -лезвийными инструментами с различными режущими свойствами (мод.2,3-рис.1) которые могут описывать процессы зенкерования и развертывания. Наиболее полно влияние различных видов геометрической диссимметрии было рассмотрено на примере 2^X -лезвийного инструмента (мод.4 а,б,-рис.1), которые описывают процессы сверления, расверливания и зенкерования. Модели геометро-кинематического уровня, описывающие формообразование инструментами одностороннего резания, могут быть получены из условия геометрического взаимодействия кулачка с поверхностью обрабатываемого отверстия, либо из соответствующей радиально-статической модели путем асимптотического перехода, положив один из коэффициентов $k_1 \rightarrow \infty$. Так модель 4б была получена из модели 6а при $k_2 \rightarrow \infty$. Таким образом, была получена система радиально-статических и геометро-кинематических моделей формообразования отверстий КМИ с различными видами диссимметрии режущей части (табл.1), анализ которых позволяет выявить механизмы образования погрешностей и оценить их количественно.

Основные закономерности формообразования отверстий КМИ

Выявление основных закономерностей, выполненное путем проведения вычислительного эксперимента на полученных математических моделях, позволило уточнить главные факторы, влияющие на образование погрешностей отверстий и выявить механизмы их образования. Методика проведения вычислительного эксперимента предусматривает варьирование следующими основными параметрами технологического процесса и инструмента: осевая подача инструмента (S), частота (n) и амплитуда (a) осевых биений, глубина резания ($h(\psi)$) или текущий радиус-вектор предварительно обработанного отверстия ($r_0(\psi)$), диаметр инструмента (D), осевой сдвиг лезвий (τ), геометрические параметры лезвий (ϕ), коэффициенты резания и жесткости ($k_{упр}$), характеризующие физико-механические свойства материала детали и инструмента и ряд других параметров.

Были составлены программы расчета траекторий движения формообразующих точек инструмента. Для удобства анализа этих траекторий программы расчета предусматривали их вывод на экран дисплея, после чего изготавливалась твердая копия этой траектории. Все вычислительные эксперименты выполнялись на ПЭВМ IBM PC/AT.

Так например, исследование модели формообразования 2^X -лезвийным диссимметричным инструментом (модель 4а, табл.1) показало, что при

№	Расчетная схема	Математическая модель
2		<p>A. С учетом осевых колебаний ($r_0(\psi) = \text{const}$)</p> $\rho_1(\psi) = D - \rho_1(\psi - \pi) - \frac{S_0 \cdot \text{tg } \varphi}{4} \cdot \left[\frac{k_3 - k_1}{k_3 + k_1} + \frac{k_2 - k_4}{k_2 + k_4} \right] +$ $+ a \cdot \text{tg } \varphi \cdot \left[\frac{k_3 - k_1}{k_3 + k_1} \cdot \sin n \cdot (\psi - \frac{\pi}{2}) + \frac{k_2 - k_4}{k_2 + k_4} \cdot \sin n \cdot \psi \right];$ $\rho_2(\psi) = D - \rho_2(\psi - \pi) - \frac{S_0 \cdot \text{tg } \varphi}{4} \cdot \left[\frac{k_3 - k_1}{k_3 + k_1} + \frac{k_4 - k_2}{k_4 + k_2} \right] +$ $+ a \cdot \text{tg } \varphi \cdot \left[\frac{k_3 - k_1}{k_3 + k_1} \cdot \sin(n \cdot \psi - \frac{n \cdot \pi}{2}) + \frac{k_4 - k_2}{k_4 + k_2} \cdot \sin n \cdot \psi \right];$ $\rho_3(\psi) = D - \rho_1(\psi); \quad \rho_4(\psi) = D - \rho_2(\psi)$ <p>Б. С учетом переменности припуска ($r_0(\psi) \neq \text{const}$)</p> $\omega_1(\psi) = \frac{[E/B - E'/B' + \omega_2(\psi - \pi/2)] \cdot L/B - \omega_1(\psi - \pi/2) \cdot L'/C'}{(C/B - B'/C')}$ $\omega_2(\psi) = \frac{[E/C - E'/C' + \omega_2(\psi - \pi/2)] \cdot L/C - \omega_1(\psi - \pi/2) \cdot L'/B'}{(B/C - C'/B')}$ <p>где $C, C', B, B', E, E', L, L' =$ $= f(k_1, k_2, k_3, S_2, h(\psi), h(\psi - \pi), h(\psi - \pi/2), h(\psi - 3\pi/4))$ $h(\psi_1) = h_0 + \Delta h \cdot \sin \psi_1; \quad S = -S_2 \cdot \text{tg } \varphi;$ $\rho_1(\psi) = D/2 + \omega_1(\psi); \quad \rho_2(\psi) = D/2 + \omega_2(\psi);$ $\rho_3(\psi) = D/2 - \omega_1(\psi); \quad \rho_4(\psi) = D/2 - \omega_2(\psi);$</p>
3		$\rho_1(\psi) = D/2 + X(\psi) \cdot \cos \psi + Y(\psi) \cdot \sin \psi;$ $\rho_2(\psi) = D/2 + X(\psi) \cdot \cos(\psi - 2\pi/3) + Y(\psi) \cdot \sin(\psi - 2\pi/3);$ $\rho_3(\psi) = D/2 + X(\psi) \cdot \cos(\psi - 4\pi/3) + Y(\psi) \cdot \sin(\psi - 4\pi/3);$ <p>где $X(\psi) = \frac{Y(\psi - 2\pi/3) \cdot (C/A - C'/A')}{(B/A - B'/A')} +$ $+ \frac{X(\psi - 2\pi/3) \cdot (M/A - M'/A') - (E/A - E'/A')}{(B/A - B'/A')}$ $Y(\psi) = \frac{Y(\psi - 2\pi/3) \cdot (C/B - C'/B')}{(A/B - A'/B')} +$ $+ \frac{X(\psi - 2\pi/3) \cdot (M/B - M'/B') - (E/B - E'/B')}{(A/B - A'/B')}$</p> <p>$A, A', B, B', C, C', E, E', M, M' =$ $= f(k_1, k_2, k_3, S_2, a_1, \psi_1, h(\psi), h(\psi - 2\pi/3), h(\psi - 4\pi/3))$ $h(\psi) = h_0 + \Delta h \cdot \sin m \cdot \psi$ $h(\psi - 2\pi/3) = h_0 + \Delta h \cdot \sin(m \cdot \psi - 2\pi/3)$ $h(\psi - 4\pi/3) = h_0 + \Delta h \cdot \sin(m \cdot \psi - 4\pi/3).$</p>

4а		$\rho_1(\psi) = -\frac{P_2}{2 \cdot P_1} + \sqrt{\left[\frac{P_2}{2 \cdot P_1}\right]^2 - \frac{P_3}{P_1}}$ <p>где $P_1 = k_1 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - k_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2$ $P_2 = k_1 \cdot [B + A \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)] + k_2 \cdot (E + C \cdot \operatorname{tg} \varphi_2)$ $P_3 = k_1 \cdot A \cdot B - k_2 \cdot C \cdot E$ где $A = S \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - \rho_1(\psi - 2\pi)$ $B = \rho_1(\psi - \pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \rho_1(\psi - 2\pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 - D \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot (S/2 - \tau)$ $C = S \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + \rho_1(\psi - 2\pi)$ $E = D \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - \rho_1(\psi - \pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot (S/2 - \tau) + (1 + \tau) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$ $S = S/2 + a \cdot (\sin(n \cdot \psi) - \sin n \cdot (\psi - \pi/2))$</p>
4б		$\rho_1(\psi) = -\frac{P_2}{2 \cdot P_1} + \sqrt{\left[\frac{P_2}{2 \cdot P_1}\right]^2 - \frac{P_3}{P_1}}$ <p>$P_1 = k_1 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - k_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2$ $P_2 = k_1 \cdot (B + A) \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) + k_2 \cdot (E + C \cdot \operatorname{tg} \varphi_2)$ $P_3 = k_1 \cdot A \cdot B - k_2 \cdot C \cdot E$ $A = S \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - \rho_1(\psi - 2\pi)$ $B = \rho_1(\psi - \pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \rho_1(\psi - 2\pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 - D \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot (S/2 - \tau)$ $C = S \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + \rho_1(\psi - 2\pi)$ $E = D \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - \rho_1(\psi - \pi) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot (S/2 - \tau) - r_0 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$ $S = S/2 + a \cdot (\sin(n \cdot \psi) - \sin n \cdot (\psi - \pi/2))$</p>
5а		$\rho(\psi) = D/2 - [D/2 - \rho(\psi - \varphi_2) - D/2] \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} +$ $+ [\rho(\psi - \varphi_1) - D/2 + S] \cdot \frac{\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}$
6а		$\rho(\psi) = D - r_0 \cdot \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}\right] - (\tau - S/2) \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 - \rho(\psi - \pi) \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}$
6б		$\rho(\psi) = D - R_0(\psi)$

наложении на инструмент осевых колебаний с частотой $\omega_{ос} = \omega_{вр}$ наблюдается смещение инструмента в одном направлении (рис.3а), что вызывает увод и искривление оси отверстия (рис.3б). При частоте осевых колебаний $\omega_{ос} = 2 \cdot \omega_{вр}$ смещения инструмента не происходит (рис.3в), никаких отклонений не наблюдается и при $\omega_{ос} = 4 \cdot \omega_{вр}$, $6 \cdot \omega_{вр}$. При наложении на инструмент осевых колебаний с частотой $\omega_{ос} = 3 \cdot \omega_{вр}$ или $5 \cdot \omega_{вр}$ наблюдалось отклонение траектории инструмента соответственно 3 и 5 за один оборот, что вызовет образование огранки отверстия (рис.3г, д). На основании результатов этого вычислительного эксперимента можно сделать вывод о том, что увод оси отверстия возникает при частоте осевых колебаний диссимметричного 2-х лезвийного инструмента равной частоте вращения, при частоте осевых колебаний в нечетное число раз превышающей частоту вращения образуется огранка отверстия, а при частоте осевых колебаний в четное число раз превышающей частоту вращения увода и образования огранки не происходит.

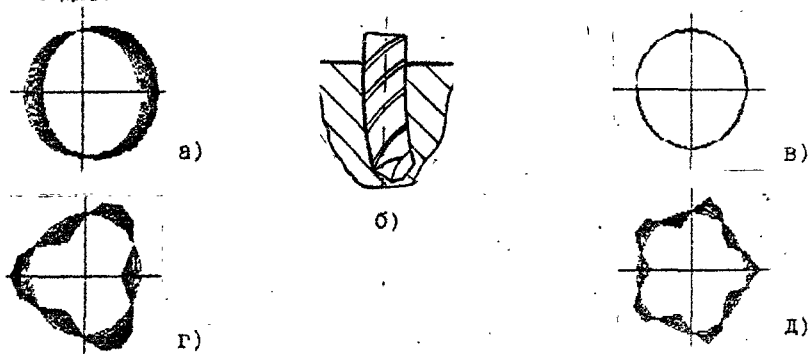


Рис.3. Траектория движения инструмента при наложении на него осевых колебаний различной частоты

Подобному компьютерному исследованию были подвергнуты все частные математические модели. В результате были выявлены следующие закономерности и механизмы образования погрешности (табл.2).

1. Виброперемещение диссимметричного инструмента при наложении осевых колебаний различной частоты.

Выявлено, что увод диссимметричного инструмента возникает во всех случаях при наложении на него осевых колебаний $\omega_{ос} = \omega_{вр}$, если имеет место взаимная подрезка поверхности резания образованных каждым формообразующим элементом или базирование на поверхность резания

а. Виброперемещение инструмента при осевых колебаниях

1. $\omega_{ос} = \omega_{вр}$

2. $\omega_{ос} = z \cdot \omega_{вр} + 1$

3. $\omega_{ос} \approx \omega_{вр}$

$\omega_{ос} \approx z \cdot \omega_{вр} + 1$



z=2



z=3



б. "медленные" поперечные вибрации инструмента

1. Вынужденные радиально-поперечные колебания силового возбуждения



$$\tau > S/2$$

$$\omega_k = \omega_{вр}$$



$$\tau > S/2$$

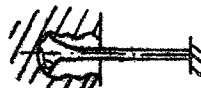
$$k_1 \gg k_2$$

2. Нестационарные затухающие колебания



$$\tau > S/2$$

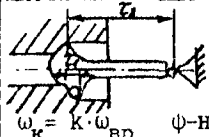
$$\omega_{II} = \frac{1}{K} \cdot \omega_{вр}$$



$$\tau < S/2$$

$$\omega_{II} = \omega_{вр}$$

3. Кинематически самовозбуждающиеся медленные автоколебания



$$\omega_k = k \cdot \omega_{вр}$$

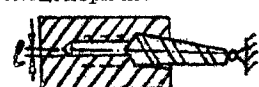
 ψ -неустойчивость

$$\text{при } \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \gg 1$$



4. Вынужденные колебания кинематического возбуждения

а) Предварительное отверстие эксцентрично



синфазные колебания при $\psi < 90^\circ$



колебания в противофазе при $\psi > 90^\circ$

б) Предварительное отверстие некруглое



колебания в противофазе при $R = z \cdot k$



синфазные при $R = z \cdot k + 1$
 $\omega_k = R$

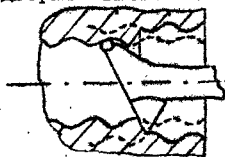


синфазные колебания при $R = z \cdot k + 1$

z=2

z=3

в) Продольная волнистость предварительного отверстия



$$\omega_k = \frac{1}{K} \cdot \omega_{вр}$$

колебания в противофазе

одного из элементов, в частности при неравенстве главных углов в плане и осевом биении лезвий. При наложении на такие инструменты осевых колебаний с частотой $\omega_{oc} = k \cdot z + 1$ происходит отклонение траектории инструмента несколько раз за один оборот, а при плавном изменении фазы осевых колебаний дополнительно происходит спиральное искривление траектории инструмента (табл.2б). При равенстве главных углов в плане смещения инструмента пропорциональны амплитуде осевых колебаний, а при диссимметрии этих углов - квадрату амплитуды. Отклонения траектории отсутствуют при $\omega_{oc} = k \cdot z$.

Все упомянутые виброперемещения инструмента приводят к образованию значительных погрешностей формы отверстия, искривление и уводу его оси (табл.2-а).

2. Закономерности возбуждения медленных (соизмеримых с частотой вращения) поперечных вибраций формообразующей части мерных инструментов, приводящих к образованию погрешностей.

а) При диссимметрии режущих свойств и осевом сдвиге лезвий возникают вынужденные радиально-поперечные колебания вращающегося инструмента с частотой $\omega_{\Gamma} = \omega_{вр}$ при $\tau > S/2$, при этом максимальная амплитуда колебаний наблюдается при $k_1 \gg k_2$, т.е. при базировании инструмента на обрабатываемую поверхность (табл.2-б1). Эти колебания вызывают разбивку отверстия.

б) При неодинаковых режущих свойствах лезвий и их осевом сдвиге вследствие несовпадения начальных условий при врезании инструмента в заготовку с положением статического равновесия возникают затухающие нестационарные колебания с частотой $\omega = \frac{S}{2 \cdot \tau} \cdot \omega_{вр}$ при $\tau > S/2$ и с частотой $\omega_{\Gamma} = \omega_{вр}$ при $\tau < S/2$, что приводит к волнистости отверстия (табл.2-б2). Установлено, что амплитуда этих колебаний возрастает с увеличением припуска и различия режущих свойств.

в) Установлено, что при базировании инструмента на обработанную поверхность наблюдается самовозбуждение автоколебаний, обусловленных кинематической неустойчивостью, связанной, например, с угловым расположением кулачков (ϕ -неустойчивость) (табл.2-б3). Автоколебания могут привести к смещению оси и огранке отверстия

г) Вследствие погрешностей расположения, формы и текущего размера предварительных отверстий обнаружен целый ряд эффектов возбуждения поперечных колебаний различной частоты.

Так при обработке эксцентрично расположенных отверстий могут возникнуть либо синфазные колебания (при $\phi > 90^\circ$), либо колебания, в

противофазе (табл.2-64а). При обработке исходных некруглых отверстий в зависимости от наличия и вида симметрии и диссимметрии наблюдаются синфазные поперечные колебания с частотой $\omega_{\Pi} = R$, при $R = k \cdot z + 1$ и симметричной заточкой лезвий, колебания в противофазе с частотой $\omega = R$ при $R = k \cdot z$ и базировании инструмента на предварительно обработанную поверхность и синфазные колебания при частоте $\omega_{\Pi} = R$ при $R = k \cdot z + 1$ (табл.2-64б). При периодических погрешностях формы в продольном сечении возникают поперечные колебания с частотой $\omega_{\Pi} = 1/k \cdot \omega_{вр}$ при осевом сдвиге лезвий, в том числе и при базировании на обработанную поверхность, что приводит к образованию волнистости обработанной поверхности (табл.2-64в).

Экспериментальная проверка выявленных закономерностей

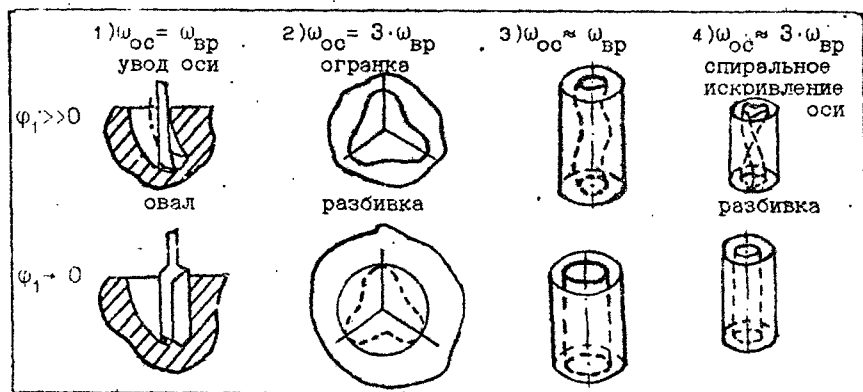
Для проверки теоретически предсказанных закономерностей была проведена серия натуральных экспериментов. Экспериментальная проверка закономерностей возбуждения поперечных вибраций проводилась на станках мод.1К62, 16К20, 134I, в том числе оснащенных приводом вращения детали и инструмента. Регистрация поперечных вибраций осуществлялась с помощью измерительного комплекса, включающего специальную тензометрическую оправку, в которой устанавливался инструмент усилитель "Топаз-3", шлейфовый осциллограф Н-II7.

При проверке закономерностей возбуждения поперечных вибраций конструктивно-геометрические параметры инструментов (их диссимметрия), режимы резания и материал заготовок выбирались такими, чтобы можно было визуально наблюдать образование погрешностей, вызванных наличием того или иного вида вибраций. Проведенные эксперименты подтвердили закономерности возбуждения поперечных колебаний всех типов. Были выявлены погрешности, образующиеся в связи с возбуждением того или иного вида колебаний. Особый интерес представляют результаты проверки закономерностей, связанных с поперечными и вынужденными колебаниями кинематического возбуждения, наличие которых обусловлено погрешностями предварительного отверстия. Эти закономерности позволили существенно расширить представления о технологическом наследовании погрешностей при многопереходной обработке отверстий КМИ. Так, например, при рассверливании эксцентрично расположенных отверстий в зависимости от значений главных углов в плане инструмент стремится либо к оси, либо от оси предварительного отверстия (табл.2-64а). При базировании инструмента на предварительно обработанное коническое отверстие, образуется отверстие с обратной конусностью.

Для проверки теоретически вскрытых закономерностей виброперемещения инструмента при его осевых биениях была спроектирована и изготовлена специальная установка для создания осевых колебаний, оснащенная набором сменных копиров для задания осевых колебаний различной частоты. При этом использовались инструменты одностороннего резания, базирующиеся на поверхность резания, и диссимметричные лезвийные инструменты. Для наглядного представления о дефектах отверстий и направлениях перемещения инструментов в экспериментах использовались заготовки из легкообрабатываемых материалов, в том числе из оргстекла. Проведенные эксперименты подтвердили теоретически предсказанные закономерности виброперемещения. Натурный эксперимент показал, что в зависимости от наличия у инструмента остро заточенных ленточек при частоте $\omega_{oc} = \omega_{вр}$ образуется либо увод ($\varphi_1 \gg 0$), либо овальность отверстия ($\varphi_1 \rightarrow 0$), при $\omega_{oc} = k \cdot z \cdot \omega_{вр} + 1$ - образуется либо огранка отверстия ($\varphi_1 \gg 0$), либо разбивка (при $\varphi_1 \rightarrow 0$), при $\omega_{oc} \approx \omega_{вр}$, $\omega_{oc} \approx k \cdot \omega_{вр} \cdot z + 1$ возможно образование спирального или некруглого отверстия ($\varphi_1 \gg 0$), либо происходит его значительная разбивка (табл.3).


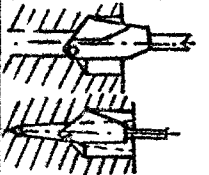
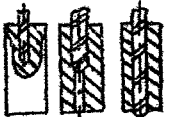
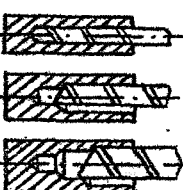
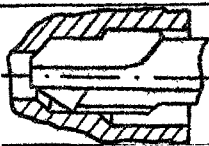
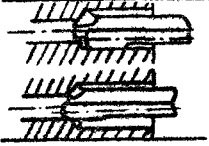
На основе результатов теоретического и экспериментального исследования и выявленных при этом закономерностей создан банк физических эффектов, возникающих при обработке отверстий КМИ, включающий закономерности возбуждения поперечных колебаний, закономерности технологического наследования и закономерности виброперемещения, фрагменты которого приведены в табл.2, 3.

Таблица 3



Результаты теоретического и экспериментального исследования легли в основу одиннадцати новых способов обработки отверстий (табл.4).

Таблица 4

Способы обработки отверстий КИМ, позволяющие управлять параметрами отверстий			
N	Схема осуществления способа	Сущность способа, его связь с теоретико-экспериментальным исследованием	Технологические возможности способа
1		При базировании инструмента на поверхность резания ему сообщают осевые колебания с частотой $\omega_{ос} = 3 \cdot \omega_{вр}$ а.с.1323248	1. Получение не-круглых отверстий 2. Управление "разбивкой" отверстия
2		Обработку осуществляют при базировании инструмента на поверхность предварительного отверстия. Диаметр обрабатываемого отверстия $D_{\circ} = 2 \cdot D_{ин} - d$ а.с. 1373484	1. Управление разбивкой в широких пределах 2. Компенсация размерного износа 3. Получение отверстий с обратной конусностью
3		Сверление отверстия осуществляют с 2-х сторон, сначала сверлом меньшего диаметра с одной стороны, затем сверлом нужного диаметра "на проход" а.с.1400794	Исключается образование уступа или излома
4		Обработку осуществляют при базировании инструмента на кромку, образованную пересечением поверхности резания и предварительно обработанной поверхности а.с. 1472185	Управление размером отверстия
5		Обработку N отверстий, диаметры которых составляют арифметический ряд, осуществляют с использованием комплекта инструментов, включающего m спиральных сверл стандартной заточки и n спиральных сверл специальной заточки $N = m \cdot 2^n$ а.с.1511006	Уменьшение номенклатуры применяемого инструмента в 5-8 раз
6		Опорный кулачек расположен между вершинами первого и второго лезвий а.с.1569098	Компенсация потери размера при износе или переточке инструмента
7		Перемещая опорный элемент в осевом направлении изменяют текущий диаметр отверстия патент РФ по заявке N4922123	1. Управление диаметром отверстия в широких пределах 2. Получение не-круглых отверстий

Методика точностной диагностики и отладки процессов обработки отверстий КМИ.

В основе методики лежат разработанные на базе банка физических эффектов диагностические и отладочные карты погрешностей обработки отверстий. Диагностическая карта содержит наиболее вероятные причины возникновения погрешностей отверстий, в них указаны математические модели, описывающие соответствующий процесс обработки, вид и фазо-частотные характеристики возникающих колебаний инструмента. В карте отладки по каждой из наиболее вероятных причин образования погрешности приведены рекомендации по исключению либо, уменьшению погрешностей обработки и пути их реализации. Методика диагностики и отладки предусматривает выполнение следующих этапов:

- 1 - установление погрешности обработки, которую необходимо уменьшить или исключить
- 2 - определение из числа наиболее вероятных причин действительных причин, вызвавших эту погрешность. При этом для количественной оценки погрешности, вызванной той или иной причиной, пользуются соответствующей моделью (табл. I)
- 3 - выбор одной или нескольких рекомендаций по устранению причин образования погрешностей и конкретные технические решения по реализации рекомендации
- 4 - проверка обеспечения заданной точности обработки по скорректированному техпроцессу с использованием системы моделей (табл. I)
- 5 - натурная отладка действующего технологического процесса.

Пример. При обработке отверстий $\varnothing 20^{+0,34}$ мм длиной 185 мм в детали "Корпус гидросилителя" обнаружен увод оси отверстия в пределах 0,4-0,5 мм. По картам диагностики и отладки установлено, что наиболее вероятной причиной погрешности является осевое биение и диссимметрия инструмента. Как показали измерения амплитуда осевых биений составила 0,05 мм, погрешность заточки углов в плане -4° . Расчитанная с использованием модели 4а (табл. I) величина увода при этих параметрах составляет 0,6-0,7 мм. Для уменьшения увода оси до 0,1-0,2 мм необходимо согласно расчета уменьшить амплитуду осевых биений до 0,02 мм, а погрешность углов в плане - до 1° , либо использовать для сверления отверстия ружейное сверло.

Эта же методика может быть применена при диагностике и отладке.

вновь проектируемых техпроцессов.

Использование приведенной выше методики позволило выполнить диагностику и отладку трех действующих технологических процессов обработки отверстий на П/О "Булат" г.Златоуст. В результате был получен экономический эффект свыше 200 тыс. рублей (в ценах, действующих до 1991 года).

Общие выводы по работе

1. Впервые разработана система математических моделей, представляющих уравнения с отклоняющимся аргументом, которая адекватно описывает формообразование отверстий КМИ различного типа и позволяет выполнять прогнозирование точности обработки, диагностику причин брака, доводку и отладку технологических маршрутов обработки точных отверстий как на стадии проектирования, так и при внедрении в производство.

2. Теоретически предсказаны и экспериментально подтверждены закономерности искривления траектории движения инструментов при наложении осевых колебаний различной частоты. Установлено, что в зависимости фазо-частотных характеристик осевых колебаний диссимметричного инструмента происходит увод, плоское или пространственное искривление оси отверстия, образование некруглости и разбивка отверстия. В частности, при частоте осевых колебаний равной частоте вращения происходит плоское искривление и увод оси отверстия. При частоте колебаний превышающей частоту вращения в целое число раз происходит образование соответствующей огранки, кроме случаев, когда частота осевых колебаний кратна числу лезвий инструмента. При плавном изменении фазы осевых колебаний происходит пространственное искривление оси отверстия.

3. Теоретически показаны и экспериментально подтверждены закономерности и механизмы образования погрешностей, вызванных поперечными вибрациями инструмента, а именно:

- затухающие нестационарные поперечные колебания, вызванные несовпадением начальных условий с положением статического равновесия приводят к образованию волнистости отверстия;
- вынужденные колебания силового возбуждения, обусловленные геометрической диссимметрией вращающегося инструмента, приводят к разбивке отверстия;
- автоколебания инструментов одностороннего резания при их базировании на обработанную поверхность, вызванные неустойчивостью процесса обработки при качающемся закреплении короткого инструмента.

приводят к образованию огранки и смещению оси отверстия;

- вынужденные колебания кинематического возбуждения, обусловленные погрешностями расположения и формы предварительно обработанных отверстий, приводят к появлению соответствующих погрешностей обрабатываемых отверстий;

4. Установлено, что при любой диссимметрии мерного инструмента имеет место "негативное" наследование погрешностей формы и диаметрального размера, а именно, любое изменение текущего радиус-вектора предварительно обработанного отверстия вызывает полярно противоположное изменение радиус-вектора обрабатываемого отверстия. Так, прямая конусность предварительно обработанного отверстия приводит к обратной конусности обрабатываемого, огранка предварительно обработанного отверстия приводит на последующем переходе к образованию противоположно ориентированной огранки с тем же числом граней;

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований получен банк физических эффектов, отражающих взаимосвязи действующих факторов с параметрами точности, что позволяет исключить большую часть погрешностей уже на стадии проектирования;

6. Разработано 11 новых способов обработки отверстий инструментами с диссимметричной рабочей частью, позволяющие надежно управлять такими параметрами отверстий как увод оси, форма и размер отверстия;

7. Разработана инженерная методика прогноза, диагностики и устранения точностных отказов, позволяющая выявить причины образования погрешностей, дать их количественную оценку и рекомендации по их уменьшению или устранению;

8. Выполнена диагностика и отладка реальных процессов обработки отверстий при ТПП ряда деталей П/О "Булат" г. Златоуста, П/О "СМЗ", в результате чего получен экономический эффект свыше 200 тысяч рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Прогноз, диагностика и устранение точностных отказов при обработке отверстий мерными инструментами. - Справочное пособие. - Челябинск: ЧГТУ, - 1992. - 212 с.

2. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Моделирование процессов формообразования отверстий мерными концевыми инструментами при автоматизированном проектировании технологических процессов // Проблемы автоматизации технологических процессов в машиностроении: Тез. докл. Межреспубликанской научно-технической конференции. - Волгоград: ВПИ, 1989 - с.17-18.

3. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Математическое моделирование и формирование активного банка данных при технологическом проектировании. // Математическое моделирование в машиностроении: Тез. докл. Первой Всесоюзной школы-конференции - Куйбышев: КАИ, 1990 - с.42-43.

4. Козлов А.В. и др. Прогноз точности обработки отверстий мерными инструментами на станках с ЧПУ. // Повышение эффективности и уровня использования станков с ЧПУ, ПР и ППС: Тез. докл. зональной научно-технической конференции, - Свердловск: УПИ, 1990 - с.51.

5. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Формирование активного банка данных на основе математического моделирования при технологическом проектировании технологических процессов. // САПР конструкторской и технологической подготовки автоматизированного производства в машиностроении: Тез. докл. Республиканской научно-практической конференции, - Харьков: ХПИ, 1990 - с.73-74.

6. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Эксплуатация концевого мерного инструмента за пределами его размерной стойкости. // В кн. Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1990 - с.

7. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Математическое моделирование точности обработки глубоких отверстий концевыми мерными инструментами. // Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий: Сборник тезисов докладов 7-й Всесоюзной конференции. - М.: "Информатика", 1991 - с.21-24.

8. Козлов А.В. и др. А.с.1323248 (СССР) Способ обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1987. - N 26.

9. Козлов А.В. и др. А.с.1373484 (СССР) Способ многопроходной обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1988. - N 6.

10. Козлов А.В. и др. А.с.1400794 (СССР) Способ обработки глубоких отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1988 - N 21.

11. Козлов А.В. и др. А.с.1472185 (СССР) Способ многопроходной обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1989. - N 14.

12. Козлов А.В. и др. А.с.1511006 (СССР) Способ многопроходной обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1989. - N 36.

13. Козлов А.В. и др. А.с.1569096 (СССР) Инструмент для обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1990. - N 21.

14. Козлов А.В. и др. А.с.1743718 (СССР) Способ обработки отверстий. - Открытия. Изобретения. - 1992. - N 24 .

Подписано к печати 14.12.92. Формат 60X90 1/16. Печ. л. 1,25.
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 277/717.

УОП ЧТУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.