



На правах рукописи

Кошин Анатолий Александрович

**ТЕОРИЯ ТОЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОИНСТРУМЕНТНОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.02.08 – “Технология машиностроения”

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"
Челябинского государственного технического университета.

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

Официальные оппоненты: лауреат Ленинской премии,
доктор технических наук, профессор,
Базров Б.М.;
заслуженный машиностроитель РФ,
доктор технических наук, профессор
Пономарев В.П.;
доктор технических наук, профессор
Султан-заде Н.М.

Ведущее предприятие – Центральное бюро нормативов по
труду при Всероссийском центре
производительности Министерства
труда России

Защита состоится 27 мая 1997 года, в 11.00 часов,
в ауд. 502 на заседании специализированного совета Д 053.13.05
в Челябинском государственном техническом университете
по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан " _____ " 1997 г

Ученый секретарь специализированного совета
доктор экономических наук, профессор

И.А.Басов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Токарная обработка является основным формообразующим методом в машиностроении, поэтому меры по повышению ее эффективности имеют не только теоретическое, но и огромное практическое значение.

Перспективным направлением повышения эффективности технологии считается применение ЧПУ. Станки с ЧПУ автоматизируют вспомогательные перемещения и обеспечивают за счет емкости инструментального магазина высокую концентрацию переходов, в результате чего достигается высокая гибкость производства и повышение производительности.

Однако известны и более эффективные решения повышения производительности. Радикальным решением в этом направлении является многоинструментная обработка. Многоинструментные наладки реализуются на токарно-автоматном оборудовании. В настоящее время на машиностроительных заводах эксплуатируются более 200 моделей токарно-автоматного оборудования: токарно-револьверные автоматы (ТРА) и полуавтоматы, многошпиндельные горизонтальные автоматы (ТМГА) и полуавтоматы, многошпиндельные вертикальные полуавтоматы, автоматы продольного фасонного точения, фасонно-отрезные автоматы, многорезцовые полуавтоматы.

Анализ токарной обработки, проведенный в 1985-90 гг. по заданию Центрального бюро нормативов по труду (ЦБНТ) Государственного комитета по труду и социальным вопросам СССР на 85 заводах разных отраслей, показал, что применение станков с ЧПУ уменьшает основное время в 1.6 раза по сравнению с универсальными станками, а обработка на ТМГА – в 3.9 раза, при этом непроизводительные затраты сокращаются на ЧПУ в 2.9 раза, а на ТМГА за счет одновременного выполнения переходов – в 5 раз. В итоге, перевод технологий с универсальных станков на станки с ЧПУ повышает производительность в среднем в 2.3 раза, а перевод на ТМГА – в 6.3 раза.

К настоящему времени токарно-автоматное оборудование и, следовательно, эта эффективнейшая технология нашли широкое применение лишь в крупносерийном и массовом производстве. Основная тенденция машиностроения состоит в повышении мобильности. – крупносерийное и массовое производство уходят в прошлое, будущее за мобильным, быстро переналаживаемым средне- и мелкосерийным производством. Поэтому крайне важно не растерять, а наоборот перенести накопленный опыт такого радикального повышения эффективности технологии, как многоинструментная обработка в современные условия мобильного гибкого производства.

Многоинструментная токарная обработка, и в особенности такие ее концентрированные варианты как многосуппортная и многошпин-

дельная, имеют большие технологические возможности по концентрации переходов (на ТРА – до 20 переходов, на ТМГА – до 30), по точности обработки (ТРА – до 8 квалитета, ТМГА – до 9), что позволяет зачастую вести полную обработку детали на одной токарно-автоматной операции.

Однако эти богатейшие возможности многоинструментной обработки сегодня используются не более, чем наполовину. Токарно-автоматное оборудование применяют лишь для черновой и получистовой обработки: 88% наладок на ТРА имеют точность не выше 12 квалитета, для ТМГА такие наладки составляют 90%.

Из вышесказанного следует проблема современного машиностроения: **повышение эффективности использования технологических возможностей многоинструментной токарной обработки и распространение области ее применения на серийное производство.**

Причина такого положения кроется, в первую очередь, в отсутствии расчетной теории проектирования многоинструментной обработки, чем и обуславливается весьма приблизительные рекомендации в существующих нормативах, издававшихся в 1955-70 гг.

Субъективный характер существующих методик проектирования токарно-автоматных операций приводит к длительной их отладке и вынуждает ограничиваться простейшими наладками. В то же время современное токарно-автоматное оборудование технически позволяет осуществлять быструю переналадку (сменные комплекты кулачков, электромеханические командоаппараты и т.д.), однако трудность состоит в надежном определении наладочных параметров на стадии проектирования. Еще более усугубляется ситуация при переводе многоинструментной обработки на программное управление, а промышленность уже выпускает токарно-револьверные станки с ЧПУ, осваивает выпуск многошпиндельных станков с ЧПУ (Киевский станкостроительный завод, фирмы Gildemeister, Beringer).

Поэтому, основной предпосылкой для разрешения создавшейся проблемы является разработка теории проектирования многоинструментной обработки.

Организация мобильной многоинструментной технологии требует решения комплекса вопросов – от разработки теории процессов многоинструментной обработки, до создания нормативной базы по проектированию технологических операций. Многоинструментная обработка – это многофакторная, что ее проектирование неизбежно требует применения компьютерных технологий, т.е. создания систем автоматизированного проектирования (САПР). Поэтому работа выполнена в соответствии с программой ГКНТ СССР на 1986-1990 годы в рамках решения научно-технической проблемы 0.76.01. “Разработать и внедрить систему методических и нормативных материалов, типовых решений по научной организации труда, обеспечивающих эффек-

тивное использование техники и трудовых ресурсов" по заданию 08.01.А. "Разработать и внедрить методические рекомендации по расчету норм времени на ЭВМ в едином цикле с автоматизированным проектированием технологических процессов".

Анализ нормативных методик и исследований по многоинструментной обработке показал, что ключевым фактором, отражающим саму суть многоинструментной обработки, является точность выполняемых размеров. Поэтому, базой в расчетной теории проектирования многоинструментной обработки должна являться теория точности.

Цель работы. Разработка теории точности многоинструментной токарной обработки и создание нормативной базы и САПР оптимальных многоинструментных токарных операций.

Научная новизна. Решена крупная научная проблема, имеющая межотраслевое значение, заключающаяся в разработке теории и нормативной базы размерно-точностного проектирования многоинструментной токарной обработки, где впервые отражается влияние структуры многоинструментной наладки на точность размеров, режимы резания и производительность операции.

1. Поскольку погрешность многоинструментной токарной обработки на 80% определяется силовым взаимовлиянием инструментов наладки, для теории точности многоинструментной обработки разработан комплекс математических моделей сил резания:

кинематическая деформационная модель процесса свободного прямоугольного резания, описывающая закономерности деформирования и разрушения обрабатываемого материала в зоне резания в зависимости от перемещения режущего клина;

аналитическая модель угла сдвига, впервые позволяющая рассчитать его значение в зависимости от условий резания и свойств обрабатываемого материала;

комплекс аналитических моделей сил резания для несвободного резания, где впервые показан кусочно-аналитический характер зависимостей для реальных условий обработки.

Для использования аналитических моделей сил резания в задачах управления разработан метод аппроксимации их простейшими степенными зависимостями на интервале с размытыми границами.

2. На базе проведенной классификации разработан комплекс моделей точности для односуппортных и двухсуппортных многоинструментных наладок. Комплекс включает модели искажения выполняемых размеров и модели полей рассеяния размеров при обработке партии заготовок на участке станков. Впервые показано, что поле рассеяния определяется не только колебанием припуска, но и его величиной. Модели позволяют оценить вклад каждого инструмента многоинструментной наладки в погрешность каждого выполняемого размера.

3. На базе разработанных моделей полей рассеяния создан комп-

лекс моделей управления многоинструментной обработкой. Для односуппортной обработки впервые учтено количество инструментов в наладке, а также схема распределения припуска. Для двухсупортной обработки модель определяет двухпараметрическую область допустимых подач. При наличии нескольких ограничений по точности предложена операция наложения областей.

Разработаны схемы оптимизации подач для основных видов многоинструментной обработки, позволяющие впервые расчетным путем определить лимитирующую позицию. Эти схемы, наряду с параметрической оптимизацией, создают расчетную базу для структурной оптимизации многоинструментной наладки.

Практическая ценность. Для односупортной многоинструментной обработки на базе моделей точности предложен поправочный коэффициент на подачу, впервые учитывающий исходную погрешность заготовки, требуемую точность выполняемого размера и количество инструментов в наладке. Для двухсупортной обработки впервые разработана методика коррекции подач по структуре наладки.

Схемы оптимизации составили базу расчетной методики проектирования оптимальной многоинструментной токарной обработки, которая за счет параметрической оптимизации повышает производительность на 14%, за счет структурной оптимизации — на 52%. Разработанная расчетная методика положена в основу трех новых справочников общемашиностроительных нормативов и САПР токарно-автоматных операций.

Разработана методология технологически ориентированного нормативного справочника с равномерной точностью по всему полю нормативных таблиц и минимальным количеством поправочных коэффициентов (справочник подготовлен к изданию). Эта методология позволила радикально уменьшить количество поправочных коэффициентов (не более двух), обеспечить равномерную точность нормирования в пределах 14%, снизить трудоемкость нормирования на 50%.

Разработаны основы алгоритмического обеспечения САПР на базе командных строк, обеспечивающие его инвариантность относительно основных единиц проектирования и позволяющие производить адаптацию САПР не только по базам данных, но и по проектирующим алгоритмам. Предложенные единое поле данных и панорамный ввод исходных данных позволили сформировать функциональную схему САПР, допускающую одновременную работу нескольких пользователей с одной наладкой и структурную оптимизацию наладки-аналога.

Новый метод построения САПР обеспечивает при внедрении ее адаптируемость по алгоритмам и позволяет вписаться в любую схему организации проектных работ на предприятиях.

Реализация работы. Разработаны 5 нормативных справочников для многоинструментных токарных работ, включая 3 справочника об-

щемашиностроительных нормативов, разработанных по заданию ЦБНТ.

Разработаны пакеты прикладных программ для проектирования операций, выполняемых на токарных многошпиндельных горизонтальных автоматах (ППП Толаз, 5 версий), эксплуатируемые на 17 заводах и включенные в ОФАП.

Результаты работы нашли применение в учебном процессе: подготовлены три типовые учебные программы по курсу "САПР технологических процессов", написан и издан учебник для вузов по этому курсу для специальности "Технология машиностроения", разработан компьютерный учебник "САПР технологических процессов", прошедший регистрацию в ОФАП НИИ ВШ.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях (НТК), совещаниях и семинарах: "Автоматизация технологического проектирования в системе повышения эффективности производства и качества продукции", Владивосток, 1979, 1982, 1986, 1990 гг.; "Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках", Челябинск, 1984г.; "Автоматизация проектирования автоматных операций", Челябинск, 1984г.; "Автоматизированное проектирование токарных автоматных операций", Челябинск, 1987г.; "Вопросы конструирования и эксплуатации станков с ЧПУ и промышленных роботов, перспективы их развития", Ереван, 1981г.; "Пути повышения эффективности механической обработки деталей", Курган, 1979г.; "Автоматизация проектирования машиностроительных предприятий", Киев, 1978, 1979, 1981 гг.; "Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов", Новосибирск, 1982г.; "Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологическая подготовка производства в промышленности", Курган, 1986г.; "Автоматизация программирования и организация участков станков с ЧПУ", Челябинск, 1982г.; "Повышение качества деталей в машиностроении технологическими методами", Рыбинск, 1980г.; "Пути повышения производительности и качества механообработки на машиностроительных предприятиях Урала", Свердловск, 1984г.; "Механизация и автоматизация ручных и трудоемких операций", Кемерово, 1984г.; "Механика и технология машиностроения", Уральское отделение АН России, Свердловск, 1990г.; "Проблемные вопросы развития теории и практики автоматизации технологического проектирования", Пенза, 1979г.; "Эффективность применения общемашиностроительной автоматизированной системы технического нормирования операций абразивной обработки", Челябинск, 1985г.; "Автоматизация проектирования и конструирования", Ленинград, 1983г.; "Автоматизация проектно-конструкторских работ в машиностроении", Минск, 1982, 1984, 1986, 1988 гг.; ВДНХ СССР, 1983, 1985, 1986 гг.; а также на МВК секции САПР ТПП-М ГКНТ СССР, 1988г.; отраслевых совещаниях "Сос-

тояние и перспективы разработки и внедрения ГПС и САПР в машиностроении", ГТУ Минмаш СССР, 1985-90 гг.; на научно-технических советах ГСПКТБ "Оргприминструмент", Москва, 1982-87 гг.; ЦБНТ Госкомтруда СССР, Москва, 1983-92 гг.; ЦНИТИМ, Москва, 1978-90 гг.

Законченная работа обсуждена и одобрена на совместном совещании кафедр "Технология машиностроения", Станки и инструмент" ЧГТУ.

Публикация. По теме диссертации опубликовано 87 работ и выполнено 7 отчетов по научно-исследовательской работе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 290 страниц машинописного текста, включая 78 рисунков, 88 таблиц, а также список литературы из 405 наименований.

Основное содержание работы

1. Теоретические предпосылки

Существующие нормативные методики для многоинструментной обработки в основу берут лимитирующий переход. Однако это понятие не определено. Поэтому велика доля субъективности при проектировании токарно-автоматных операций, в результате которой для одной и той же детали на разных заводах разброс по штучному времени достигает 47%, по времени технического обслуживания 55%. Из этого следует необходимость разработки расчетной теории проектирования многоинструментной обработки.

Основы теории расчета многоинструментных наладок заложены в работах Г.И.Темчина, А.М.Гильмана. Однако в них учитывается лишь организационная взаимосвязь инструментов, что выливается в расчет стойкости и скорости резания с учетом многоинструментности.

Подачи назначаются как и для одноинструментной обработки. При расчете подач не учитываются не только такие важные факторы, как исходная погрешность заготовки, требуемая точность обеспечения размеров, но и суть многоинструментной наладки: виды и количество инструментов, их взаимное расположение и т.д.

Точность обработки является главным технологическим ограничением на подачу. Теоретические исследования по точности обработки А.П.Соколовского, Б.С.Балакшина, В.С.Корсакова показали, что наиболее значимой является погрешность вследствие упругих перемещений звеньев технологической системы, обусловленных силовым взаимодействием режущего инструмента и заготовки. При многоинструментной обработке накладывается еще и силовое взаимовлияние всех одновременно работающих инструментов наладки. Это позволяет сформулировать основную теоретическую предпосылку для разработки

теории точности многоинструментной обработки: силовое взаимовлияние всех инструментов наладки составляет основу формирования динамической составляющей погрешности обработки.

В соответствии с показателями погрешности сложились два вида моделей точности: модели искажения размеров и модели поля рассеяния размеров. Принципы моделирования поля рассеяния заложены в работах Б.С.Балакшина, В.С.Корсаковым разработана модель поля рассеяния для одноинструментной обработки. К.В.Вотинов предсказал, что поле рассеяния определяется не только колебанием припуска, но и его величиной. Эти работы служат базой для моделей точности многоинструментной обработки.

Модели точности базируются на теории линейных деформируемых систем. Для учета механизма взаимодействия звеньев технологической системы Б.М.Базровым предложен метод координатных систем с деформирующими связями. При разработке моделей точности многоинструментной обработки в соответствии с методологией Б.М.Базрова в работе проводится декомпозиция технологической системы, но на уровне подсистем, с минимизацией их числа.

Кроме основной задачи - разработки теории точности многоинструментной обработки - необходимо решить также задачи, позволяющие практически использовать разработанную теорию:

разработать простые и надежные модели сил резания, т.к. основу погрешности составляет силовое воздействие инструмента;

проводить классификацию многоинструментальных наладок;

разработать методы расчетной оптимизации многоинструментальной обработки, т.к. задача многофакторна и многовариантна;

разработать нормативную базу токарно-автоматной обработки;

разработать САПР токарно-автоматных операций.

2. Математические модели сил резания

Существующие аналитические модели сил резания рассматривают процесс резания как установившийся, стационарный и исходят из баланса сил резания и напряжений в зоне резания. В итоге они не учитывают динамики процесса резания, его нестационарности (элементный характер стружки) и содержат внутренние характеристики процесса, например, угол сдвига, который определяется экспериментально.

Эти модели базируются на ряде гипотез относительно механизма разрушения обрабатываемого материала в зоне резания, например, наличие поверхности сдвига. Вследствие этого применимость моделей определяется еще и правомочностью базовых гипотез.

В рамках более общего, фундаментального подхода, сформулированного в работах В.А.Кудинова, Д.Т.Блэка, Р.И.Силлина, рассмат-

риается нестационарный процесс деформирования и разрушения материала вследствие продвижения режущего клина (рис. 1).

Для условий свободного прямоугольного резания, для плоской схемы стружкообразования, приходим к двумерной смешанной краевой задаче нелинейной теории упругости с кинематическими граничными условиями.

Внешние воздействия, обуславливающие деформированное и напряженное состояние обрабатываемого материала и его разрушение в результате этих воздействий, здесь имеют кинематический характер, — это перемещения режущего клина, т.е. задаются перемещения границы Γ_3 . На границе Γ_2 задают-

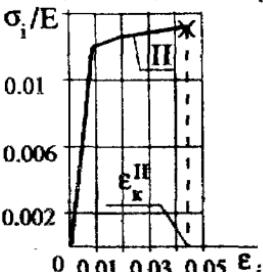


Рис. 2. Диаграмма деформирования

ренных узлов сетки, по ним находятся компоненты тензора деформаций и интенсивности деформаций в каждом узле. При достижении в узле предельной деформации ϵ_k , материал считается разрушившимся. Перемещение резца с некоторым шагом производится до тех пор, пока модуль силы, вычисляемой по границе Γ_3 не составит 75% от максимального значения за период нагружения.

На рис. 3 приведены результаты расчета поля деформаций для диаграммы деформирования,

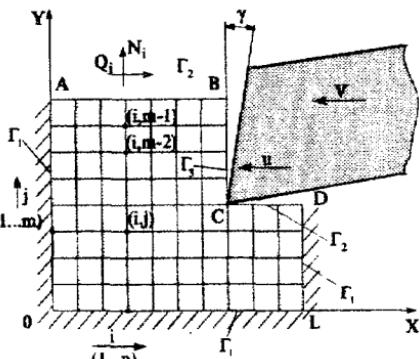


Рис.1. Схема решения задачи
внешних воздействий, обуславливающие деформированное и напряженное состояние обрабатываемого материала и его разрушение в результате этих воздействий, здесь имеют кинематический характер, — это перемещения режущего клина, т.е. задаются перемещения границы Γ_3 . На границе Γ_2 задаются напряжения (действие задней грани).

Как показал С.Н.Корчак, при анализе процесса резания необходимо учитывать, что сопротивляемость материалов разрушению (рис. 2) зависит от скорости деформации и температуры деформируемого материала $\sigma_i = f(\epsilon_i, T, \dot{\epsilon}_i)$, поэтому поставленная задача (рис.1) нелинейна.

Решение данной задачи проведено методом конечных разностей на равномерной сетке. Для заданного перемещения узлов границы Γ_2 рассчитываются перемещения внутренних узлов сетки, по ним находятся компоненты тензора деформаций и интенсивности деформаций в каждом узле. И так для каждого

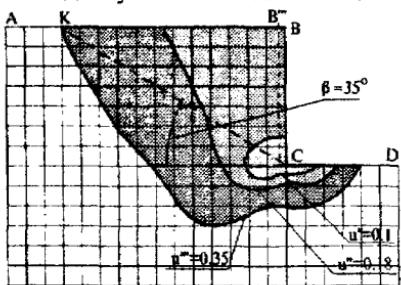


Рис. 3. Развитие пластических зон при перемещении режущего клина

изображенной на рис.2. Линии u' , u'' , u''' показывают распространение зон пластической деформации для перемещений резца u_1 , u_2 , u_3 (перемещение резца задается в долях шага сетки). Линия u''' соответствует перемещению резца, при котором происходит разрушение материала в зоне резания, т.е. суммарная сила начала уменьшаться и уже составила 0.75 от достигнутого ранее максимального значения. График $r - u$, где r – сила, действующая на резец (безразмерная), за период перемещения резца до положения u''' приведен на рис. 4.

Разработанная кинематическая деформационная модель процесса резания в качестве основы берет первопричину формирования напряженного состояния и разрушения обрабатываемого материала в зоне резания – перемещение режущего клина. Именно это перемещение обуславливает деформации в обрабатываемом материале, которые вызывают соответствующие напряжения, а суммирование последних определяет силу сопротивления продвижению режущего клина, т.е. силу резания.

Эта модель не использует гипотез о зоне сдвига. Наоборот, она позволяет рассчитать напряженное поле и выявить зону, где происходит, и момент, когда происходит разрушение обрабатываемого материала. Как показали расчеты, действительно, можно говорить о существовании зоны (близкой к плоскости), где деформации материала достигают предельной величины и происходит его разрушение и сдвиг. Модель позволяет определить положение этой плоскости (угол сдвига) в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

Кроме того, эта модель, базируясь на фундаментальных законах деформирования и разрушения материала, учитывает известный из практики нестационарный характер процесса резания. Если после точки u''' задавать резцу дальнейшие перемещения, мы получим вновь нарастание силы резания, а по достижении положения $2u'''$ получим падение нагрузки.

Таким образом, каждый цикл перемещения резца $[0, u''']$ формирует элемент стружки, а вся модель отражает, в итоге, элементный характер стружки. Применительно к силе резания это выльется в учет ее нестабильности, т.е. периодическое изменение величины в соответствии с элементностью процесса резания.

Составляющая силы резания P_r на задней грани режущего клина предопределется величиной площадки контакта задней грани с обработанной поверхностью, которую зачастую отождествляют с площадкой затупления режущего инструмента. Однако в зоне резания обрабатываемый материал претерпевает не только пластические, но и упругие

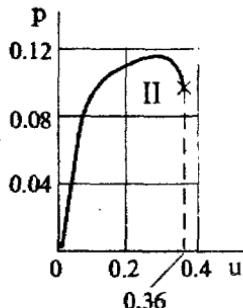


Рис. 4. График зависимости $r - u$

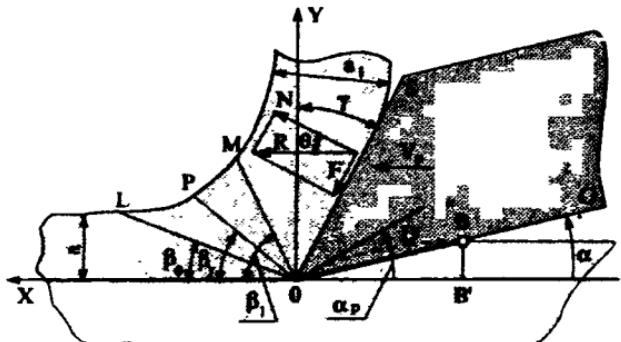


Рис. 5. Схема взаимодействия обрабатываемого материала и режущего клина на передней и задней гранях

рии упругости для полуплоскости. Решение этой задачи, осуществимое посредством интегрального преобразования Фурье, определяет кривую СADB. Участок АDB этой кривой характеризует релаксацию обработанной поверхности после прохождения вершины резца. Дуга АDB является площадкой контакта с резцом, задний угол которого равен α . Очевидно, что если $\alpha_p \leq \alpha$, то контакт отсутствует. В случае $\alpha_p > \alpha$, за длину контакта примем отрезок АВ'.

Таким образом, разработанная модель релаксации обработанной поверхности после прохождения вершины резца показала наличие площадки контакта на задней грани даже у абсолютно острого резца и позволяет рассчитать величину этой площадки в зависимости от геометрии резца и упругих свойств обрабатываемого материала.

Применительно к условиям свободного прямоугольного резания эти две модели позволяют рассчитать силы для любого обрабатываемого материала, если известна его прочностная характеристика $\sigma_i = f(\epsilon_i, \epsilon'_i, T)$. Однако обе они являются алгоритмическими и поэтому имеют чисто имитационное назначение, т.е. позволяют с помощью разработанных на их базе компьютерных программ рассчитывать показатели процесса резания при заданных условиях обработки.

При выполнении проектных работ чаще актуальна обратная задача. Для этого необходимо из имитационной модели найти обратную функцию, чего алгоритмическая модель не допускает. Поэтому для проектных задач целесообразно разработать, пусть не столь глубоко отражающие суть моделируемых явлений, но более обозримые и простые модели процесса резания, которые допускали бы аналитическое решение обратной задачи — определение условий обработки по заданному предельному значению силы.

Угол сдвига имеет особую важность в моделях сил резания, а за-

деформации, вызывающие возвратные перемещения деформированного материала после снятия нагрузки. Поэтому рассмотрена двумерная задача упругой релаксации обработанной поверхности после прохождения режущего клина (рис. 5). Математическая постановка является второй краевой задачей тео-

дача прогнозирования величины этого угла является одной из актуальных задач теории резания. Анализ работ по физике процесса резания позволяет сделать вывод, что угол сдвига β_y (рис. 5) зависит от температурно-скоростной прочностной характеристики обрабатываемого материала $\sigma_i = f(\epsilon_i, T, \epsilon')$.

Из множества аналитических зависимостей для определения β_y наиболее ясный физический смысл имеют формулы К.А.Зворыкина и А.А.Брикса: $\beta_y = 0.5(\pi/2 + \gamma - \theta - \gamma_1)$, где $\theta = \arctg F/N$ (рис.5). Однако эти формулы содержат внутренние характеристики процесса, значения которых трудно определить, например, угол внутреннего трения.

Кинематическая деформационная модель процесса резания создала базу для аналитической модели угла сдвига. Проведенный анализ позволил для угла внутреннего трения предложить зависимость:

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \arctg \frac{\sigma_t}{3G_0 \epsilon_t}, \text{ где } \sigma_t, \epsilon_t \text{ берут с диаграммы деформирования.}$$

Окончательно формула для условного угла сдвига примет вид:

$$\beta_y = \frac{\gamma}{2} - \frac{\theta}{2} + \arctg \frac{\sigma_t}{3G_0 \epsilon_t} \quad (1)$$

При отсутствии диаграммы деформирования для обобщенных характеристик $\sigma_i - \epsilon_i$, можно взять диаграмму растяжения (сжатия) $\sigma - \epsilon$, тогда вместо величины $3G_0$ берется модуль Юнга E . В этом случае формула примет вид: $\beta_y = \frac{\gamma}{2} - \frac{\theta}{2} + \arctg \frac{\sigma_t}{E_0 \epsilon_t}$. (2)

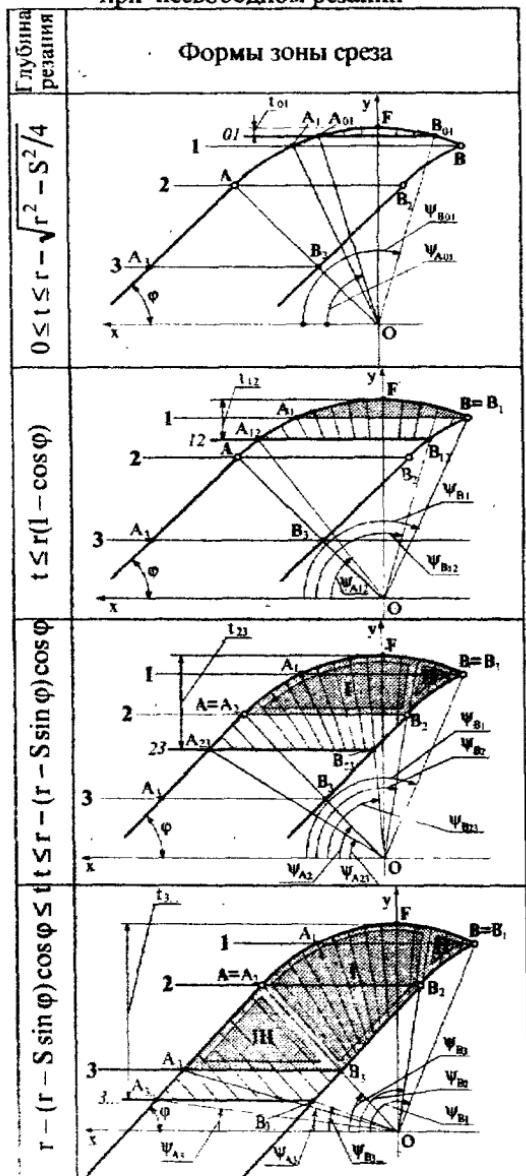
Анализ процесса резания с помощью кинематической деформационной модели показал, что из существующих геометрических моделей сил резания наиболее полно учитывает особенности процесса резания (развитую зону пластически деформированного материала перед режущим клином, силовое контактное взаимодействие задней грани и обработанной поверхности) аналитическая зависимость С.Н.Корчака:

$$P_Y = \left(\frac{\sqrt{3.25 \sin \beta}}{\sin \beta_1} S + 0.5 I_3 \right) \frac{t \sigma_i (\epsilon_i; \epsilon'_i; u)}{\sqrt{3}}.$$

Дополнив ее зависимостью (1) для угла сдвига β_y и формулой Н.Г.Абуладзе для угла действия θ , мы исключим внутренние параметры и получим рабочую модель для процесса свободного ортогонального резания, использующую только известные параметры обработки.

Однако в реальных условиях токарной обработки часто используются другие схемы резания: несвободное, косоугольное. Поэтому необходимо модель развить на эти более сложные схемы резания. При этом необходимо учитывать механику стружкообразования на криволинейном и прямолинейном участках режущей кромки. Принято, что

Таблица 1.
Изменение формы зоны среза
при несвободном резании



текущее стружки на каждом элементе режущей кромки происходит по нормали к ней. Тогда процесс течения в зоне стружкообразования как на криволинейном, так и на прямолинейном участках режущей кромки можно представить как совокупность элементарных плоских схем в каждом нормальному сечении. Силы резания в этом случае могут быть рассчитаны путем векторного интегрирования по зоне среза.

При интегрировании необходимо учитывать, как изменяется форма зоны среза при изменении глубины резания t . В табл. 1 показаны стадии изменения формы зоны среза при переходе ее границы t через опорные точки B_1, A_1, A_2 режущей кромки. Анализ показал, что все четыре стадии развития зоны среза встречаются в реальных условиях токарной обработки: минимальный припуск Z_{min} при обработке стандартными резцами по ITD12 для разных диаметров попадает в зоны IV, III и II, а для ITD8 может попасть в зону I. Поэтому зависимости составляющих сил резания от глубины t , полученные век-

торным интегрированием по зоне среза имеют составной характер (рис.6), причем точки перехода одной аналитической зависимости в другую являются функциями геометрии резца (r , ϕ) и режимов (t , S) (табл.1). Такая модель в принципе не допускает преобразование в явную зависимость для режимов t , S , что нужно для задач проектирования или управления.

В этих задачах предлагаются использовать традиционные степенные зависимости для сил резания. Однако параметры в этих зависимостях сделаны расчетными, для чего на базе метода наименьших квадратов и экспоненциальной весовой функции разработан метод аппроксимации на интервале с размытыми границами. В табл. 2 приведены примеры расчета параметров степенных функций, фоном выделены общезвестные значения.

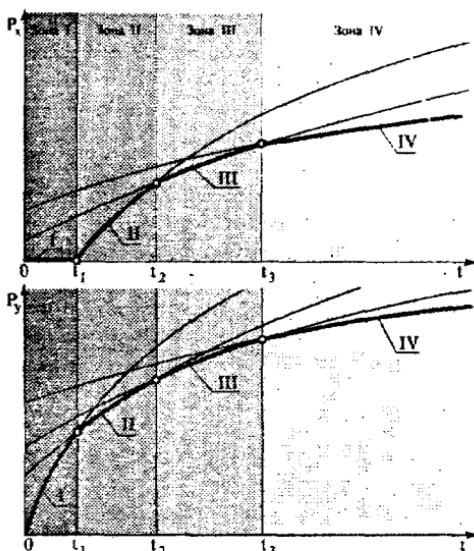


Рис. 6. Составной характер зависимостей для составляющих сил резания

Таблица 2.

Расчетные значения параметров степенных зависимостей для сил резания. Точение конструкционной стали ($\sigma_b = 750$ МПа)

Геометрия резца				P_y				P_x			
t , мм	λ°	γ°	ϕ°	C_{py}	x_{py}	y_{py}	z_{py}	C_{px}	x_{px}	y_{px}	z_{px}
Резец проходной, твердосплавный											
2	0	10	45	243	0.9	0.6	-0.3	339	1.0	0.5	-0.4
		60	187	0.95	0.65	-0.3	376	1.0	0.5	-0.4	
	0	45	340	0.9	0.6	-0.2	475	1.0	0.5	-0.3	
		5	10	45	301	0.85	0.6	-0.35	288	1.0	0.5
1	0	-15	90	200	1.0	0.75	0	793	1.0	0.6	-0.2
	-5	10	45	150	0.9	0.65	-0.15	362	1.0	0.6	-0.2
Резец проходной, быстрорежущий											
2	0	12	45	200	0.93	0.78	0	114	1.15	0.7	0
		20	45	125	0.9	0.75	0	67	1.2	0.65	0
		90	55	1.0	0.8	0	122	1.1	0.6	0	
Резец подрезной, твердосплавный											
2	0	0	45	400	1.0	0.7	-0.3	280	0.9	0.65	0
		10	45	339	1.0	0.5	-0.4	243	0.9	0.65	-0.3
		90	396	1.0	0.6	-0.3	157	0.95	0.7	-0.2	

В итоге традиционные степенные зависимости сил резания обрели новый смысл - они стали расчетными: по (1) или кинематической деформационной модели рассчитывается угол сдвига, по модели релаксации обработанной поверхности - площадка контакта на задней грани, - это параметры β и I_3 в формуле С. Н. Корчака, интегрирование этой формулы по зоне среза формирует составную модель для несвободного резания, из которой аппроксимацией на интервале с размытыми границами рассчитываются параметры приближенных степенных зависимостей, обеспечивающих задачи проектирования и управления.

3. Теория точности обработки

Одноинструментная обработка служит базой для разработки теории точности. В основу модели погрешности положен расчет упругих перемещений звеньев технологической системы. Для более простого вида разрабатываемой модели принята декомпозиция технологической системы на две подсистемы: "шпиндель-патрон-заготовка" (подсистема 0), "суппорт-державка-инструмент" (подсистема 1). Из баланса упругих перемещений подсистем технологической системы показано, что искажение выполняемого размера может быть представлено как векторная сумма перемещений взаимодействующих подсистем.

Из баланса сил, учитывая в формулах сил резания фактическую глубину резания, после решения системы уравнений получаем модель искажения выполняемых диаметральных (y) и линейных (x) размеров:

$$y = C_{Py} t^{x_{Py}} S^{y_{Py}} / j_{yo}, \quad x = C_{Px} t^{x_{Px}} S^{y_{Px}} / j_{xo}, \quad (3)$$

где j_{oi} - суммарная жесткость подсистем 0 и 1: $1/j_{oi} = 1/j_o + 1/j_1$.

Эти выражения позволяют рассчитать настроечный размер. Более актуальной характеристикой точности размера является величина поля рассеяния. По Б.С.Балакшину эта характеристика определяется как интервал рассеяния упругих перемещений в направлении выполняемого размера. В качестве основных факторов, формирующих разброс упругих перемещений приняты: колебания припуска под обработку $t \in [t - \Delta t/2; t + \Delta t/2]$, нестабильность механических свойств обрабатываемого материала (допуск на твердость в партии заготовок) $C_\phi \in C_h [1 - v/2; 1 + v/2]$, разброс жесткостей различных станков одной модели (допуск по нормам жесткости) $j_\phi \in j_h [1 - \Delta j/2; 1 + \Delta j/2]$.

Рассматривая y_{max} и y_{min} , после ряда преобразований сформирована модель поля рассеяния для диаметрального размера:

$$\Delta y \approx \frac{C_{Py} t^{x_{Py}-1} S^{y_{Py}}}{j_{yo}} [\omega t + x_{Py} \Delta t], \quad (4)$$

где $\omega = \Delta j + v$ суммарная нестабильность свойств технологической системы. Аналогична модель поля рассеяния для линейного размера:

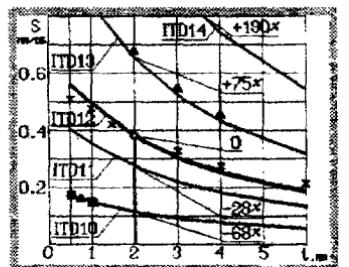
$$\Delta x = \frac{C_{Px} t^{x_{Px}-1} S^{y_{Px}}}{j_{x_0 l}} [\omega t + x_{Px} \Delta t]. \quad (5)$$

Эти модели позволяют рассчитать величину погрешности выполненного размера. Однако более актуальна обратная задача: назначить максимально допустимые режимы обработки, обеспечивающие заданную точность размеров. Принимая в качестве основного параметра управления подачу S , сформирована модель управления:

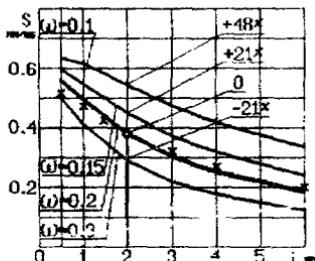
$$S = \left\{ \frac{j_{y_0 l}}{C_{Py} t^{x_{Py}-1}} \cdot \frac{\Delta y}{(\omega t + x_{Py} \Delta t)} \right\}^{\frac{1}{y_{Py}}}. \quad (6)$$

Здесь Δy – допустимая величина поля рассеяния, т.е. требуемая точность обработки, Δt – характеризует погрешность заготовки.

Рис. 7 показывает, как разработанная модель учитывает влияние различных технологических факторов на предельную подачу.



а) базовый вариант



б) влияние нестабильности технологической системы
для ИТД12, ИТZ12



Рис. 7. Влияние технологических факторов на предельную подачу по точности диаметрального размера. Базовый вариант: материал заготовки Сталь 45, резец проходной Р6М5 $\phi=60^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $r=2$ мм, квалитет заготовки ITZ12, нестабильность технологической системы $\omega=0.2$; в остальных вариантах указаны изменения

Адекватность и работоспособность моделей точности позволяет применять их для расчета режимов резания, ввести поправочные коэффициенты по степени уточнения (рис. 7 б) и по жесткости станков (рис. 7 в), а также распространять их на многоинструментную обработку.

Многоинструментная обработка для упорядочения классифицирована по 5 уровням: способу закрепления, количеству и видам суппортов, типам и расположению инструментов (табл.3).

Таблица 3.

Иллюстрированный определитель. Часть 3 (фрагменты)

Элементарные двухсуппортные наладки

Инструмент на продоль- ном суппорте	Инструмент на поперечном суппорте		
	Подрезной резец	Фасочный резец	Канавочный резец
Проходной резец			
Фасочный резец			
Канавочный резец			

Классификация включает 34 односуппортных наладки на поперечном суппорте, 152 - на продольном, 106 двухсуппортных наладок.

Односуппортная многоинструментная обработка является расширением одноинструментной – на инструментов на одном суппорте. Модели погрешности в этом случае получаются из зависимостей (3, 4, 5) путем перехода к сумме сил. Для диаметральных размеров модель поля

$$\text{рассеяния примет вид: } \Delta y = \frac{C_{Py} S^{y_{Py}}}{j_{yo1}} \left(\omega \sum_i t_i^{x_{Py}} + x_{Py_i} \sum_i t_i^{x_{Py}-1} \Delta t_i \right). \quad (7)$$

Аналогично получается модель управления:

$$S = \left\{ \frac{j_{yo1}}{C_{Py}} \cdot \frac{\Delta y}{\omega \sum_i t_i^{x_{Py}} + x_{Py_i} \sum_i t_i^{x_{Py}-1} \Delta t_i} \right\}^{\frac{1}{y_{Py}}} \quad (8)$$

Эта модель наряду с погрешностью заготовки и требуемой точностью размеров учитывает количество и характеристики режущих инструментов, а также схему распределения припуска по инструментам.

Двухсуппортная многоинструментная обработка имеет принципиальное усложнение – здесь необходима декомпозиция на 3 подсистемы: традиционная подсистема 0, “продольный суппорт-державка-инструмент”, “поперечный суппорт-державка-инструмент” (подсистемы 1, 2).

Из баланса упругих перемещений выделенных подсистем по аналогии с одноинструментной обработкой получены модели искажений выполняемых размеров: диаметральных, формируемых с продольного

$$\text{суппорта } y_{1\Sigma} = C_{p_{y_1}} t_1^{x_{p_{y_1}}} S_1^{y_{p_{y_1}}} / j_{yo1} - C_{p_{y_2}} t_2^{x_{p_{y_2}}} S_2^{y_{p_{y_2}}} / j_{yo}; \quad (9)$$

линейных, формируемых с поперечного суппорта

$$x_{2\Sigma} = C_{p_{x_2}} t_2^{x_{p_{x_2}}} S_2^{y_{p_{x_2}}} / j_{xo2} + C_{p_{x_1}} t_1^{x_{p_{x_1}}} S_1^{y_{p_{x_1}}} / j_{xo}. \quad (10)$$

Для полей рассеяния необходимы предельные значения искажений размеров, например, y_{\max} и y_{\min} . Поскольку выражение (9) для искажения диаметрального размера содержит два слагаемых, характеризующих соответственно влияние продольного и поперечного суппортов, возможны три варианта расположения поля рассеяния. (рис.8).

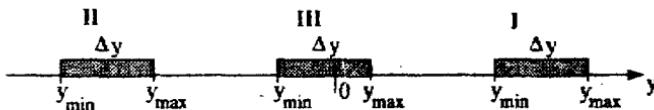


Рис. 8. Варианты расположения поля рассеяния

Вариант I характеризуется преобладающим влиянием продольного суппорта, вариант II – преобладающим влиянием поперечного суппорта, вариант III соответствует сбалансированному влиянию продольного и поперечного суппортов.

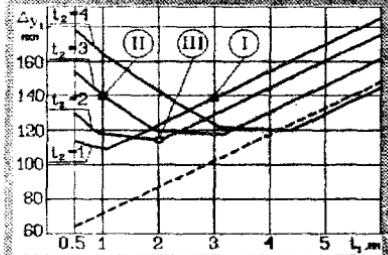
Поступая по аналогии с одноинструментной обработкой и учитывая симметрию вариантов I и II (рис.8), получено окончательное выражение для величины поля рассеяния диаметрального размера, формируемого с продольного суппорта (11):

$$\Delta y_1 = \begin{cases} A_{y_1} x_{p_{y_1}} S_1^{y_{p_{y_1}}} \Delta t_1 + B_{yo} x_{p_{y_2}} S_2^{y_{p_{y_2}}} \Delta t_2 + \omega |A_{y_1} S_1^{y_{p_{y_1}}} t_1 - B_{yo} S_2^{y_{p_{y_2}}} t_2|, \\ \text{если} \\ |A_{y_1} S_1^{y_{p_{y_1}}} t_1 - B_{yo} S_2^{y_{p_{y_2}}} t_2| \geq \frac{1}{2} \left(A_{y_1} S_1^{y_{p_{y_1}}} x_{p_{y_1}} \Delta t_1 + B_{yo} S_2^{y_{p_{y_2}}} x_{p_{y_2}} \Delta t_2 \right); \\ \text{если и наоборот} \\ \left(A_{y_1} x_{p_{y_1}} S_1^{y_{p_{y_1}}} \Delta t_1 + B_{yo} x_{p_{y_2}} S_2^{y_{p_{y_2}}} \Delta t_2 \right) \left(1 + \frac{\omega}{2} \right). \end{cases}$$

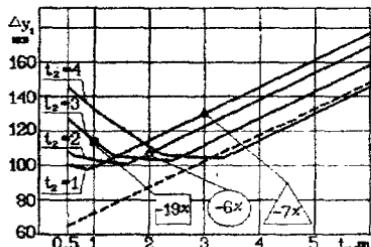
Для наладок с односторонним расположением инструментов 1(1)×2(1) по классификатору (табл.3) модель полей рассеяния линейных размеров, выполняемых с поперечного суппорта примет вид (12):

$$\Delta x_2 = A_{x_0} x_{px_1} S_1^{y_{px_1}} \Delta t_1 + B_{x_2} x_{px_2} S_2^{y_{px_2}} \Delta t_2 + \omega \left(A_{x_0} S_1^{y_{px_1}} t_1 + B_{x_2} S_2^{y_{px_2}} t_2 \right).$$

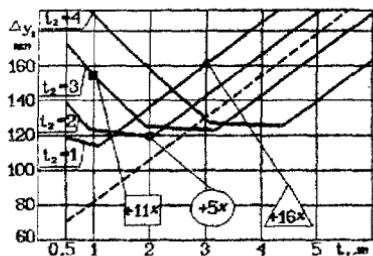
Работоспособность моделей точности двухсуппортной многоинструментной обработки иллюстрирует рис.9.



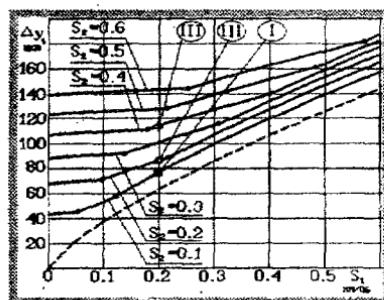
а) базовый вариант



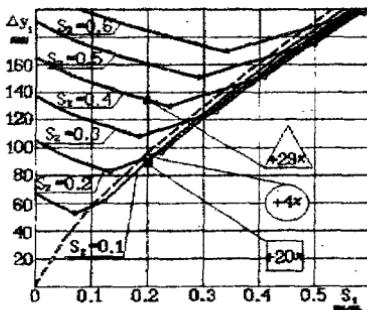
б) $S_2 = 0.2$



в) $\omega = 0.3$



г) $t_1 = 2 \text{ мм}, t_2 = 2 \text{ мм}$



д) $\omega = 0.3, t_1 = 3 \text{ мм}, t_2 = 3 \text{ мм}$

Рис.9. Влияние технологических факторов на величину поля рассеяния диаметрального размера, выполняемого с продольного суппорта. Базовый вариант: точность заготовки – ITZ₁₂, ITZ₁₂. Продольный суппорт – резец проходной, $S_1 = 0.3 \text{ мм/об}$. Поперечный суппорт – резец подрезной, $S_2 = 0.3 \text{ мм/об}$. Нестабильность $\omega = 0.2$. В других вариантах указаны изменения. Штриховая линия – работа только продольного суппорта

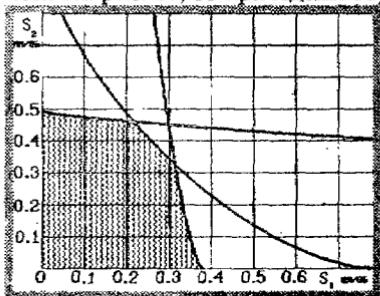
При варьировании технологическими факторами происходит перераспределение сил в технологической системе в результате чего поле рассеяния может смещаться в любое из трех возможных положений (рис. 8), а соответствующая ему точка на графике полей переходить с убывающей ветви II на сбалансированную III или возрастающую I. Рис. 9 показывает, что многоинструментная двухсуппортная обработка может дать погрешность меньшую, чем одноинструментная (в варианте (к) на 32%). При управлении подачами можно значительно уменьшить или увеличить погрешность: в пределах -20%; +53%. Таким образом, подачи суппортов при двухсуппортной обработке являются эффективным инструментом управления.

Модель управления в этом случае примет вид (13):

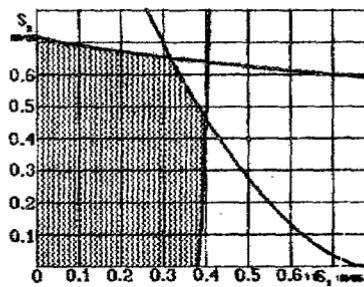
$$\Delta y_1 \geq \begin{cases} A_{y1} x_{py1} S_1^{ypy1} \Delta t_1 + B_{yo} x_{py2} S_2^{ypy2} \Delta t_2 + \omega |A_{y1} S_1^{ypy1} t_1 - B_{yo} S_2^{ypy2} t_2|, \\ \text{если} \\ |A_{y1} S_1^{ypy1} t_1 - B_{yo} S_2^{ypy2} t_2| \geq \frac{1}{2} (A_{y1} S_1^{ypy1} x_{py1} \Delta t_1 + B_{yo} S_2^{ypy2} x_{py2} \Delta t_2); \\ \text{если} \quad \text{на обрат} \\ \left(A_{y1} x_{py1} S_1^{ypy1} \Delta t_1 + B_{yo} x_{py2} S_2^{ypy2} \Delta t_2 \right) \left(1 + \frac{\omega}{2} \right). \end{cases}$$

$$\Delta x_2 \geq A_{xo} x_{px1} S_1^{ypy1} \Delta t_1 + B_{x2} x_{px2} S_2^{ypy2} \Delta t_2 + \omega (A_{xo} S_1^{ypy1} t_1 + B_{x2} S_2^{ypy2} t_2).$$

В отличие от предыдущих случаев, здесь два параметра управления: подачи продольного S_1 и поперечного S_2 суппортов. Область подач, допустимых по точности обработки, в этом случае будет двухмерной. На рис. 10, 11 приведены варианты областей допустимых подач.

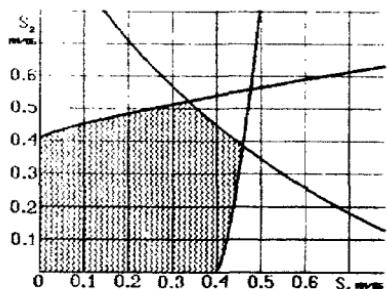


а) базовый вариант



б) ITZ₂₁₀

Рис. 10. Области допустимых подач по точности диаметрального размера, выполняемого с продольного суппорта. Базовый вариант: по условиям рис. 9. В других вариантах указаны изменения



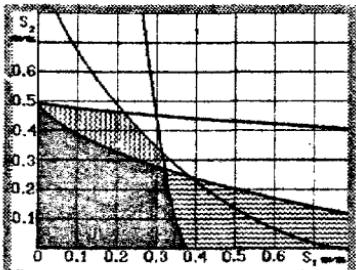
в) ITZ₁₄, ITZ₂₄, $\omega=0.3$
 $t_1=4$ мм, $t_2=4$ мм, ITD₁₄

Рис. 10. (продолжение)

Координатные подачи (пересечение границ области с координатными осями S_1 , S_2) соответствуют предельным подачам при одноинструментной обработке. Их значения (рис. 10, 11) совпадают с соответствующими значениями для одноинструментной обработки (рис. 7).

Из рис.10 следует, что варьируя исходными данными, в частности погрешностями заготовки, глубинами резания, геометрией инструментов, можно управлять формой области и приводить ее к самому выгодному виду – возрастание по S_1 и S_2 , который позволит в наибольшей мере использовать возможности многоинструментности.

Реально в многоинструментной наладке выполняются одновременно несколько размеров, поэтому область допустимых подач должна учитывать все ограничения по точности, т.е. необходимо произвести наложение областей от отдельных ограничений (рис.12).



а) базовый вариант

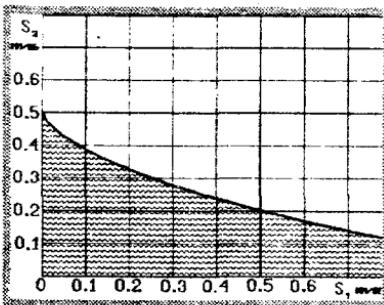
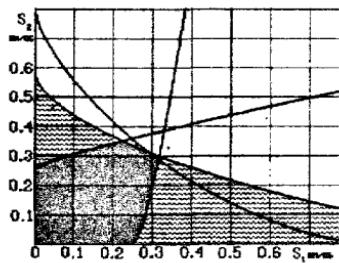


Рис. 11. Область допустимых подач по точности линейного размера, выполняемого с поперечного суппорта (условия рис.10)



б) $t_1=4$ мм, $t_2=4$ мм, ITL13

Рис. 12. Наложение областей допустимых подач при одновременном обеспечении требований по точности диаметрального размера, выполняемого с продольного суппорта, и линейного размера, выполняемого с поперечного суппорта при двухсуппортной обработке. Базовый вариант по рис. 9. В других вариантах указаны изменения

Анализ большого количества заводских наладок показал, что весьма часты случаи, когда области по отдельным ограничениям являются вложенными и итоговая область формируется одним ограничением. Таковым ограничением (можно назвать его лимитирующим), как правило, является точность диаметрального размера. Для таких типичных наладок предложена упрощенная коррекция подач по структуре двухсуппортной наладки: в специально разработанных нормативных картах коррекции подач задаются координаты вершины области допустимых подач; по этой точке и координатным (одноинструментным) подачам можно построить приближенную область допустимых подач. Эта схема положена в основу впервые разработанного нормативного раздела коррекции подач по структуре многоинструментной наладки, включенного в новый нормативный справочник по режимам резания на токарных автоматах [9, 10].

Наличие областей допустимых подач, т.е. многовариантность, создает предпосылки для оптимизационной постановки задачи определения подач при многоинструментной обработке.

4. Оптимизация многоинструментной токарной обработки

Оптимизация многоинструментной обработки является многопараметрической задачей. Она решена с использованием декомпозиции - разбиения на ряд простых, слабо связанных между собой задач – оптимизация длин рабочих ходов, оптимизация подач и т.д. – и последовательности критерии оптимальности для отдельных составляющих задач. Главное назначение многоинструментной обработки состоит в повышении производительности, поэтому ключевым критерием оптимальности является основное время.

Условие оптимальности: $\tau_0 = L_{px}/nS \Rightarrow \min$. Для многоинструментной (k – номер инструмента) многосуппортной (j – номер суппорта) многошпиндельной (i – номер рабочей позиции) обработки условие оптимальности примет вид:

$$\tau_0 = \max_{ijk} \{ \tau_{0,ijk} \} = \max_{ijk} \{ L_{px,ijk} / n_{ijk} S_{ijk} \} \Rightarrow \min . \quad (14)$$

Кроме силового взаимовлияния инструментов (6, 8, 13), надо учесть их организационное взаимовлияние: единая длина рабочего хода для инструментов одного суппорта – $L_{ijk} = L_{Cij} = \max_{K(j)} \{ L_{ijk} \}$; единная подача для инструментов одного суппорта – $S_{ijk} = S_{Cij} = \min_{K(j)} \{ S_{ijk} \}$; единая (для ТМГА) частота вращения шпинделей – $n_{ijk} = n = \min_{ijk} \{ n_{ijk} \}$.

Эти соотношения формируют алгоритм поэтапной оптимизации многоинструментной односуппортной обработки.

Для двухсуппортной одношпиндельной обработки на первом этапе определяются длины рабочих ходов суппортов L_1, L_2 , на втором этапе –координатные подачи суппортов S_1, S_2 (подачи для односуппортной обработки). Силовое взаимовлияние инструментов определяет область допустимых подач (13). Поэтому следующий этап состоит в отыскании оптимальной точки этой области, т.е. допустимых подач S_1 и S_2 , обеспечивающих минимум основного времени (рис. 13).

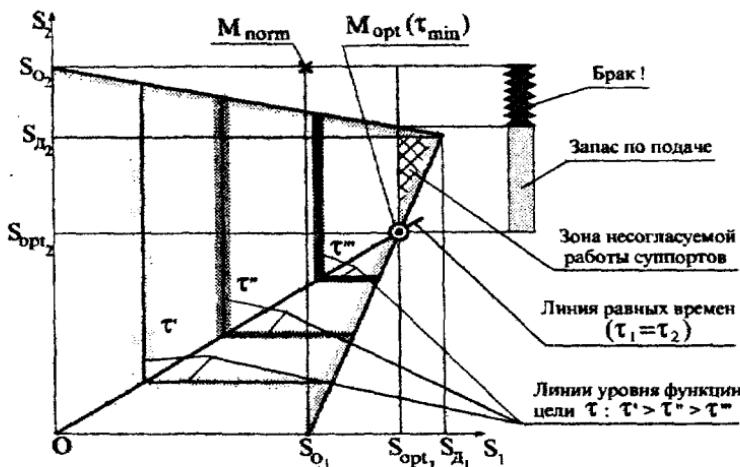


Рис. 13. Схема оптимизации подач при двухсупортной одношпиндельной обработке

Основное время при двухсупортной обработке определяется самым медленным переходом, поэтому линии уровня функции цели (14) образуются двумя координатными линиями. На вертикальном отрезке время определяется продольным суппортом, на горизонтальном – лимитирующим является поперечный суппорт. В точке перехода времени работы суппортов равны. Эта точка с позиций качества является наилучшей, т.к. в других точках один из суппортов заканчивает работу раньше, в этот миг происходит скачкообразное перераспределение сил в технологической системе и на поверхности, где еще продолжается обработка, появляется "риска". Поэтому оптимальные подачи находятся на линии равных времен: $L_1/S_1 = L_2/S_2 \Rightarrow S_2 = S_1 L_2/L_1$. (15)

В зоне несогласуемой работы суппортов можно увеличить производительность, но нельзя обеспечить равенство времен работы суппортов. В оптимальной точке есть запас по подаче поперечного суппорта, которым можно воспользоваться, если допускаются "риски" на обработанной поверхности. Здесь также выявляется возможный брак, закладываемый при проектировании без учета многоинструментности.

При многошпиндельной обработке единый продольный суппорт обуславливает единство продольных подач на всех позициях. Поэтому схему оптимизации нужно дополнить согласованием режимов по рабочим позициям (рис. 14).

Сначала производится оптимизация подач для каждой отдельно взятой позиции — подачи (S_1^I, S_2^I) , (S_1^{II}, S_2^{II}) , (S_1^{III}, S_2^{III}) , (S_1^{IV}, S_2^{IV}) на рис. 14. Эти подачи не учитывают организационное взаимовлияние позиций, однако создают базу для такого учета, выявляя лимитирующую позицию. Здесь — это позиция III. Она определяет единую подачу продольного суппорта S_{lopt} . Оптимальные подачи поперечных суппортов на каждой позиции S_{2opt}^I , S_{2opt}^{II} , S_{2opt}^{III} , S_{2opt}^{IV} определяются пересечением линий равных времен с координатной линией S_{lopt} . По старой нормативной методике лимитирует позиция IV.

Назначение подач по старым методикам, даже после согласования подач на позициях по единому продольному суппорту (точки \times рис. 14), не гарантирует попадание в область допустимых подач, т.е. допускает брак по точности размеров (позиции II и IV). Выравнивание времен суппортов на каждой позиции (точки \diamond), обеспечивает попадание в область допустимых подач, однако в этом случае найденные подачи далеки от предельных, и лишь предложенная методика использует резервы производительности многоинструментной обработки. Эта схема дала теоретическое

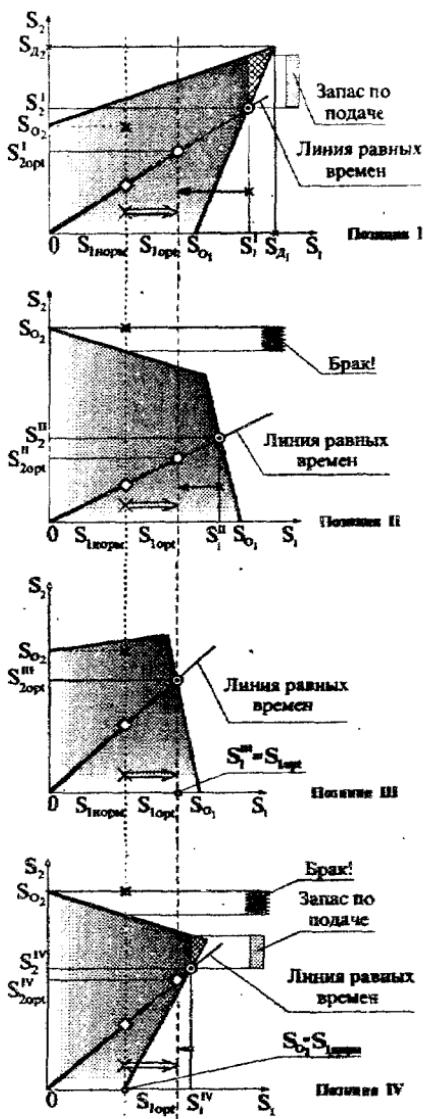
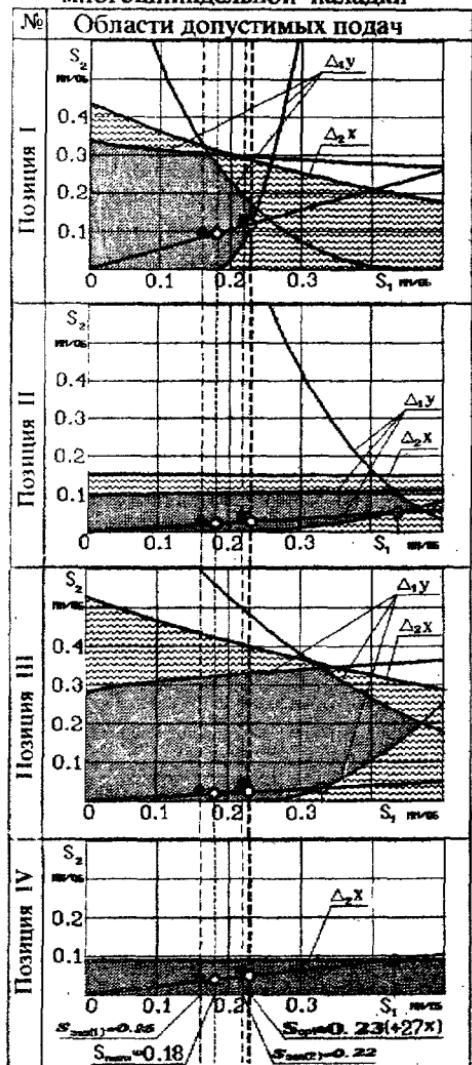


Рис. 14. Схема оптимизации подач при двухсуппортной многошпиндельной обработке

Таблица 4.
Оптимизация
многошпиндельной наладки



объяснение и обоснование того факта, что в реально работающих наладках ни одна подача не совпадает с нормативной. Как следует из рис. 14, координатные подачи (по нормативным картам именно они назначаются) и не должны совпадать с оптимальными. Совпадение может быть лишь на лимитирующей позиции

Сравнение режимов: заводских, нормативных (расчетанных по старой методике) и оптимальных (табл. 4) показало, что уровень режимов в заводских наладках часто ниже нормативного (завод 1), но на заводах с высокой культурой производства приближается к оптимальному (завод 2).

Разработанные оптимизационные схемы (рис.13, 14) производят параметрическую оптимизацию, которая увеличивает производительность в среднем на 14% (в табл.4 на 27%). Выявление при этом лимитирующей позиции создает предпосылки для структурной оптимизации, эффективность которой достигает 52% .

Эти схемы оптимизации составили базу расчетной методики проектирования оптимальных токарно-автоматических операций, которая положена в основу новых Общемашиностроительных нормативов режимов резания на токарно-

револьверных и многошпиндельных горизонтальных автоматах [9, 10]. на токарно-револьверных и многошпиндельных горизонтальных полуавтоматах и автоматах продольного точения (справочник находится в издании), а также методического и алгоритмического обеспечения САПР операций, выполняемых на ТМГА (ППП "Топаз") [20].

5. Методология технологически ориентированного нормативного справочника

Практические рекомендации в технологии представляются в виде нормативов: режимов резания, времсни и т.д. Для нормативных карт в справочниках используются таблицы, которые классифицируются в теории информационных технологий как таблицы решений. Эти таблицы с увеличением количества учитываемых факторов более 2–3 они сильно разрастаются и становятся настолько громоздкими, что возникают проблемы и с их чтением, и изданием. Поэтому в нормативах общепринятой является следующая схема—основная карта определяет базовое значение нормируемого параметра, например, подачи; эта карта дополняется набором таблиц поправочных коэффициентов на измененные условия; искомое значение нормируемого параметра определяется перемножением базового значения на все поправочные коэффициенты. Анализ реальных нормативных карт показал, что для всех их характерна большая неравномерность по точности определения искомого параметра, в зависимости от места в таблице, где находится определяемый параметр, погрешность находится в пределах 0...33% по горизонтали и 0...60% по вертикали.

Таблица 5.
Заполнение
по старой методике

Диаметр D, мм	Подача S, мм/об	Погрешность
6	0.065	
8	0.1	53.8%
10	0.13	30%
12	0.15	15.4%
16	0.18	20%
20	0.21	16.7%
24	0.24	14.3%
28	0.26	8.3%
32	0.28	7.7%
36	0.30	7.1%
40	0.32	6.3%

Таблица 6.
Заполнение
по новой методике

Диаметр D, мм	Подача S, мм/об	Погрешность
6	0.065	10%
6.5	0.073	10%
7	0.081	10%
7.5	0.09	10%
8	0.1	10%
8.75	0.11	10%
9.5	0.121	10%
10.5	0.133	10%
12	0.146	10%
14	0.160	10%
16	0.176	10%
18	0.194	10%
21	0.214	10%
24	0.235	10%
28	0.256	10%
33	0.284	10%
38.5	0.312	10%
45	0.334	10%

Для обеспечения гарантированной равномерной точности по всему полю таблиц предложено использовать **равноточные ряды** нормируемых параметров: $a_{\pm n} = a_0(1 \pm q)^n$, при $q = 0.05$ имеем 5%-ный ряд, при $q = 0.1$ – 10%-ный ряд.

Заполнять таблицу предлагается в обратном порядке: на диапазон значений нормируемого (искомого) параметра, который описывается в таблице, накладывается равноточный ряд его значений—для каждого значения искомого параметра определяется соответствующее ему значение исходного параметра, которое и заносится в шапку таблицы. В табл. 5, 6 приведен пример такого преобразования таблицы.

Для уменьшения количества поправочных коэффициентов в нормативных картах надо обеспечить возможность учета большего количества факторов в таблицах, которые формируют нормативную карту. Применение равноточных рядов создает для этого предпосылки. Например, поправочные коэффициенты обеспечивают пропорциональное увеличение всех табличных значений на одну величину (в процентах). При использовании равноточных рядов этот результат можно обеспечить простым сдвигом ряда вправо или влево на нужное количество позиций. Так при использовании 5%-ного ряда сдвиг влево на три позиции эквивалентен коэффициенту 1.15, сдвиг вправо на одну позицию равносителен коэффициенту 0.95 и т.д. Табл. 7 представляет собой таблицу-номограмму, объединяющую два поправочных коэффициента.

Таблица 7.

Объединенный поправочный коэффициент (таблица-номограмма)

Квалитет детали		Квалитет заготовки											
D/L		Коэффициент K_{S2}											
1.5	0.28	0.35	0.48	0.59	0.66	0.81	0.9	1.0	1.1	1.21	1.46	1.61	1.77
1.0	0.25	0.31	0.43	0.53	0.59	0.73	0.81	0.9	1.0	1.1	1.33	1.46	1.61
0.6	0.23	0.28	0.39	0.48	0.53	0.66	0.73	0.81	0.9	1.0	1.21	1.33	1.46
0.43	0.21	0.25	0.35	0.43	0.48	0.59	0.66	0.73	0.81	0.9	1.1	1.21	1.33
0.28	0.19	0.23	0.31	0.39	0.43	0.53	0.59	0.66	0.73	0.81	1.0	1.1	1.21
0.10	0.17	0.21	0.28	0.35	0.39	0.48	0.53	0.59	0.66	0.73	0.9	1.0	1.1

В итоге, предложена иерархия нормативных таблиц:

первый уровень: основная нормативная карта, которая учитывает главные факторы, причем некоторые по умолчанию;

второй уровень: основной поправочный коэффициент - по наладке (погрешность заготовки, точность детали, ее вылет);

третий уровень: дополнительный поправочный коэффициент - по измененной твердости обрабатываемого материала.

Третий уровень нормативных рекомендаций используется лишь в случае нестандартной ситуации. Второй уровень тоже иногда может быть опущен, например, при жестких деталях и грубых, неточных работах. Первый уровень - основной. Наличие такой иерархии нормативных таблиц помимо сокращения трудоемкости способствует еще и повышению точности нормирования.

Рассматривая в качестве основного объекта нормирования технологический переход, разработан классификатор технологических переходов, составляющий основу нормативного справочника нового по-

коления, обеспечивающего заданную точность нормирования и сокращающего трудоемкость нормирования до 50 %.

Разработанный в итоге технологически ориентированный нормативный справочник равномерной точности утвержден Экспертно-методическим Советом ЦБНТ в 1992 году и принят к изданию.

6. Разработка САПР

Главным фактором качества САПР является ее методическое обеспечение – методы проектирования, положенные в основу проектирующих алгоритмов. Однако не менее важными, с точки зрения эффективности САПР, являются и чисто системные вопросы, относящиеся к теории и практике разработки САПР. Переход к промышленной эксплуатации САПР выдвигает новые, дополнительные требования.

САПР, предназначенная для широкого внедрения, должна обеспечивать возможность проектирования любого технологического перехода, который может встретиться на предприятии. Попытка создания всеобъемлющей САПР приводит к увеличению объемов системы, излишней ее громоздкости, т.к. большая часть переходов на конкретном предприятии оказывается невостребованной, причем невостребованными на разных предприятиях оказываются разные переходы. Таким образом, необходимо обеспечить возможность адаптации САПР по основным единицам проектирования, по проектирующим алгоритмам. Для обеспечения адаптируемости САПР по основным единицам проектирования предложено изменить принципы построения ее алгоритмического обеспечения. Предлагается в качестве идентификатора технологического перехода вместо традиционного кода-трассы использовать командную строку.

Командная строка – это последовательность номеров или меток алгоритмов, по которым надо вести проектирование данного перехода. На рис. 15 представлена структура командной строки для описания перехода на токарно-автоматной операции.

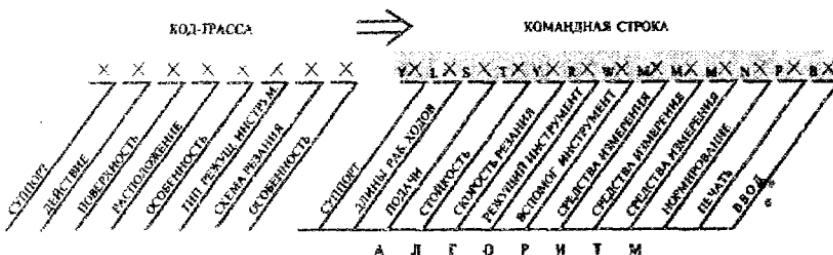


Рис. 15. Преобразование кода-трассы в командную строку

Код-трасса описывает, что обрабатывать и чем, но не содержит никакой информации, как проектировать это переход. Все правила проектирования этого перехода заносятся в проектирующие алгоритмы и представляют собой их суть. **Командная строка**, наоборот, указывает правила, по которым надо проектировать этот переход. Командная строка является объективной характеристикой перехода, она не зависит от того, каким путем по уровням классификации мы приходим к переходу.

Внедрение САПР на разных предприятиях показало большое разнообразие в организации технологического проектирования. На производстве реальна схема, когда одну операцию проектируют несколько проектировщиков, причем каждый решает свою часть проектных задач. Поэтому для широкой внедряемости САПР необходимо обеспечить **многопользовательский режим более высокого уровня** – работу нескольких пользователей с одной задачей и одним набором исходных данных с согласованием результатов работы всех пользователей. Для этого предлагается два уровня алгоритмов в алгоритмическом обеспечении САПР: локальные алгоритмы, каждый из которых решает отдельную, маленькую задачу; резидентный алгоритм, управляющий процессом обращения к локальным алгоритмам.

Для работы резидентного алгоритма предлагается создать **единое поле данных**, которое представляет собой набор строк, предназначенных для хранения информации о переходах. Стока содержат ряд зон, каждая из которых предназначена для записи и хранения определенной информации: адреса перехода, командных строк, параметров переходов – размеры, шероховатости и т.д. Затем следуют зоны, куда записываются результаты отработки проектирующих алгоритмов. Работа всех проектирующих алгоритмов организуется через это поле данных. Каждый локальный проектирующий алгоритм берет нужную информацию из соответствующей строки поля данных, результаты отработки алгоритма заносятся в предусмотренное заранее место этой же строки поля данных (в соответствующую зону).

Таким образом, резидентный алгоритм абсолютно инвариантен относительно состава основных единиц проектирования – технологических переходов. Это позволяет удалять ненужные переходы, вносить новые переходы. Итак, замена кодов на командные строки и использование инвариантного резидентного алгоритма на едином поле данных обеспечивают адаптируемость САПР по основным единицам проектирования, т.е по проектирующим алгоритмам.

Благодаря введенному единому полю данных, оказалось возможным построить функциональную схему так, чтобы обеспечить **многопользовательскую работу с одной задачей (наладкой)**. Причем работать пользователи (технологи, нормировщики) могут в любой последовательности, – важно, чтобы к моменту их работы в поле данных уже была нужная для них информация.

Лингвистическое обеспечение несет большую функциональную нагрузку, определяя удобство работы с системой. Основную трудность в лингвистике интерактивной САПР токарно-автоматных операций, где на вход подается такой сложный объект, как структура многоинструментной наладки, составляет необходимость видеть на экране монитора всю наладку сразу. Перевод классификатора технологических переходов на командные строки позволил ввести неалгоритмический идентификатор перехода - имя, который имеет только лингвистическое назначение. Краткость этого реквизита позволила предложить панорамный ввод структуры наладки. При панорамном вводе вводится фактически двумерная таблица имен переходов. Столбцы таблицы соответствуют рабочим позициям многошпиндельного автомата, строки - суппортам.

Для уменьшения количества вводимых данных без сокращения количества учитываемых факторов предложены алгоритмы умолчаний, которые по заданным значениям первичных параметров определяют наиболее вероятное значение соответственных вторичных параметров. Ввод вторичных параметров проводится в режиме коррекции. Также предложено распределять исходные данные по функциональной схеме и запрашивать на каждом этапе минимальное количество данных, необходимых для отработки данного этапа.

Итогом этих исследований является САПР токарно-автоматных операций нового поколения (ППП "Топаз 3.1"), которая прошла опытную эксплуатацию в проектных организациях и получила положительное заключение Экспертно-методического Совета ЦБНТ.

Общие выводы и результаты работы

1. В соответствии с проведенной классификацией разработан комплекс аналитических моделей точности обработки для основных классов многоинструментных наладок:

односуппортные многоинструментные наладки;
двухсуппортные одношпиндельные наладки.

Комплекс включает модели искажения выполняемых размеров и модели полей рассеяния размеров при обработке партии заготовок на участке станков.

Расчеты, проведенные с помощью разработанных моделей, и практика их использования показали, что:

двухсуппортная наладка позволяет обеспечить точность выше, чем при одноинструментной обработке;

при двухсуппортной обработке существует зона сбалансированности наладки, в которой погрешность достигает минимального значения.

2. На базе разработанных моделей полей рассеяния создан комплекс моделей управления многоинструментной обработкой. Приме-

нительно к условиям многоинструментной односуппортной обработки показано существенное значение количества инструментов в наладке, а также схемы распределения припуска (штучная заготовка, заготовка-пруток). Для двухсуппортной одношпиндельной обработки модель управления является двухпараметрической и определяет область допустимых подач. Выявлены четыре типовые формы области допустимых подач, в том числе предпочтительные с точки зрения повышения производительности.

3. Проведенное на базе декомпозиции решение минимаксной оптимизационной задачи позволило разработать схемы оптимизации подач для основных видов многоинструментной обработки - односуппортной и двухсуппортной, которые позволили расчетным путем определить лимитирующую позицию, выявить направление совершенствования наладки.

Разработанные схемы при параметрической оптимизации обеспечивают повышение производительности на 14 - 30% , а за счет структурной оптимизации - до 52% .

4. Применительно к задачам теории точности разработан комплекс математических моделей сил резания:

кинематическая деформационная модель процесса свободного прямоугольного резания, позволяющая на основании температурно-скоростной прочностной характеристики обрабатываемого материала расчетным путем установить закономерности деформирования и разрушения обрабатываемого материала в зоне резания в зависимости от перемещения режущего клина (распространение зон упругого и пластического деформирования, зоны разрушения, величину площадки контакта на задней грани);

аналитическая модель, позволяющая рассчитать положение условной плоскости сдвига (угол сдвига) в зависимости от условий резания и свойств обрабатываемого материала;

для несвободного, косоугольного резания разработан комплекс макромоделей (геометрических) составляющих сил резания, учитывающих их зависимость от геометрии резца и параметров режимов резания, показан их составной характер;

для использования аналитических зависимостей сил резания в задачах управления процессом обработки разработан метод аппроксимации их простейшими степенными зависимостями на интервале с размытыми границами.

5. Разработана методология построения технологически ориентированного нормативного справочника с равномерной точностью по всему полю нормативных таблиц и минимальным количеством (не более двух) поправочных коэффициентов, который гарантирует заданную точность нормирования и обеспечивает снижение трудоемкости нормирования.

6. Разработан комплекс нормативных справочников для многоинструментных токарных работ, впервые учитывающих исходную погрешность заготовки, точность выполняемых размеров, структуру многоинструментной наладки (5 справочников).

7. Разработан новый метод построения алгоритмического обеспечения САПР (на базе командных строк для основных единиц проектирования – технологических переходов), обеспечивающий инвариантность алгоритмического обеспечения относительно основных единиц проектирования. Это позволяет производить адаптацию САПР не только по базам данных, но и по проектирующим алгоритмам.

Предложенное единое поле данных позволило сформировать функциональную схему САПР, которая обеспечивает одновременную работу нескольких пользователей с одной наладкой.

Разработанный panoramicный ввод исходных данных позволяет видеть на экране сразу всю многоинструментную многошпиндельную многошпиндельную наладку, что в дополнении с аппаратом умощений и использованием комплексов данных составило лингвистическое обеспечение нового уровня, существенно увеличившее удобство и скорость работы с САПР.

8. Разработан комплекс пакетов прикладных программ для проектирования операций, выполняемых на токарных многошпиндельных горизонтальных автоматах (ППП Топаз, 5 версий), принятых к эксплуатации на 17 заводах и включенных в ОФАП.

9. Результаты работы нашли широкое применение в учебном процессе: подготовлены три типовые учебные программы по курсу "САПР технологических процессов", написан и издан учебник для вузов по этому курсу для специальности "Технология машиностроения".

Разработан компьютерный учебник "САПР технологических процессов", прошедший регистрацию в ОФАП НИИ ВШ.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Корчак С.Н., Кошин А.А., Ракович А.Г. и др. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 1988. - 352 с.

2. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, нормы износа и расхода инструментов для горизонтальных токарных прутковых автоматов / С.Н.Корчак, А.А.Кошин, И.А.Шаламова и др.- М.: НИИМаш. 1983. - 89 с.

3. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания на токарно-автоматные работы / А.А.Кошин, Е.Ю.Ефимов, Морозов И.А. и др. - Ч.1. - ЦБНТ. - М.: Экономика, 1989. - 284с.

4. Кошин А.А., Ефимов Е.Ю., Крестинин Е.И. Пакет прикладных программ ТОПАЗ: Свид. N60 ОФАП САПР-Т и АСУТП. - М., 1986.

5. Общемашиностроительная система автоматизированного нормирования в едином цикле с проектированием станочных операций / С.Н.Корчак, А.А.Кошин, Буторин Г.И. и др.- Ч. 1-2.- М.: Экономика, 1990.- 250 с.

6. Общемашиностроительные нормативы времени на операции, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с применением автоматизированной системы технического нормирования / С.Н.Корчак, Г.И.Буторин, А.А.Кошин и др. Ч.1- М.: НИИтруда.- 1985.- 207 с.

7. Организация технологического проектирования. ГОСТ 22770-77 / С.Н.Корчак, Г.И.Буторин, А.А.Кошин и др. - М.: Изд-во стандартов, 1978. - 14 с.

8. Кошин А.А. Принцип физического моделирования технологических ограничений при автоматизированном проектировании оптимальных технологических процессов // Автоматизация технологического проектирования в системе повышения эффективности производства и качества продукции: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Владивосток: ДВПИ, 1979. - С. 16-19.

9. Кошин А.А. Возможности повышения точности обработки фасонных поверхностей на двухступортных токарных станках с ЧПУ // Автоматизация программирования и организация участков станков с ЧПУ: Тез. докл. - Челябинск: ЧПИ, 1982. - С.16-19.

10. Кошин А.А. Теоретические основы автоматизированного проектирования автоматных операций при повышенных технологических требованиях // Автоматизация проектирования автоматных операций: Тез. докл. - Челябинск: ЧПИ, 1984. - С.33-35.

11. Кошин А.А. Расчетное проектирование оптимальных токарных автоматных операций // Автоматизированное проектирование токарных автоматных операций. - Челябинск: ЧПИ, 1987.- С.14-16.

12. Кошин А.А. САПР токарно-автоматных операций // САПР и надежность автоматизированного производства в машиностроении: Сб. науч. тр. - Владивосток: ДВПИ, 1990. - С.17-18.

13. Кошин А.А. Основы моделирования деформаций при многоинструментной токарно-автоматной обработке // Механика и технология машиностроения (методы расчета с использованием аппарата механики сплошных сред): Сб. науч. тр.-Свердловск: УПИ, 1990.- С.92-97.

14. Кошин А.А. О взаимосвязи аналитических и эмпирических моделей сил резания // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1996. - С.41-46.

15. Аканович В.А., Буторин Г.И., Кошин А.А. и др. Прямое измерение интегральных характеристик высокоскоростного прерывистого резания // Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропротекающих процессов: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - М., 1975.- С.53.

16. Горанский Г.К., Ткаченко Л.С., Кочуров В.А., Корчак С.Н.,

Буторин Г.И., Кошин А.А. Основы разработки автоматизированных систем технологической подготовки производства в машиностроении. - Ч.1-4: Учебное пособие. - Челябинск: ЧПИ, 1977.

17. Буторин Г.И., Кошин А.А., Старец А.С. Проектирование технологических процессов с помощью ЭВМ. - Ч.1-2. - 1980. - 139с.

18. Кошин А.А., Шаламова И.А. Влияние податливости элементов системы СПИД на точность обработки // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. ЧПИ. - Челябинск, 1980. - N249. - С.29-31.

19. Кошин А.А., Вендер И.И. Оптимизация операций токарной обработки деталей с прерывистыми поверхностями и сложной конфигурацией // Депонированные рукописи. - N2. - НИИМАШ. - М., 1981. - С.75. - Деп. в ВИНИТИ, N93-80.

20. Корчак С.Н., Кошин А.А. Разработка автоматизированной системы выбора режущего инструмента и расчета режимов резания на основе технологически ориентированной алгоритмической СУБД. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - 164 с.

21. Кошин А.А., Ефимов Е.Ю. Теоретическое определение составляющих сил резания при токарной автоматной обработке // Автоматизированное проектирование токарных автоматных операций: ДСП. - Челябинск, 1987.- С. 40-45.

22. Корчак С.Н., Кошин А.А. Разработка методологии автоматизированного расчетного проектирования оптимальных технологических процессов механической обработки. - Челябинск.: ЧПИ, 1988.-89 с.

23. Корчак С.Н., Кошин А.А., Ефимов Е.Ю. Разработка программно-методического комплекса проектирования автоматных операций для интегрированной САПР отрасли.- Челябинск: ЧПИ, 1988.-51с.

24. Кошин А.А., Фадюшин О.С. Инstrumentальная система поддержки двухэтапной технологии САПР технологического назначения // САПР и надежность автоматизированного производства в машиностроении: Сб. науч. тр. - Владивосток: ДВПИ, 1990. - С. 92-94.

25. Корчак С.Н., Кошин А.А., Фадюшин О.С., Переверзев П.П. и др. Пакет прикладных программ НОРМА: Свидетельство N301 ОФАП САПР-Т и АСУТП.-М, 1990.

26. Кошин А.А., Муравьев А.А. Определение условного угла сдвига в условиях плоского стружкообразования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - С.24-31.

27. Кошин А.А., Муравьев А.А. Расчет площадки контакта на задней грани режущего клина // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - С.18-24.

28. Кошин А.А., Муравьев А.А. Расчет упругопластического деформирования и разрушения обрабатываемого материала в зоне резания // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - С.12-18.

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 21.04.97 Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,86. Уч.-изд. л. 2.
Тираж 100 экз. Заказ 131/173.

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