

05.02.08

Д 369

На правах рукописи



Дерябин Игорь Петрович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ОБРАБОТКИ КРУГЛЫХ ОТВЕРСТИЙ
КОНЦЕВЫМИ МЕРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Челябинск

2009

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Южно-Уральского государственного университета.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
ГУЗЕЕВ Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
СУЛТАН-ЗАДЕ Назим Музаффарович;
доктор технических наук, профессор
МУХИН Виктор Сергеевич;
доктор технических наук, профессор
МАЗЕИН Петр Германович.

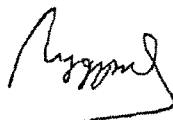
Ведущее предприятие – ОАО Научно-исследовательский институт
«ГЕРМЕС» (г. Златоуст).

Защита состоится « 21 » мая 2009 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 201а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « 14 » 04 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для современного машиностроения характерны частая смена номенклатуры изделий и возрастание требований к точности их изготовления. Это требует более быстрой и тщательной проработки технических решений при технологической подготовке производства (ТПП). Например, на ведущих мировых предприятиях авиационной и ракетно-космической техники до 80% производственных мощностей приходится на подготовку производства. Поэтому значительно усилилась потребность в повышении качества ТПП, снижении ее сроков, повышении эффективности проектируемых технологических процессов (ТП). Для этого на машиностроительных предприятиях получили широкое распространение автоматизированные системы технологической подготовки производства и системы сквозного проектирования (САД/САМ). Однако автоматизация ТПП незначительно снижает её трудоемкость. Эти системы в основном сокращают сроки только этапов, связанных с проектированием технологических процессов, а сроки таких трудоемких этапов как производственная доводка и отладка спроектированных технологических процессов обработки деталей при этом мало сокращаются. По имеющимся данным время и затраты на отладку ТП обработки некоторых деталей занимают до 90% от всех затрат на ТПП. Во многом это связано с низкой эффективностью технологических методов обеспечения точности обработки деталей.

Обработка круглых отверстий концевыми мерными инструментами (КМИ) занимает значительное место в современном производстве. Достаточно сказать, что до 30% мощности инструментальных производств занято изготовлением только сверл, а объем штучного времени на обработку отверстий КМИ достигает 40% от общего объема трудоемкости обработки деталей. Статистические данные, собранные на различных предприятиях страны, а также литературные источники показывают, что получение отверстий высокой точности представляет сложную технологическую проблему. Анализ ТП обработки отверстий в различных деталях показывает, что комплексное выполнение параметров точности диаметрального размера, расположения оси и формы достигается с большим трудом, при этом количество выполняемых переходов, как правило, больше, чем необходимо для обработки многих других поверхностей аналогичной точности. Невозможность комплексно обеспечить эти параметры точности концевыми мерными инструментами, даже на современных многопозиционных и многоинструментных станках с ЧПУ, приводит к необходимости применения операций координатного и алмазного растачивания, что снижает эффективность применения дорогостоящего оборудования и увеличивает трудоемкость обработки деталей. Особенности обработки отверстий КМИ в основном связаны с малой жесткостью инструмента и ориентацией его по различным поверхностям обрабатываемой детали. Точность обработки отверстий во многом зависит от режимов резания и параметров технологической оснастки (инструмента и приспособлений) и в меньшей степени – от применяемого оборудования.

Современные методы проектирования технологических процессов обработки деталей строятся на линейных принципах выполнения основных этапов, когда выбор технологической оснастки, значительно влияющей на возможности методов обработки по обеспечению заданных параметров точности, следует после назначения этих методов и выбора маршрутов обработки. Планы обработки поверхностей, определяющие маршрут обработки детали, также строятся на линейных принципах проектирования. Проектирование начинается с назначения последнего перехода и далее последовательно до первого при соблюдении принципа постепенного уточнения по переходам параметров точности, в основном качества размера и шероховатости поверхности. Задачи обеспечения параметров точности формы и расположения оси отверстий решаются в основном назначением дополнительных переходов, например, координатного и алмазного растачивания, что значительно увеличивает длину маршрута, трудоемкость и стоимость обработки. Например, обработка точением наружных цилиндрических поверхностей 8 качества диаметрального размера и 5 степени точности расположения оси возможна за 4 перехода, а для отверстий с аналогичными параметрами точности – за 7–8 переходов. При таком подходе к проектированию возможности сокращения числа переходов и снижения трудоемкости обработки крайне ограничены и попытки решить эту проблему за счет применения более точного оборудования не дают ожидаемого эффекта.

Другой проблемой технологического обеспечения точности является крайне малая информативность существующих справочных статистических данных для методов обработки отверстий КМИ. В них указаны достигаемые параметры точности, в основном качество и шероховатость, для данного метода обработки. Однако при каких параметрах инструмента, с какими технологической оснасткой (ТО) и режимами резания можно достичь все параметры точности, остается за рамками этих данных. В имеющихся же справочниках по выбору режимов резания неполно прослеживается связь с точностью обработки, в основном они также увязываются лишь с качеством диаметрального размера. Отсутствие четких справочных и нормативных данных по комплексной связи всех параметров точности с режимами резания, параметрами инструмента, оснастки и оборудования приводит к высокой роли субъективных решений при проектировании ТП обработки точных отверстий. Поэтому проблемы обеспечения точности обработки, как правило, переносятся на этап отладки ТП. Внедрение в производство ТП обработки деталей, содержащих отверстия высокой точности, требует большого числа доработок. В частности, это иногда заставляет оператора-станочника методом проб находить параметры операций и переходов, обеспечивающих заданную точность расположения оси отверстия. Доля таких технологических решений достигает более 70%.

Повысить эффективность технологического обеспечения точности возможно на основе разработки методов расчетного прогнозирования точности обработки, включающих математические модели формообразования отверстий и выбора технологической оснастки. Современные теории точности обработки отверстий, как правило, посвящены обеспечению какого-либо одного параметра точности: раз-

мера, формы или расположения осей отверстий. При этом исследуется влияние какого-либо одного из факторов процесса обработки, а комплексное влияние различных сочетаний большинства основных конструкторско-технологических параметров на точность не исследовалось. Поэтому синтез различных теорий точности обработки круглых отверстий в единую не представляется возможным, поскольку каждая из них построена на различных, часто исключаящих друг друга основах.

Такое положение диктует необходимость создания новых подходов к принципам проектирования технологии многопереходной обработки отверстий.

Повышение эффективности технологических методов обеспечения точности обработки отверстий КМИ на стадии ТПП имеет теоретическое и большое практическое значение. Это возможно на основе комплексного подхода к решению задач проектирования и отладки технологических процессов. Поэтому создание новой методологии проектирования планов обработки отверстий и разработка методов технологического обеспечения точности на основе математических моделей расчета погрешностей и выбора технологической оснастки, позволяющих определять на стадии проектирования основные параметры переходов, является **НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМОЙ**.

Цель работы. Снижение трудоемкости производства деталей машин на основе создания методологии параметрического проектирования планов обработки отверстий КМИ.

Научная новизна состоит в создании новой методологии параметрического проектирования планов обработки отверстий КМИ на основе разработанных методов технологического обеспечения точности, позволяющей снизить трудоемкость производства деталей машин.

Наиболее существенные научные результаты:

1. Разработана новая методология проектирования технологии многопереходной обработки отверстий КМИ, основанная на принципах назначения каждого перехода в зависимости от выходных параметров точности предыдущего и совместности выбора переходов и технологической оснастки.

2. Разработана методика расчетного прогноза точности обработки на основе системы математических моделей формообразования отверстий КМИ, описывающих профили обработанного отверстия в продольном и поперечном сечениях, что позволяет рассчитывать погрешности размера, формы и расположения оси. Модели отличаются тем, что в них учитываются сочетания параметров диссимметрии режущей части инструмента, погрешностей заготовки и осевых колебаний шпинделя станка.

3. Установлен механизм технологического наследования погрешностей расположения оси отверстий по переходам, основанный на определении сочетаний фаз осевых колебаний шпинделя станка с положениями режущих лезвий инструмента и оси отверстия в заготовке.

4. На основе моделей формообразования определено влияние на точность обработки отверстий различных сочетаний параметров операций. Это позволило создать методику проектной отладки параметров переходов.

5. Разработаны методы формализации процесса технологического оснащения операций обработки отверстий на основе установления структурно-логических связей элементов оснастки с заданными параметрами точности.

Разработанные принципы проектирования и методы технологического обеспечения точности могут быть распространены на обработку различных поверхностей деталей машин.

Практическая ценность. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан комплекс методик расчета параметров точности для различных методов обработки отверстий КМИ. Использование новых расчетных методик позволило разработать информационно-справочную базу определения погрешностей обработки отверстий [30].

Результаты работы в виде инженерных методик, программ и подпрограмм для САПР ТП внедрены на ряде машиностроительных предприятий. В результате применения этих разработок трудоемкость этапов проектирования и отладки операций обработки отверстий снизилась в 2–3 раза, количество брака уменьшилось в 2–3 раза, снизилась себестоимость обработки.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе на кафедрах «Технология машиностроения, станки и инструмент» и «Технологические процессы и оборудование машиностроительного производства» ЮУрГУ при изучении дисциплин «САПР ТП», «Математическое моделирование процессов в машиностроении», «Моделирование систем», «Резание металлов» и др.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях (НТК), совещаниях и семинарах:

- на региональной НТК «Проблемы автоматизации проектирования», Свердловск, 1983–1989 гг.;
- на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Комплексная автоматизация проектно-конструкторских работ в машиностроении», Ленинград, 1988 г.;
- на Всесоюзной НТК «Итоги, проблемы и перспективы комплексно-автоматизированных производств в машиностроении и приборостроении», Горький, 1990 г.;
- на Первой всесоюзной школе-конференции «Математическое моделирование в машиностроении», Куйбышев, 1990 г.;
- на Всероссийской НТК «Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей», Казань, 1995 г.;
- на II Международной специализированной выставке-конференции «Машиностроение. Прогрессивные технологии», Челябинск, 1998 г.;
- на Международной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения С.И. Мосина, Тула, 1999 г.;
- на Международной электронной НТК «Перспективные технологии автоматизации», Вологда, 1999 г.;
- на IV Международной НТК «Вибрационные машины и технологии», Курск, 1999 г.;

- на Первой электронной международной НТК «Автоматизация и информация в машиностроении», Тула, 2000 г.;
- на 29 Международной конференции по металлообработке, Хайфа (Израиль), 2003 г.;
- на Международной научно-практической конференции «Новые технологии, автоматизация оборудования и оснастки машиностроительного производства», Санкт-Петербург, 2007 г.;
- на 6 Международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности», Брянск, 2008 г.;
- на ежегодных НТК в ЮУрГУ с 1997 по 2008 гг.

Публикации работ. Основное содержание диссертации отражено в 79 печатных работах, из них 8 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, в 4 авторских свидетельствах и монографии «Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложений. Работа содержит 362 страницы текста, 254 рисунка, 49 таблиц, 223 наименований литературы и 15 страниц приложений.

Решение данной проблемы отвечает «Перечню технологий, имеющих важное социально-экономическое значение или важное значение для обороны страны и безопасности государства (критические технологии, утвержденные Правительством РФ от 25 августа 2008 г. № 1243-р)», а именно, «Базовым и критическим военным, специальным и промышленным технологиям».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности научно-технической проблемы, изложена цель и научная новизна, приведены практическая значимость работы и перечень решаемых задач.

Современное состояние систем ТПП и проблемы проектирования технологических процессов обработки деталей машин

Разработке методик ТПП и проектирования ТП посвящены работы Б.С. Балакшина, Г.К. Горанского, И.А. Иващенко, Н.М. Капустина, В.С. Корсакова, С.Н. Корчака, А.А. Маталина, В.В. Матвеева, В.Г. Старостина, Н.М. Султан-Заде, В.Д. Цветкова, Д.В. Чарнко и др. Все выполняемые работы при ТПП можно разделить на 2 вида: первые связаны с проектированием ТП, вторые связаны с его отладкой после этапа обработки пробной партии деталей. При этом сроки проектирования ТП в среднем не превышают 10 дней, а отладка его растягивается на несколько месяцев. Для эффективного функционирования ТПП должна иметь информационный базис. Этот базис должен пополняться с изменением внешней среды. Основной источник таких изменений – производственный процесс, именно через него образуется обратная связь при принятии решений (Н.М. Султан-Заде). Одним из эффективных способов осуществления обратной связи является моде-

лирование технологического процесса на стадии проектирования. Для этого необходимо совершенствовать методики проектирования ТП и пополнять информационные базы.

Рассмотрим специфику применения этих методик применительно к обработке круглых отверстий КМИ в деталях машин. Наиболее часто для обработки отверстий диаметрами 3...30 мм с отношении длины к диаметру более 3 применяются сверла (спиральные, перовые, шнековые), зенкеры, развертки, инструменты одностороннего резания и расточные пластины. Последовательное выполнение переходов сверления, зенкерования и развертывания позволяет стабильно получать точность диаметрального размера до 6-го качества. Это же достигается при алмазном и координатном растачивании, но при этом ещё достигается и IV–III степени точности расположения оси отверстия. Процессы же обработки отверстий КМИ на практике с трудом обеспечивают VIII-ю степень точности расположения оси, что подтверждается многочисленными статистическими исследованиями на ряде машиностроительных предприятий. Это приводит к необходимости применения после обработки отверстий КМИ операций координатного растачивания. Однако при этом достигнутые на предшествующих переходах качество и параметры шероховатости иногда сначала ухудшаются, а затем вновь формируются вместе с заданной точностью расположения оси отверстия. Это особенно нерационально при использовании современных дорогостоящих многопозиционных и многоинструментных станков с ЧПУ. Поэтому разработка методов повышения точности расположения оси отверстий на 2–3 степени, при последовательной обработке отверстий КМИ, существенно снизит затраты на изготовление деталей. Эта проблема является комплексной, так как затрагивает как задачи определения степени влияния параметров операций-переходов на погрешности обработки отверстий, что связано с необходимостью разработки математических моделей точности, так и задачи совершенствования методов проектирования технологических процессов многопереходной обработки отверстий.

При проектировании технологии обработки отверстий используются принципы и приемы, общие для построения технологических процессов обработки поверхностей деталей (рис. 1). Отметим основные принципы: 1) по заданному качеству диаметрального размера и шероховатости поверхности отверстия назначается окончательный метод обработки и тип оборудования, далее устанавливают промежуточные методы до первого перехода, при этом каждый последующий метод должен быть точнее предыдущего; 2) выбор технологической оснастки выполняется после назначения операций и переходов. Основными источниками информации при назначении переходов являются статистические данные среднеэкономической точности методов обработки, в основном по качеству. Малая информативность справочных данных, применительно к отверстиям, не дает возможности комплексно определить, при каких параметрах инструмента, с какой оснасткой и режимами резания можно достичь заданную точность обработки. Это приводит к тому, что проблемы определения параметров переходов для обеспечения точности, как правило, переносятся на этап отладки ТП, что значительно повышает трудоемкость и стоимость ТПП.

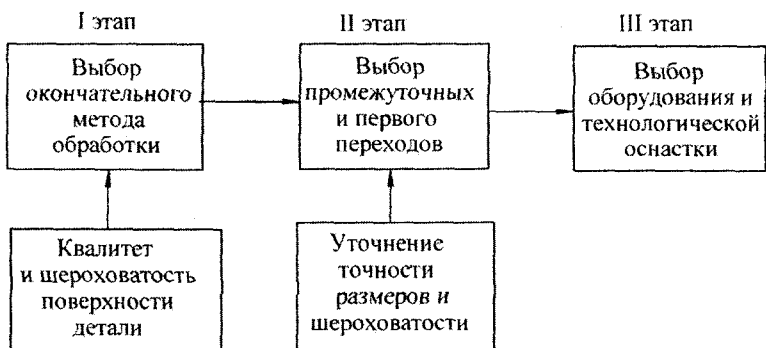


Рис. 1. Принципиальная схема существующих методик проектирования ТП

В работах С.Н. Корчака, В.И. Гузеева, Ю.И. Мясникова и др. разработаны обширные нормативные базы для расчетно-точностного проектирования маршрутов обработки поверхностей. Разработанные методики позволяют связать режимы резания с квалитетом и шероховатостью поверхности, а остальные параметры точности и особенности наследования погрешностей по переходам в этих методиках не рассматривались. Данный подход необходимо распространить и для остальных параметров точности с учетом применяемой оснастки.

Известно, что при обработке отверстий от правильного выбора технологической оснастки во многом зависят возможности методов обработки по обеспечению заданных параметров точности. Однако ТО выбирается после назначения операций и переходов, а критерии выбора больше связаны с габаритами детали, чем с параметрами точности обработки. Формализация и автоматизация процесса выбора ТО в основном опирается на размерные критерии детали и оборудования, а математических моделей выбора ТО по заданным параметрам точности нет.

С.Г. Лакирев предложил связать выбор переходов с выбором ТО в соответствии с приоритетом параметров точности. Им разработаны типовые маршруты обработки отверстий для каждого параметра точности, основанные на выводе о необходимости с первого перехода стремиться обеспечивать все параметры точности и в первую очередь, приоритетный. Однако отсутствие методик расчета точности обработки и формализованного выбора ТО не дает гибкости линейному проектированию маршрутов, что не позволяет уменьшать число переходов. Эти недостатки также приводят к необходимости уточнения основных параметров переходов на этапе отладки ТП.

Большой вклад в решение вопросов повышения точности обработки заготовок инструментами настраиваемыми на выполняемый размер, к которым относятся КМИ, внесли работы Б.М. Базрова, А.М. Дальского, В.И. Комиссарова, В.Г. Митрофанова, В.С. Мухина, Э.В. Рыжова, Ю.М. Соломенцева, М.М. Тверского, Л.В. Худобина, А.С. Ямникова и др. Подобные вопросы при обработке круглых отверстий КМИ рассмотрены в работах В.А. Гречишника, С.В. Кирсанова, А.Г.

Косиловой, В.И. Кравцова, С.Г. Лакирева, П.Г. Мазеина, Р.К. Мещерякова, М.А. Минкова, И.Я. Мирнова, В.Н. Подураева, В.А. Светлицкого, В.Д. Троицкого, Я.М. Хилькевича, Ю.П. Холмогорцева и др.

А.Г. Косилова разработала расчетную методику определения числа переходов, необходимых для обеспечения точности расположения осей отверстий. Однако в целом она носит проверочный характер и позволяет определить достаточно ли число переходов, если же числа переходов недостаточно, то вводятся дополнительные либо ужесточаются некоторые параметры по переходам, в основном зазор в кондукторной втулке. Такой подход практически не обладает возможностями уменьшения числа переходов и снижения трудоемкости обработки. Расчет погрешностей приводится только для расположения оси и в основном базируется на статистических данных. Особенности наследования погрешностей по переходам не учитываются.

В работах В.Н. Подураева, В.А. Светлицкого, В.В. Матвеева и Р.К. Мещерякова приведены математические модели формообразования, в которых исследовались вопросы базирования мерного инструмента по обработанной поверхности и приведены математические модели формообразования соответствующих поверхностей. Детальное изучение этих работ показало, что они посвящены либо какому-то конкретному инструменту, либо отдельному параметру точности. При этом рассматривается влияние тех или иных технологических факторов на отдельные параметры точности только в определенных условиях, изменение же сочетаний этих факторов приводит к нарушению полученных зависимостей.

Наиболее взаимосвязанные математические модели формообразования отверстий КМИ были получены в трудах С.Г. Лакирева и Я.М. Хилькевича. Ими была разработана система математических моделей на разных уровнях моделирования. Показано, что поскольку КМИ всегда имеют диссимметрию режущих лезвий, достаточно моделировать процесс формообразования на статическом и кинематическом уровнях. Однако в этих моделях для простоты получения аналитических решений намеренно не учитывались многие параметры процесса обработки. Поэтому они могут быть применены только для получения качественных решений. Дальнейшее развитие их в плане учета влияния возможных сочетаний диссимметрий инструмента, заготовки, оборудования и наследования погрешностей позволит создать математические модели, по которым можно получать расчетный прогноз параметров точности.

Анализ современного состояния методов ТПП показывает, что технологическое обеспечение точности обработки отверстий КМИ не всегда достигается даже за большое число переходов. Основной объем работ по определению параметров операций приходится на этап отладки ТП, что сопровождается большими затратами времени и средств. Во многом это связано с недостатками методов проектирования ТП и отсутствием методик комплексного расчетного прогноза точности обработки. Таким образом, проблема комплексного технологического обеспечения точности требует решения задач создания новой методологии проектирования планов обработки отверстий.

Перечислим задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной выше цели.

1. Разработать методологию параметрического проектирования планов обработки отверстий КМИ.
2. Разработать математические модели формообразования отверстий КМИ для создания методики комплексного расчетного прогноза погрешностей диаметрального размера, формы и расположения оси.
3. Исследовать влияние различных параметров операций на точность обработки отверстий для создания методики проектной отладки параметров переходов.
4. Разработать математические модели для формализованного выбора технологической оснастки по критериям точности.
5. Реализовать разработанные методики в системе технологической подготовки производства.

Методология параметрического проектирования планов обработки круглых отверстий

Новая методология параметрического проектирования (рис. 2) основывается на следующих принципах:

1. Проектирование начинается с первого перехода, назначение следующего зависит от достижения максимально возможной в данных условиях точности на предыдущем переходе.
2. Выбор переходов выполняется совместно с выбором технологической оснастки.

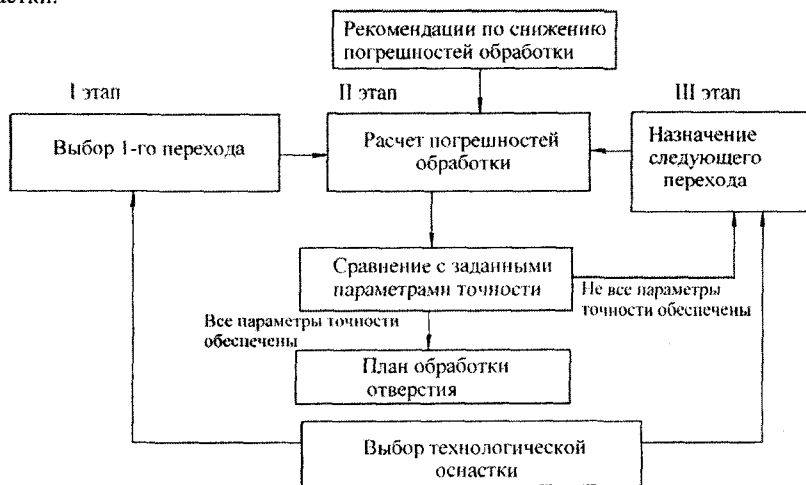


Рис. 2. Принципиальная схема методологии параметрического проектирования

Эти принципы реализуются при следующих методах технологического обеспечения точности:

1. Комплексный расчетный прогноз погрешностей обработки на основе математических моделей формообразования отверстий.

2. Проектный процесс отладки параметров переходов для достижения максимальной точности обработки.

3. Формализованный выбор технологической оснастки по критериям точности.

Данные принципы и методы технологического обеспечения точности позволяют уже на стадии проектирования технологического процесса определить параметры переходов, обеспечивающие заданную точность обработки отверстий.

Для реализации методологии параметрического проектирования необходимо разработать методики и математические модели, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Принципы методологии	Методы технологического обеспечения точности	Методики	Модели
1. Проектирование начинается с первого перехода, значение следующего зависит от достижения максимально возможной в данных условиях точности на предыдущем переходе	1. Комплексный расчетный прогноз погрешностей обработки отверстий	1. Расчет погрешностей обработки	1. Математические модели формообразования отверстий КМИ
	2. Проектный процесс отладки параметров переходов для достижения максимальной точности	2. Проектная отладка параметров переходов 3. Компьютерная диагностика	
2. Выбор переходов выполняется совместно с выбором технологической оснастки	3. Формализованный выбор оснастки по критериям точности обработки	4. Выбор оснастки по заданным параметрам точности	2. Математические модели выбора оснастки

Комплексный расчетный прогноз погрешностей обработки отверстий

Проблемы математического моделирования формообразования отверстий КМИ в основном связаны с чрезвычайным разнообразием сочетаний величин различных параметров операций, которые влияют на точность обработки. Поэтому для анализа такой многофакторной системы использовался принцип декомпозиции.

Качественный анализ процессов обработки отверстий КМИ, а также работ С.Г. Лакирева и Я.М. Хилькевича, показал ключевую роль влияния на точность таких параметров технологической системы, как осевые колебания шпинделя станка с амплитудой ΔS (рис. 3а), в сочетании с факторами диссимметрии режущей части инструмента (например, погрешности заточки главных углов в плане ϕ_1 и ϕ_2 , осевой сдвиг вершин τ и др.) (рис. 3б), начальные погрешности наладки (рис. 3в), технологическая наследственность (рис. 3г) и др., которые приводят к колебаниям площадей сечений Δ_1 и Δ_2 (рис. 3д) срезаемого слоя припуска и к колебаниям сил резания (P_1 и P_2) на режущих лезвиях.

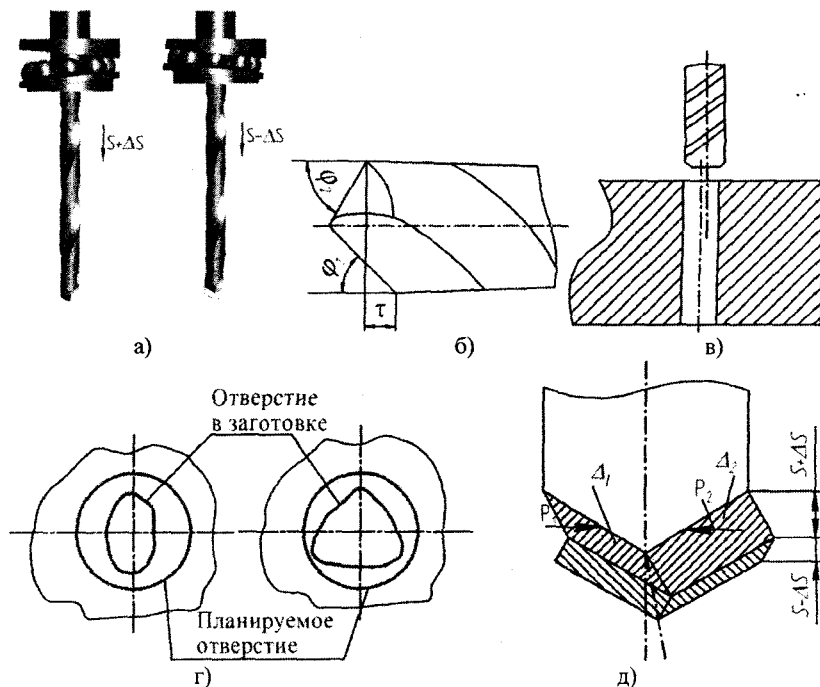


Рис. 3. Основные причины возникновения погрешностей при обработке отверстий КМИ

Для разработки математических моделей формообразования приняты следующие положения (показано на примере моделей для двухлезвийных КМИ):

– траектория движения инструмента (рис. 4) описывается текущими координатами радиус-векторов $\rho_i(\psi)$ вершин режущих лезвий, которые и определяют профиль обработанного отверстия;

– статическое равновесие инструмента определяется действием радиальных составляющих сил резания P_j на каждое лезвие (1);

– радиальные составляющие сил резания пропорциональны площадям срезаемого сечения Δ_j с соответствующим коэффициентом пропорциональности K_j :
 $P_j = K_j \cdot \Delta_j$;

– для аналитического решения исходной системы уравнений (1) применялся аппарат уравнений с запаздывающим аргументом, который наиболее адекватно описывает движение инструмента в заготовке, когда на точность текущего положения $\rho_i(\psi)$ оказывают влияние не только текущие факторы, но и ряд его предыдущих положений $\rho_i(\psi - \pi)$.

$$\begin{cases} \rho_1(\psi) + \rho_2(\psi) = D \\ [(P_1 + P_1') - (P_2 + P_2')] = \left| \rho_1(\psi) - \frac{D}{2} \right| j \end{cases}, \quad (1)$$

где $\rho_1(\psi)$ и $\rho_2(\psi)$ – радиус-векторы вершин соответственно первого и второго лезвий (см. рис. 4);

ψ – текущий угол поворота инструмента вокруг своей оси;

D – диаметр инструмента;

P_1, P_1', P_2 и P_2' – радиальные составляющие сил резания на первом и втором лезвиях;

j – жесткость инструмента.

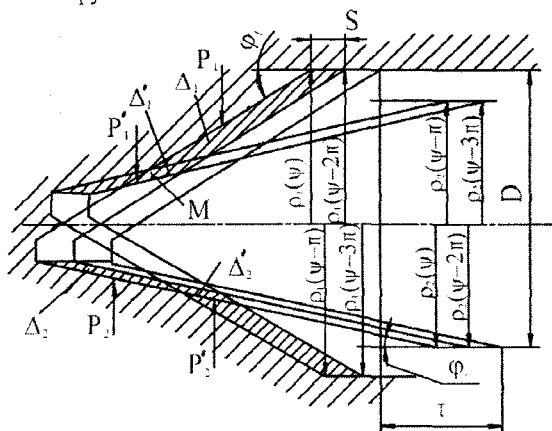


Рис. 4. Формирование сечений срезаемых слоев припуска

В результате теоретических исследований установлено, что различные варианты сочетаний величин диссимметрии режущих лезвий инструмента, подачи S , глубины резания и др., образуют разные виды срезаемых каждым лезвием сече-

ний. Виды этих сечений зависят от положений точки M (см. рис. 4) на режущих лезвиях. Эти положения определяются как проекции точки M на ось инструмента (рис. 5), т. е. как координаты m :

$$m = \frac{\left(\tau - \frac{S}{2}\right) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (2)$$

Таким образом, можно получить следующие положения точки M :

1) на режущем лезвии (рис. 5а), т. е. при $0 \leq m \leq L_x$ (где $L_x = \frac{D - D_0}{2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}$ – проекция длины режущей части лезвия на ось инструмента, D_0 – диаметр предварительно обработанного отверстия, при сверлении в сплошном металле – длина перемычки сверла);

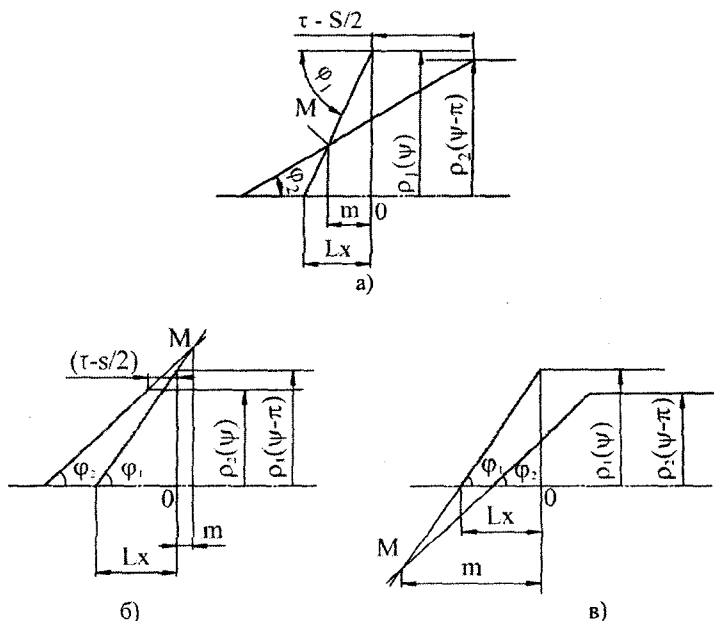


Рис. 5. Различные положения точки M на режущем лезвии

2) вне режущего лезвия при $m < 0$ (рис. 5б), что возможно при $\tau < \frac{S}{2}$;

3) вне режущего лезвия при $m > L_x$ (рис. 5в).

Разным видам сечений срезаемых слоев припуска соответствуют и разные аналитические решения исходной системы уравнений (1). Для двухлезвийных инструментов была получена система математических моделей, состоящих из урав-

нений с запаздывающим аргументом в виде функциональных зависимостей (3), учитывающая возможные сочетания параметров обработки:

$$\rho(\psi) = F(\rho(\psi - \pi), S, \Delta S, \tau, \varphi_i, K_i, j). \quad (3)$$

Отличие многолезвийных инструментов (рис. 6) с числом лезвий более 2 (зенкеры и развертки) состоит в том, что они работают с подачами S на порядок превышающих величину осевого сдвига вершин лезвий τ (см. рис. 3б), которая не оказывает существенного влияния на форму и величину площади сечения срезаемого припуска. Статическое равновесие многолезвийного инструмента описывается системой (4):

$$\begin{cases} J \cdot Y(\psi) = \sum_{i=1}^Z P_i \cos \psi_i \\ J \cdot X(\psi) = \sum_{i=1}^Z P_i \sin \psi_i \end{cases}, \quad (4)$$

где J – жесткость инструмента в радиальном направлении,

$X(\psi)$ и $Y(\psi)$ – координаты центра инструмента в текущем поперечном сечении.

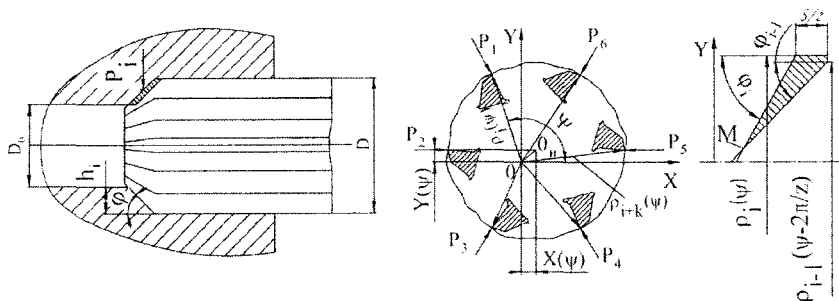


Рис. 6. Расчетная схема для модели формообразования отверстий многолезвийными инструментами

В результате аналитического решения системы (4) была получена математическая модель формообразования отверстий концевыми мерными многолезвийными инструментами (5).

$$\begin{aligned} & Y(\psi) \left[J \operatorname{tg} \varphi + \sum_{i=1}^Z K_i \left(h_i + \frac{S}{z} \operatorname{tg} \varphi_i \right) \sin^2(\psi - (i-1)2\pi/z) \right] + X(\psi) \sum_{i=1}^Z K_i \times \\ & \times \left(h_i + \frac{S}{z} \operatorname{tg} \varphi_i \right) \frac{\sin 2(\psi - (i-1)2\pi/z)}{2} = Y(\psi - 2\pi/z) \sum_{i=1}^Z K_i \cdot h_i \cdot \sin^2(\psi - (i-1) \times \\ & \times 2\pi/z) + X(\psi - 2\pi/z) \sum_{i=1}^Z K_i \cdot h_i \frac{\sin 2(\psi - (i-1)2\pi/z)}{2} - \frac{S}{z} \operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^Z K_i \cdot h_i \times \\ & \times \sin(\psi - (i-1)2\pi/z) \end{aligned}, \quad (5)$$

где φ_i – главный угол в плане режущих лезвий,
 h_i – глубина резания, снимаемая каждым из лезвий инструмента,
 $X(\psi - 2\pi/z)$ – запаздывающий аргумент X ,
 $Y(\psi - 2\pi/z)$ – запаздывающий аргумент Y ,
 z – число лезвий инструмента.

Данная модель (5) позволяет рассчитывать текущие координаты $X(\psi)$ и $Y(\psi)$ положения центра инструмента, по которым определяются координаты профиля обработанной поверхности и рассчитываются погрешности обработки.

Отличие инструментов одностороннего резания (ИОР) состоит в том, что контактная жесткость режущего лезвия на 2 и более порядков меньше стыковой жесткости направляющих элементов. Поэтому процесс обработки отверстия можно рассматривать как смену баз без учета силовых факторов, т.е. на геометрическом уровне. Вершина режущего лезвия А (рис. 7а) формирует обрабатываемую поверхность, а направляющие элементы (кулачки) В и С перемещаются по этой поверхности. Таким образом в зависимости от профиля начального участка для направляющих элементов (кондукторная втулка, центровочное отверстие и др.), по которому в начале обработки они базируются, вершина А будет формировать различные профили обработанной поверхности, по которым далее и будут базироваться направляющие элементы. С учетом подачи S инструмента в результате образуется поверхность, поперечное сечение которой состоит из дуг окружностей различных радиусов кривизны и их углов смежности (рис. 7б). По этой причине в поперечных сечениях образуется различный профиль отверстия. Разработанная математическая модель процесса формообразования отверстий ИОР позволяет при компьютерном моделировании получать профили продольного (рис. 7в) и поперечного (см. рис. 7б) сечений в виде массива координат точек профиля отверстия, по которым рассчитываются погрешности формы и диаметрального размера. В результате исследований установлено (совместно с аспирантом Мироновой И.Н.), что на точность обработки влияют сочетания величин подачи S , углового расположения направляющих элементов ψ_1 и ψ_2 (см. рис. 7а), осевого сдвига вершины режущего лезвия τ (см. рис. 7в) относительно направляющих элементов и зазора между кондукторной втулкой и инструментом E . Также установлено, что наименьшие погрешности обработки возникают при значениях $\tau = \frac{S \cdot \psi_2}{360}$. С учетом допусков на геометрию заточки режущего лезвия и колебаний подачи необходимо назначать $\tau = 1,1 \frac{S \cdot \psi_2}{360}$.

Поскольку при моделировании мы получаем координаты точек обработанного профиля в виде массивов значений радиус-векторов $\rho(\psi)$ вершин режущих лезвий (3), координат точек (X_i^A, Y_i^A) для ИОР и координат центра инструмента $(X(\psi), Y(\psi))$ (5), то необходимо сравнить полученные значения со стандартными параметрами точности. Поэтому были разработаны методики расчета погрешностей обработки. Методики построены на основе нахождения вписанной окружности максимального радиуса в поперечных сечениях и метода интерполяции.

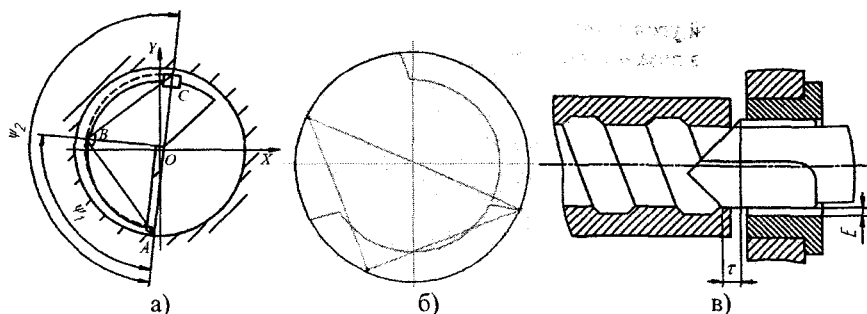


Рис. 7. Модель формообразования отверстий ИОР

При моделировании многопереходной обработки отверстий необходимо учитывать наследование погрешностей. Исследования показали, что на наследование погрешностей в основном оказывают влияние виды сочетаний диссимметрии режущей части инструмента, положения оси отверстия в заготовке и фазы колебаний шпинделя станка. Эти сочетания во многом определяют возможности уменьшения величины увода оси отверстия на последующих переходах. Рассмотрим механизм изменения увода оси отверстия с учётом осевых колебаний, характеризующихся амплитудой колебания подачи ΔS и периодом равным 1 обороту шпинделя. Положительной фазой колебания будем называть момент максимальной амплитуды, направленной в сторону обрабатываемой детали, когда подача будет равной $S_0 + \Delta S$, где S_0 – номинальное значение подачи. При несоосности осей инструмента и отверстия в заготовке Δ_0 (рис. 8а) возможны варианты, когда положительная фаза возникает при положении лезвия 2 с меньшим, чем у лезвия 1 углом φ_2 ($\varphi_2 < \varphi_1$), со стороны большего припуска h_6 (рис. 8б), либо со стороны меньшего припуска h_m (рис. 8в). Теоретические исследования показали, что увод оси отверстия после предшествующего перехода уменьшается на большую величину, когда фаза максимального положительного колебания шпинделя, а следовательно, и максимальная подача, наступают при положении лезвия 1 со стороны наибольшего припуска (рис. 8в). Другой вывод: чем больше получена величина увода на предшествующем переходе, тем более диссимметричный инструмент нужен на следующем переходе. Учет наследования погрешностей в математических моделях осуществляется управлением сдвига фаз в уравнениях колебания припуска (6) и подачи (7):

$$h_i = h_0 + \Delta_0 \sin(\psi); \quad (6) \quad S = S_0 + \Delta S \cos(\psi - \pi), \quad (7)$$

где h_0 и S_0 – номинальные значения припуска и подачи;

ΔS – амплитуда осевых колебаний шпинделя станка.

Разработанные математические модели и методики расчета погрешностей позволяют прогнозировать точность обработки на стадии проектирования ТП. Это позволило создать первый метод технологического обеспечения точности – комплексный расчетный прогноз погрешностей обработки отверстий.

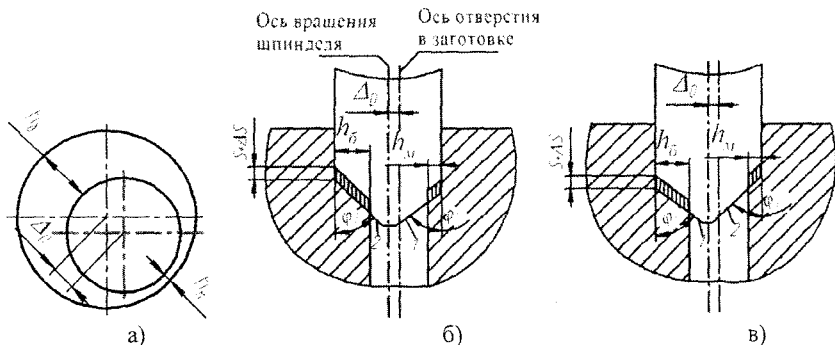


Рис. 8. Схемы взаимных положений режущих лезвий инструмента относительно отверстия в заготовке

Для проверки теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальная проверка формы и площадей срезаемых сечений (рис. 9), полученных после мгновенной остановки инструмента при обработке заготовок с различными сочетаниями параметров операций, показала адекватность принятых для разработки математических моделей формообразования расчетных схем (см. рис. 4).

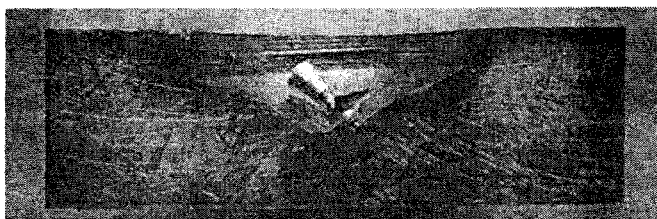


Рис. 9. Сечение обработанного образца

Исследования осевых колебаний шпинделей станков сверлильной, токарной и сверлильно-фрезерно-расточной с ЧПУ групп показало, что фактические значения амплитуд колебаний в пределах каждой группы могут отличаться соответственно в 10, 8 и 5 раз. Поскольку увод оси отверстия, исходя из теоретических исследований, пропорционален амплитуде осевых колебаний шпинделя станка, то при обработке отверстий, при прочих равных условиях, на разных станках он (увод) может различаться в несколько раз.

Адекватность математических моделей формообразования определялась путем сравнения результатов натуральных и вычислительных экспериментов. Эксперименты проводились в лабораторных и производственных условиях в основном

на деталях топливной аппаратуры различных двигателей. Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем: делалась выборка деталей 20–30 штук после отдельных переходов обработки отверстий и измерялись их параметры точности на координатно-измерительной машине «Global activ» фирмы «Bown&sharpe», далее параметры технологических операций вводились в ЭВМ, где производился расчет погрешностей обработки (рис. 10) по разработанным математическим моделям формообразования отверстий.

Моделирование процесса обработки отверстия сверлом. OTV02

Результаты отладки

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные данные:
 Инструмент - СВЕРЛО СПИРАЛЬНОЕ
 Материал инструмента : P6M5
 Материал детали : СЧ24

	Расчетные значения	Допускаемые значения
Увод оси	0,3419	0,1
Отклонение от круглости	0,07487	0,15
Разбивка отверстия	0,3247	
Максимальный диаметр	20,324	20,33
Минимальный диаметр	19,875	20,0

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ВЫПОЛНИТЬ ОТЛАДКУ ВЫВОД НА ПЕЧАТЬ ВЫХОД

Рис. 10. Результаты расчета на ЭВМ

Результаты некоторых экспериментов показаны на рис. 11–13. Погрешность расположения оси отверстия оценивалась через значения увода оси, а погрешность диаметра – через разбивку отверстия – разность между диаметрами обработанного отверстия и инструмента.

Сравнение результатов вычислительных и натуральных экспериментов, проведенные по более чем 40 видам деталей показало, что погрешности расчетных значений для моделей двухлезвийных инструментов и инструментов одностороннего резания не превышают 15%, для моделей многолезвийных инструментов – 20%.

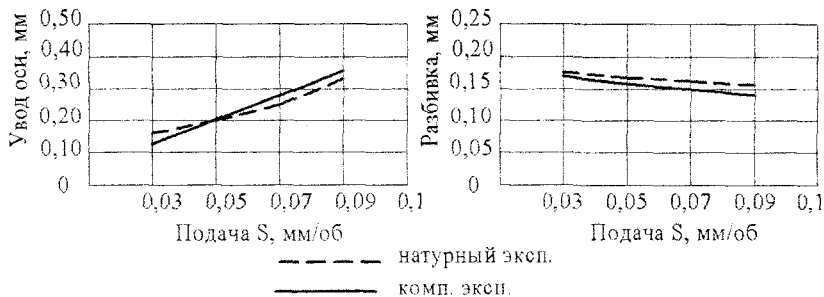


Рис. 11. Зависимость точности обработки отверстия от подачи

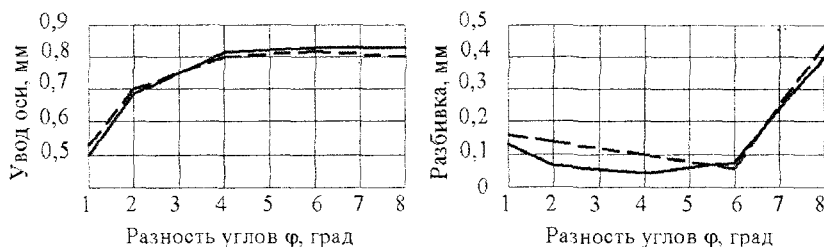


Рис. 12. Зависимость точности обработки отверстия от разности углов ϕ

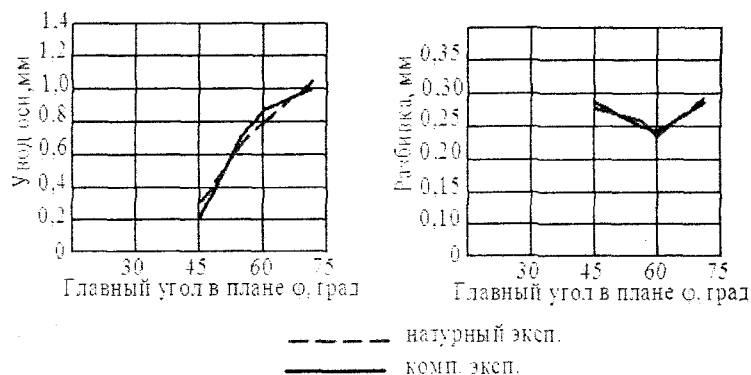


Рис. 13. Зависимость точности обработки отверстия от угла ϕ

Также были проведены эксперименты по проверке теоретических выводов о механизме наследования величины увода оси отверстия при многопереходной обработке в зависимости от видов сочетаний диссимметрии режущей части инструмента, положения оси отверстия в заготовке и фазы колебаний шпинделя станка. Сначала определялась фаза максимального осевого колебания шпинделя станка.

При этом на гильзе и шпинделе ставилась метка в любом месте. В пронумерованных деталях были просверлены отверстия спиральным сверлом, далее, не снимая деталь, измерялась величина увода оси и определялось положение наибольшего припуска и относительно него угол W разворота с меткой на гильзе (рис. 14). После этого производилось рассверливание отверстий. Инструмент в шпинделе устанавливался так, чтобы лезвие 1 (с большим углом ϕ) либо 2 (с меньшим углом ϕ) было повернуто на угол W относительно метки на шпинделе станка.

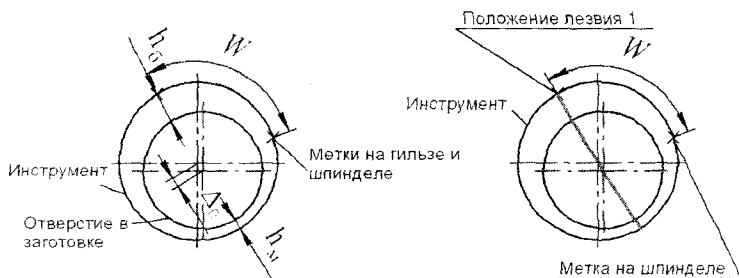


Рис. 14. Схема установки инструмента

На рис. 15б показаны результаты экспериментов для отверстия $\varnothing 8$ мм при синхронизации фазы колебания шпинделя с положениями режущих лезвий относительно заготовки (см. рис. 8в), на рис. 15а – без синхронизации (см. рис. 8б). Анализы результатов множества экспериментов (натурных и вычислительных) показали, что при синхронизации фазы колебания шпинделя с положениями режущих лезвий относительно заготовки снижение увода происходит на 80%, без синхронизации – не более чем на 30%.

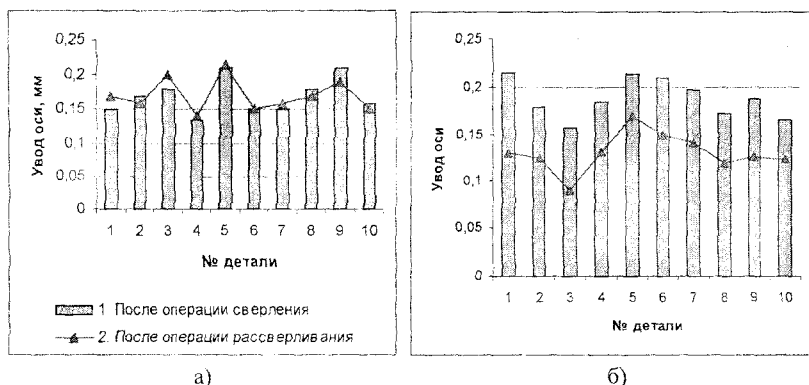


Рис. 15. Результаты экспериментальных исследований наследования погрешностей

Таким образом, экспериментально подтверждена адекватность математических моделей формообразования отверстий КМИ.

Исследования влияния различных технологических факторов на точность обработки отверстий

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют выявить основные закономерности влияния различных параметров технологических операций и переходов на точность обработки отверстий. Причем влияние большинства конструкторско-технологических параметров зависит от сочетания их величин. Поскольку число таких сочетаний огромно (более 10000), определение степени влияния параметров операций и переходов на точность обработки было выявлено на основе проведения множества компьютерных экспериментов. Для этого была разработана методика проведения пофакторных компьютерных экспериментов, в которых сценарии вычислений различаются заданием соответствующих значений параметров процесса обработки, т. е. исходных данных.

В результате исследований были получены зависимости погрешностей обработки от комплекса параметров операций: материалов инструмента и детали, точности оборудования, геометрии инструмента, режимов резания и др. (рис. 16 и 17). Полученные результаты были проверены как в лабораторных, так и в производственных условиях.

Анализ полученных зависимостей показал ряд нетривиальных эффектов. Например, установлено, что при одних сочетаниях параметров обработки (при $S < 2\tau$) повышение подачи S увеличивает увод оси отверстия, а при других сочетаниях (при $S > 2\tau$) – уменьшает (рис. 16а). Влияние главного угла в плане ϕ на увод оси и разбивку отверстия качественно различно: при увеличении угла ϕ увод увеличивается, а разбивка сначала снижается (до значения $\phi \approx 58^\circ$), а затем увеличивается (см. рис. 17). Более диссимметричные инструменты дают погрешности меньшие, чем менее диссимметричные (рис. 16б). Поскольку влияние различных параметров операций зависит от сочетаний их величин, то для снижения погрешностей обработки управление каким-то одним параметром крайне ограничено.

Анализ полученных результатов позволил разработать рекомендации по снижению погрешностей для различных вариантов обработки отверстий КМИ, которые необходимы для создания методики проектной отладки параметров переходов.

В результате проведения более 10000 компьютерных экспериментов была разработана информационно-справочная база определения погрешностей обработки отверстий КМИ для различных условий: материалов детали и инструмента, точности оборудования и оснастки, углов в плане, диаметров инструмента, подач и др. В табл. 2 приведен фрагмент этой базы, где указаны величины уводов оси и разбивки отверстий для различных условий обработки. Данная база входит в состав информационного обеспечения методики проектирования планов обработки отверстий. Применение разработанной информационно-справочной базы как эле-

мента интеллектуальных экспертных систем (CAD, CAM, CAE) позволит значительно расширить их возможности.

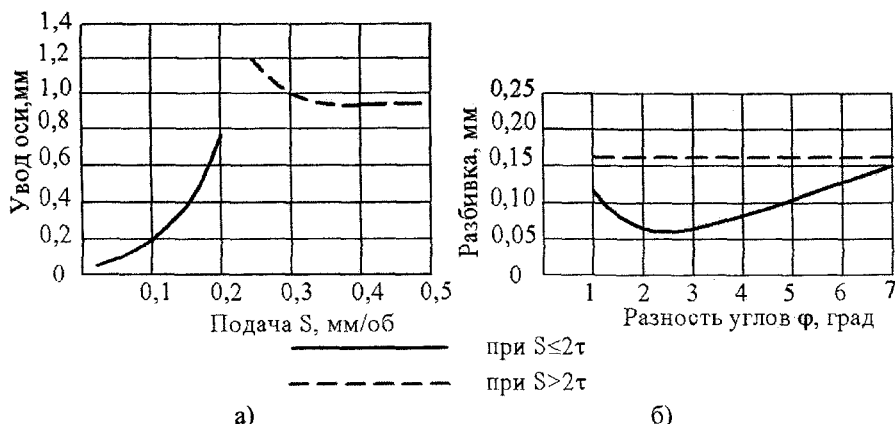


Рис. 16. Зависимости погрешностей обработки от а) подачи S; б) разности главных углов в плане ϕ

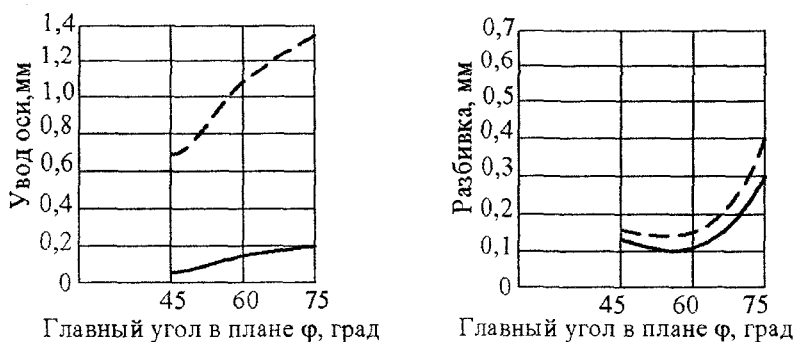


Рис. 17. Зависимость погрешностей обработки от главного угла в плане ϕ

Результаты экспериментальных исследований (натурных и компьютерных) позволили создать второй метод технологического обеспечения точности – проектный процесс отладки параметров переходов для достижения максимальной точности. Методика проектной отладки (рис. 18) выполняется как итеративный процесс. После ввода данных, основой формирования которых является база данных определения погрешностей обработки (см. табл. 2), выполняются расчеты по математическим моделям формообразования. Далее рассчитанные значения параметров точности сравниваются с заданными. При превышении каким-либо расчетным значением допустимого выполняется непосредственно процесс отладки.

Таблица 2

Уводы оси (мм) на 100 мм длины и разбивка отверстия (мм). Обработка на оборудовании нормальной точности по кондукторной втулке. Материал сверла – быстрорежущая сталь, обрабатываемый материал – конструкционная сталь		Сверление спиральными сверлами					
Диаметр сверла D, мм	Подача S, мм/об	Углы при вершине сверла 2φ, град					
		90		118		150	
		Увод	Разбивка	Увод	Разбивка	Увод	Разбивка
5	0,05	0,20	0,11	0,66	0,09	0,86	0,11
	0,07	0,33	0,11	1,20	0,08	1,68	0,09
	0,1	0,48	0,1	1,91	0,07	3,31	0,06
	0,15	0,76	0,05	2,65	0,09	3,92	0,20
	0,2	0,80	0,05	2,96	0,09	4,98	0,20
	0,25	0,83	0,05	3,18	0,09	5,87	0,20
10	0,07	0,02	0,24	0,08	0,20	0,10	0,24
	0,1	0,05	0,23	0,16	0,18	0,21	0,21
	0,15	0,11	0,21	0,37	0,16	0,48	0,16
	0,2	0,19	0,20	0,65	0,14	0,85	0,12
	0,25	0,45	0,10	1,15	0,17	1,22	0,39
	0,3	0,49	0,10	1,35	0,17	1,45	0,39



Рис. 18. Методика проектной отладки параметров переходов

Для его выполнения выбирается режим: автоматизированный или неавтоматизированный. Для автоматизированного режима необходимо задать приоритет параметров перехода, которыми можно управлять для достижения максимально возможной в данных условиях точности. Процесс подбора параметров

перехода базируется на разработанных рекомендациях по снижению погрешностей обработки. Ограничениями значений параметров перехода являются и другие условия обработки: стойкость и прочность инструмента, возможности оборудования, возможности применения кондукторных втулок, производительность и др. Отладка заканчивается при достижении максимально возможной в данных условиях точности обработки.

Методика технологического оснащения планов обработки отверстий

Технологические возможности методов обработки отверстий КМИ во многом определяются технологическими возможностями комплекта оснастки (КО), состоящего из (рис. 19): режущего инструмента (И), вспомогательного инструмента (ВИ), приспособления для закрепления детали (ПД), приспособления для направления инструмента (НИ). Поэтому выбор методов обработки отверстий необходимо выполнять совместно с выбором технологической оснастки. Для этого необходимо оценить функциональные возможности элементов КО с точки зрения обеспечения отдельных параметров точности. Проведенный структурно-логический анализ причин возникновения погрешностей обработки отверстий позволил разработать систему требований к технологической оснастке (рис. 20) для обеспечения отдельных параметров точности, которая определяет какие технические решения (TP_i) должны быть в конструкции элементов оснастки. В основу этой системы положены выводы из теоретических и экспериментальных исследований данной работы. Каждый параметр точности Π_j предъявляет свои требования T_i к комплекту оснастки. В результате формируются требования $T_{и}^i, T_{ви}^i, T_{пд}^i, T_{ни}^i$ к каждому виду оснастки (см. рис. 20), образующие массив требований $B(B1, B2, \dots, BM)$, которые обеспечиваются в конкретном элементе ТО одним или несколькими техническими решениями TP_L , реализованными в конструктивном исполнении этих элементов.

Для формализации выбора технологической оснастки применялся аппарат математической логики – алгебра логики (алгебра высказываний). Разработанные математические модели состоят из логических предикатов для каждого параметра точности:

$$\Pi_j \subset T_1 \wedge \dots \vee T_i \subset B_1 \vee \dots \wedge B_{i+n} \subset TP_1 \vee \dots \wedge TP_{i+k}. \quad (8)$$

Адекватность этих моделей была доказана с помощью математических моделей формообразования. Для выбора оснастки по заданной точности составляется система предикатных уравнений:

$$\begin{cases} \Pi_1 \subset (TP_1 \wedge TP_{20} \wedge (TP_7 \wedge TP_{26}) \\ \dots \\ \Pi_j \subset TP_j * \wedge \dots \vee * TP_{i+k} \\ \dots \\ \Pi_n \subset TP_i \vee \dots \wedge TP_{i+n} \end{cases} \quad (9)$$

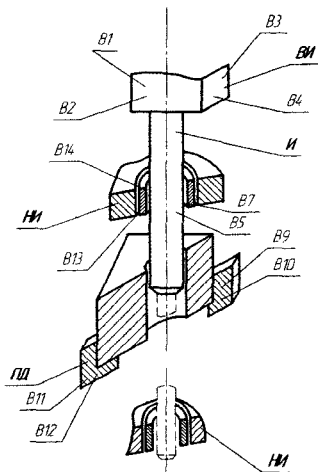


Рис. 19. Формирование КО

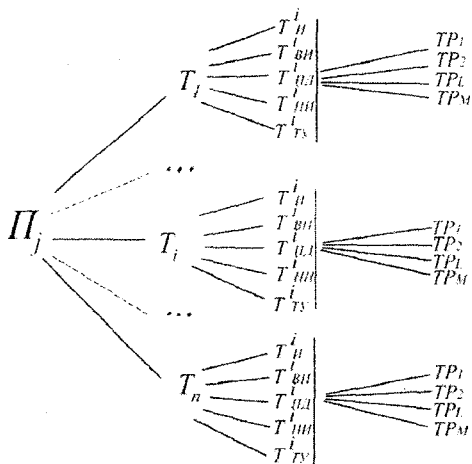


Рис. 20. Система требований к КО

Для описания элементов оснастки и решения систем (9) разработаны принципы формирования фондов технических решений, реализованные в форме таблиц соответствий, фрагмент которых для узла направления инструмента (НИ) показан в табл. 3. В таблицах приводятся сведения о наличии (1) или отсутствии (0) у каждого вида оснастки того или иного технического решения TP_L . Например, TP_7 – гладкие кондукторные втулки с зазором, TP_8 – беззазорные втулки, TP_{26} – уменьшение зазора между сменной и постоянной кондукторными втулками, TP_{27} – качающаяся втулка, TP_{28} – плавающая втулка, TP_{29} – плавающе-качающаяся втулка, TP_{30} – жесткое закрепление узла НИ.

Опишем примеры некоторых высказываний. Для обеспечения параметра точности – отклонение от соосности – составлено высказывание:

$$P_3 \subset T_1 \wedge T_3 \wedge T_5 \wedge T_6 \wedge T_8, \quad (10)$$

где T_1 – устранение поперечных перемещений инструмента;

T_3 – устранение угловых перемещений (перекосов) инструмента;

T_5 – уменьшить изгибные деформации инструмента;

T_6 – устранение поперечных перемещений заготовки;

T_8 – устранение угловых перемещений (перекосов) заготовки.

Для выполнения требований T_i составлены высказывания, например,

$$T_1 \subset B1 \wedge B13, \quad (11)$$

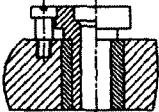
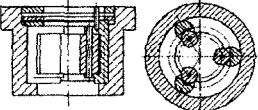
где $B1$ – устранить возможность линейных перемещений в узле закрепления инструмента (ВИ);

$B13$ – устранить возможность линейных перемещений узла направления инструмента (НИ);

$$B1 \subset TP_1 \vee TP_2. \quad (12)$$

Это означает, что устранить возможность линейных перемещений в узле закрепления инструмента (ВИ) можно, используя жесткий (ТР₁) или качающийся патрон (ТР₂).

Таблица 3

Направление инструмента	ТР ₇	ТР ₈	ТР ₂₆	ТР ₂₇	ТР ₂₈	ТР ₂₉	ТР ₃₀
	1	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	0	1

В зависимости от значений ТР_i высказывания (8) принимают значения ИСТИНА – при П_i = 1 или ЛОЖЬ – при П_i = 0. Таким образом, решение системы (9) позволяет формировать комплекты технологической оснастки для обеспечения заданных параметров точности.

Выбор конкретных типоразмеров оснастки, в зависимости от параметров детали (габаритные размеры) и оборудования, производится из баз данных режущих инструментов (И), вспомогательной оснастки (ВИ), приспособлений (ПД) и (НИ). Таким образом создаются варианты КО, параметры которых являются исходными данными при расчете погрешностей по математическим моделям формообразования. Варианты КО, обеспечивающие заданные параметры точности, далее оцениваются по другим параметрам технологических операций: производительности, стоимости, стойкости и др. Если среди имеющихся на предприятии элементов оснастки нет обеспечивающих заданные параметры точности, то на основе математических моделей (8) и фондов технических решений (см. табл. 3) разрабатывается техническое задание на проектирование соответствующих элементов оснастки. Техническое задание формируется на основе тех технических решений, которые дают высказываниям П_i = 1. Методика выбора оснастки показана на рис. 21.

Таким образом, разработан третий метод технологического обеспечения точности – формализованный выбор оснастки по критериям точности.

Реализация методологии параметрического проектирования планов обработки отверстий КМИ

Разработанные методы технологического обеспечения точности позволили реализовать методологию параметрического проектирования планов обработки отверстий, позволяющей уже на стадии проектирования технологического про-

цесса определить параметры переходов, обеспечивающие заданную точность. Разработанная методология состоит из следующих этапов (рис. 22):

1. Из базы данных методов обработки выбирается первый переход. На его выбор влияют вид заготовки, тип оборудования, маршрут обработки детали и др.

2. Формируется комплект ТО для обеспечения заданных параметров точности на данном переходе. На этом этапе реализуется метод технологического обеспечения точности – формализованный выбор ТО по критериям точности.



Рис. 21. Методика технологического оснащения

3. Формирование исходных параметров переходов для расчета погрешностей обработки по математическим моделям формообразования. Назначение параметров оснастки, режимов резания, оборудования и др. производится исходя из условий обеспечения максимальной точности на каждом переходе. При этом выходные данные переходов, с учетом наследования погрешностей, формируют входные данные для последующих. Для формирования исходных данных применяется разработанное информационное обеспечение – база данных для определения погрешностей обработки (см. табл. 2).

4. Расчет погрешностей обработки по разработанным математическим моделям формообразования. Достижение максимальной точности осуществляется на основе второго метода технологического обеспечения точности – проектной компьютерной отладки параметров перехода (см. рис. 18).

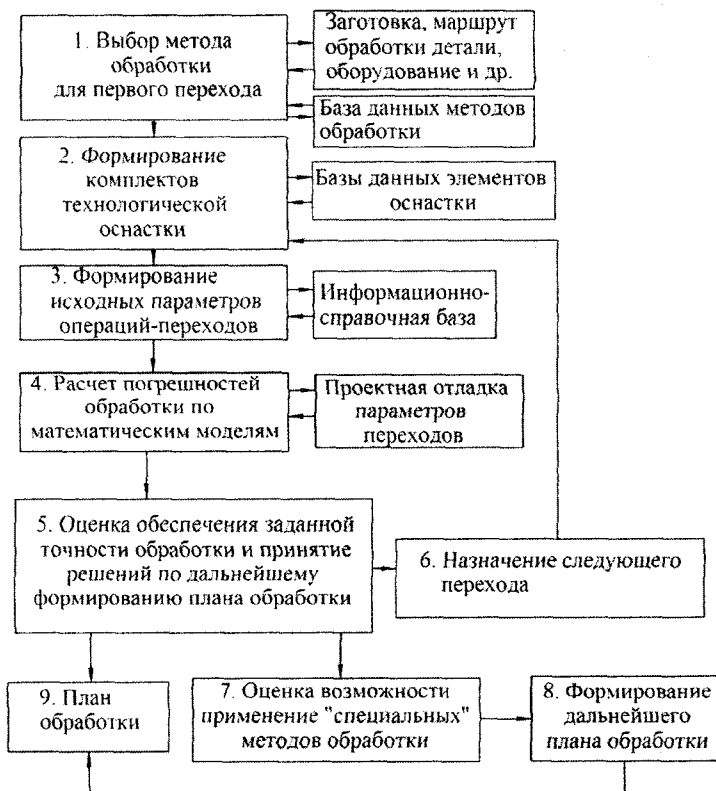


Рис. 22. Этапы методологии параметрического проектирования планов обработки отверстий

5. Оценка обеспечения заданных параметров точности позволяет принимать решения о дальнейшем формировании плана обработки. Если заданная точность обеспечена, то оформляется технологическая документация с указанием всех необходимых параметров переходов (этап 9). Если один или несколько заданных параметров точности не выполнены, то назначается следующий переход (этап 6) и процесс проектирования повторяется. Такое циклическое проектирование позволяет управлять погрешностями обработки по переходам путем варьирования конструкторско-технологических параметров для минимизации числа переходов.

7. Если исчерпаны все возможности по достижению в данных условиях заданной точности обработки отверстий КМИ, например, очень «жестко» задана точность формы (отклонение от круглости 0,005 мм и менее), то назначаются

дальнейшие переходы с использованием «специальных» методов обработки: координатное растачивание, шлифование, хонингование и др.

Результаты работы позволили создать новую систему ТПП (рис. 23), в которой этап параметрического проектирования планов обработки (этап 2) одновременно решает и задачи отладки (этап 4), возникающие на этапе внедрения спроектированного ТП в производство, что значительно сокращает затраты времени и материальных средств на этом этапе. Выбор переходов выполняется совместно с выбором и расчетом параметров технологической оснастки.

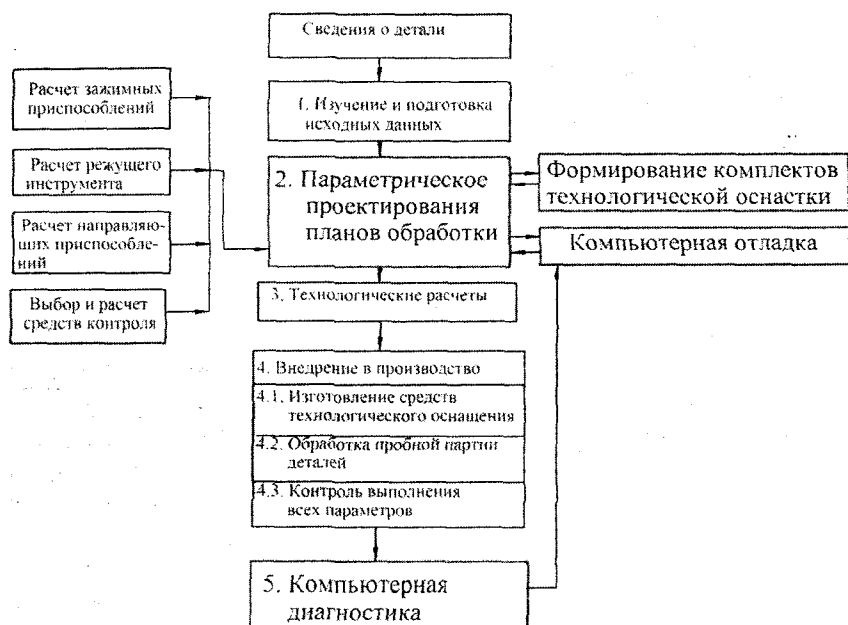


Рис. 23. Основные этапы новой системы ТПП

Компьютерная диагностика (этап 5) проводится после появления отклонений от заданной точности обработки деталей на участке, где реализуется спроектированный и отлаженный технологический процесс обработки отверстий. Наиболее вероятными причинами точностных отказов отлаженного технологического процесса являются отступления от заданных параметров операций: геометрии режущих лезвий инструмента, точности оборудования (например, амплитуда осевых колебаний шпинделя) и др. Причинами таких отступлений могут быть неправильная заточка и износ инструмента, неправильная установка режимов резания, износ оборудования и т.д.

Поиск причин может занять много времени. Компьютерная система диагно-

стики, основанная на математических моделях формообразования, позволяет проводить этот поиск целенаправленно, так как в зависимости от невыполненных параметров точности указываются конкретные параметры операции, которые нужно проверить. В этом случае система определяет возможные причины отклонений от заданной точности обработки и дает задание на проверку конкретных параметров технологической операции. Это позволяет сократить сроки внедрения технологических процессов в производство.

Внедрение результатов работы проводилось по нескольким направлениям:

- разработка новых технологий и конструкций оснастки (включая патенты на изобретения) для обработки отверстий КМИ, которые позволили сократить число переходов до 2 раз, повысить точность и производительность обработки;
- разработка пакетов прикладных программ (ППП) для проектирования, отладки и диагностики технологических процессов, позволившие снизить затраты на ТПП на 20–30%, а время проектирования и отладки ТП в 2–3 раза (табл. 4);
- разработка информационного обеспечения процесса проектирования на основе справочной базы данных определения погрешностей обработки отверстий.

Таблица 4

Этапы ТПП	Время выполнения, дни	
	Было	Стало
Проектирование планов обработки отверстий	1–2	0,1–0,5
Изготовление оснастки	15–25	10–20
Обработка пробной партии	1–3	1–3
Корректировка параметров технологии и оснастки	10–20	0
Изготовление новой оснастки	10–15	0
Итого	37–65	11,1–23,5

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана новая методология параметрического проектирования планов обработки отверстий КМИ, отличающаяся тем, что назначение каждого перехода, начиная с первого, зависит от выходных параметров точности предыдущего перехода, а также в совместности выбора переходов и технологической оснастки, что позволяет до 2 раз сократить число переходов.

2. На основе разработанной системы математических моделей формообразования круглых отверстий КМИ, установлено, что на режущих лезвиях инструмента образуются разные зоны срезаемого припуска в зависимости от конкретных сочетаний величин диссимметрии его геометрических параметров и режимов обработки. Полученные модели описывают профили обработанного отверстия в продольном и поперечном сечениях, что позволяет рассчитывать погрешности размера, формы и расположения оси.

3. На основе моделей формообразования отверстий инструментами одностороннего резания установлено, что профили поперечных сечений обработанных отверстий состоят из дуг различных радиусов кривизны и их углов смежности, а в

профиле продольного сечения получается ступенчатая поверхность. Точность размера и формы в поперечном сечении обработанного отверстия зависит от сочетаний величин различных параметров: подачи S ; зазора между кондукторной втулкой и инструментом; углового расположения опорного направляющего элемента ψ_2 и его осевого отставания τ от вершины режущей кромки. Также установлено, что наименьшие погрешности обработки возникают при значениях

$$\tau = 1,1 \frac{S \cdot \psi_2}{360}.$$

4. Установлен механизм наследования погрешностей при многопереходной обработке отверстий. Показано, что синхронизация фазы осевых колебаний шпинделя и положений режущих кромок инструмента относительно заготовки позволяет снизить увод оси отверстия на следующем переходе на 80%.

5. Впервые показано, что при определенных сочетаниях подачи и диссимметрии инструмента, увеличение подачи приводит как к уменьшению, так и к увеличению увода оси отверстия. Также инструменты с большей диссимметрией режущих лезвий могут давать погрешности отверстия меньшие, чем более симметричные. Это позволило разработать рекомендации по снижению погрешностей обработки для практики технологического проектирования.

6. Разработана справочная база определения погрешностей обработки отверстий КМИ для информационного обеспечения неавтоматизированного и автоматизированного расчетного проектирования технологических операций.

7. Установлены структурно-логические связи между элементами технологической оснастки и параметрами точности обработки отверстий, позволяющие целенаправленно выбирать оснастку, обеспечивающую максимальную возможную точность на проектируемом переходе.

8. Разработана новая система ТПП, отличающаяся тем, что этапы синтеза планов обработки и компьютерной диагностики решают задачи этапа натурной отладки проектируемого технологического процесса, что позволило снизить затраты на ТПП на 20–30%.

9. Разработанная методология проектирования планов обработки отверстий КМИ, реализованная в виде программ и подпрограмм для САПР ТП, внедрена на ряде машиностроительных предприятий. В результате применение этих разработок трудоемкость этапов проектирования и отладки операций обработки отверстий снизилась в 2–3 раза, количество бракованных изделий – до 3 раз.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Дерябин, И.П. Моделирование точности обработки отверстий ружейными сверлами / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, И.Н. Миронова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение» – 2004. – Вып. 5. – № 5 (34). – С. 183–190.

2. Дерябин, И.П. Разработка САПР операций обработки отверстий ружейными сверлами / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, И.Н. Миронова // Технология машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 55–58.

3. Дерябин, И.П. Прогнозирование параметров точности при обработке отверстий / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев // *Технология машиностроения*. – 2006. – № 4 (46). – С. 9–14.
4. Дерябин, И.П. Моделирование точности многопереходной обработки отверстий / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, О.А. Кожарина // *Технология машиностроения*. – 2007. – № 11. – С. 21–24.
5. Дерябин, И.П. Проектирование, отладка и диагностика технологических процессов в АСТПП / И.П. Дерябин // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 1. – С. 43–45.
6. Дерябин, И.П. Исследования наследования погрешностей расположения осей отверстий при многопереходной обработке / И.П. Дерябин, О.А. Кожарина // *Технология машиностроения*. – 2008. – № 6. – С. 23–25.
7. Дерябин, И.П. Технологическое оснащение планов обработки отверстий в АСТПП / И.П. Дерябин // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 7. – С. 46–50.
8. Дерябин, И.П. Информационно-справочная база погрешностей обработки отверстий для технологического проектирования / И.П. Дерябин // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2008. – № 9. – С. 16–21.
9. Дерябин, И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография / И.П. Дерябин, А.В. Козлов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 251 с.
10. А.с. № 1098685 СССР. Кондукторная втулка / С.Г. Лакирев, И.П. Дерябин, А.В. Козлов // *Открытия. Изобретения*. – 1984. – № 23.
11. А.с. № 1110553 СССР. Патрон для закрепления деталей / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, И.П. Дерябин // *Открытия. Изобретения*. – 1984. – № 32.
12. А.с. № 1234056 СССР. Устройство для установки и закрепления деталей / С.Г. Лакирев, С.Г. Чиненов, И.П. Дерябин, А.В. Козлов // *Открытия. Изобретения*. – 1986. – № 20.
13. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2008612538 Российская Федерация. Проектирование технологий обработки отверстий / И.П. Дерябин, И.Н. Миронова. – № 2008611397; заявл. 03.04.08; зарегистр. 22.05.08.
14. Дерябин, И.П. Решения некоторых задач технологического проектирования с использованием САПР / И.П. Дерябин, А.В. Козлов // *Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: тематический сб. научн. тр.* – Челябинск: ЧПИ, 1986. – С. 117–123.
15. Дерябин, И.П. Методика автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей с высокоточными поверхностями / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, В.П. Пургин // *Комплексная автоматизация проектно-конструкторских работ в машиностроении: материалы Всесоюзного научно-техн. семинара*. – Ленинград, 1988. – С. 67–70.
16. Дерябин, И.П. Выбор рационального маршрута обработки отверстия в САПР ТП / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев // *Итоги, проблемы и перспективы ком-*

плексно-автоматизированных производств в машиностроении и приборостроении: материалы Всесоюзной научно-техн. конференции. – Горький, 1990. – С. 111–114.

17. Дерябин, И.П. Математическое моделирование точности механической обработки деталей в курсе САПР ТП / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Математическое моделирование в машиностроении: материалы Первой всеоюзной школы-конференции. – Куйбышев, 1990. – С. 41.

18. Дерябин, И.П. Исследование точности обработки отверстий методом компьютерного моделирования / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. тр. ЧГТУ. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – С. 16–21.

19. Дерябин, И.П. Моделирование процесса формообразования при проектировании и технологическом оснащении планов обработки отверстий / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. тр. ЧГТУ. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – С. 134–140.

20. Дерябин, И.П. Методика компьютерного прогноза точности, диагностики и отладки операций обработки отверстий / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. тр. ЧГТУ. – Челябинск, 1996. – С. 91–98.

21. Дерябин, И.П. Компьютерное моделирование обработки глубоких отверстий / И.П. Дерябин, И.Н. Миронова // Автоматизация и информация в машиностроении (АИМ 2000). – Тула: ТулГУ, 2000. – С. 48–49.

22. Дерябин, И.П. Моделирование точности обработки отверстий однолезвийным инструментом / И.П. Дерябин, И.Н. Миронова // Совершенствование наукоемких технологий и конструкций: сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С. 15–19.

23. Дерябин, И.П. Моделирование формообразования отверстий многолезвийными инструментами / И.П. Дерябин, С.Г. Лакирев, А.В. Автин // Совершенствование наукоемких технологий и конструкций: сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С. 44–47.

24. Дерябин, И.П. Моделирование обработки отверстий для формирования новых баз знаний в интеллектуальных системах / И.П. Дерябин, Я.М. Хилькевич // 29 международная конференция по металлообработке: сб. докладов. – Хайфа (Израиль): Технион, 2003. – 12 с.

25. Дерябин, И.П. Моделирование точности обработки отверстий инструментами одностороннего резания (ИОР) / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, И.Н. Миронова // Современные технологические системы в машиностроении: сб. научн. тр. – Барнаул: АлГТУ, 2003. С. 59–60.

26. Дерябин, И.П. Прогнозирование параметров точности при проектировании технологических процессов / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. научн. тр. ЮУрГУ. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 84–89.

27. Дерябин, И.П. Исследование точности обработки отверстий ружейными сверлами / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, И.Н. Миронова // Прогрессивные техноло-

гии в машиностроении: сб. научн. тр. ЮУрГУ. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 79–84.

28. Дерябин, И.П. Анализ моделей динамических процессов формообразования отверстий / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, Я.М. Хилькевич // Известия Челябинского научного центра. – 2005. – Вып. 2 (28). – С. 42–47.

29. Дерябин, И.П. Математическое моделирование процессов обработки отверстий: учебное пособие / И.П. Дерябин, А.В. Козлов, А.Г. Схиртладзе. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 214 с.

30. Дерябин И.П. Отклонения от перпендикулярности и отклонения диаметра / И.П. Дерябин // Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков. – М.: Машиностроение, 2005. – С. 299–304.

31. Дерябин, И.П. Моделирование точности многопереходной обработки отверстий на станках с ЧПУ / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, О.А. Кожарина // Инструмент и технологии. – Санкт-Петербург. – 2007. – № 26–27. С. 64 – 68.

32. Дерябин, И.П. Разработка технологии и оснастки на основе компьютерного моделирования точности обработки отверстий. / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев, И.Н. Миронова // Инструмент и технологии. – Санкт-Петербург. – 2007. – № 26–27. – С. 68–72.