

114.46.564
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ХАИРАЕВ Ибрагим Шайкулович

УДК 621.9:06

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
СТАНКА ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

05.03.01 - Процессы механической и физико-химической
обработки; станки и инструмент

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1989 г.

Работа выполнена в московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техническом Университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент
ДМИТРИЕВ Б.М.

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор
АМАЛЦЕВИЧ В.В.

— кандидат технических наук
АВДЕЕВ В.Б.

Ведущая организация — Московский завод координатно —
расточных станков

Защита диссертации состоится "25" декабря 1989 г. на заседании специализированного Совета К 055.15.15. в Московском Государственном техническом Университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.Баумана.

Ваш отзыв и
печать, проси

Авторефер

МЧ 96564

Подп. к печ.
Л-18959

100 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Повышение надежности машин, улучшение их качества на основе автоматизации технологических процессов является одним из главных направлений в ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве. Это требует создания и применения металлорежущих станков с числовым программным управлением типа "обрабатывающий центр" с полным циклом автоматизации обработки и высокими технологическими возможностями.

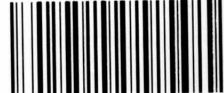
В связи с этим усложняется конструкция и возрастает степень автоматизации станков с целью увеличения производительности, с расширением технологических возможностей и интенсивности выполняемых работ. Постоянно повышаются требования к точности обрабатываемых деталей для повышения надежности и качества создаваемых машин. В этой противоречивой тенденции развития приходится разрабатывать новые методы для повышения точности выпускаемых станков. В решениях XXVII съезда КПСС отмечено: "...Повысить технический уровень и качество продукции в машиностроении, ...обеспечить опережающий выпуск металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", ...существенно расширить выпуск станков высокой и особо высокой точности".

Точность обработки на станках зависит от многих факторов, приводящих к изменению заданного относительного положения инструмента и заготовки. Основной причиной образования погрешностей обработки является относительное смещение инструмента и заготовки при силовых воздействиях.

Существующие методы исследования сопротивляемости станка, при действии силовых возмущений основываются главным образом на оценке упругих свойств конструкции, не учитывают силы сопротивления, возникающие в конструкции в процессе обработки. Они не позволяют оценить часть погрешности, вносимой станком и каждым формообразующим узлом на отклонение размера, формы и расположения. Соответственно, методы повышения точности станка при действии силовых возмущений, базирующиеся на существующих методах исследования, не обеспечивают дальнейшего повышения точности станка.

В связи с этим, актуальность работы определяется разработкой метода оценки и повышения точности станка при действии силовых возмущений, с учетом процессов, сопровождающих процесс обработки (кинетический момент шпинделя, гидродинамические подъемные силы

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1496564

Хамраев И.Ш. Исследование и



в стыках направляющих) и влияние этих процессов на образование погрешности станка.

Целью работы является разработка метода исследования влияния названных процессов на возникновение сил сопротивления в процессе обработки и повышение точности станка по параметрам отклонения размера, формы и расположения.

Методы исследований. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы. Применялись методы теории упругости, теории колебания деформируемых систем, физики твердого тела, теории надежности, сопротивления материалов, методы технических измерений, численные методы математического анализа, а также методы, разработанные в данной работе: метод анализа формирования сопротивляемости станка при действии силовых возмущений, методы получения информации о влиянии изучаемых процессов на точность. Эксперименты проведены с применением современной измерительной аппаратуры, а также специально созданных устройств.

Научная новизна. Разработан метод исследования и установления функциональной зависимости формирования отклонения размера, формы и расположения при действии на станок силовых возмущений, возникающих в процессе обработки.

Практическая ценность. Использование полученных результатов исследования дает возможность повысить точность обработки за счет конструктивных изменений по отклонениям размера на 10-15%, отклонению формы и расположения до 50% относительно исходного состояния станка по параметрам изучаемых процессов, оценить долю погрешности, вносимой станком и каждым его формообразующим узлом по отклонению размера, формы и расположения при исследовательских испытаниях, определить оптимальную область применения с точки зрения его точностных возможностей.

Реализация результатов работы. Практические рекомендации по оценке и повышению точности станка при действии силовых возмущений приняты к внедрению в Научно-исследовательском институте технологии машиностроения. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 27500 рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных семинарах кафедры "Металлорежущие станки" МГТУ им. Н.Э.Баумана (1985-88 гг.). Полностью работа доложена на заседании вышеуказанной кафедры в 1989 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано две печатные работы и одно авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 144 наименований и приложений. Содержит 133 страницы основного текста, 62 рисунка, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена тенденция развития и проблемы точности машиностроения, установлена необходимость в повышении требований точности по отклонению размера и, особенно, отклонению формы и расположения. Проведен анализ существующих методов оценки и повышения точности станков при действии силовых возмущений и их область применения. Обоснована необходимость разработки метода повышения точности станка, выбрано направление работы, выбран объект исследования. Сформулированы цель и задачи исследования.

В технической литературе имеется значительное количество работ, посвященных методам исследования и повышения точности станков при действии силовых возмущений. К работам, где уделено внимание влиянию силовых воздействий на точность, относятся исследования К.В.Вотинсова, Ю.Н.Соколовского, В.А.Скратана, Д.Н.Решетова, З.М.Левина, А.М.Дальского, В.Н.Подураева, А.С.Проникова, П.М.Чернянского, Г.Опитца и др. В настоящее время задачами исследования силовых возмущений на точность станка занимаются: ЭНИИМС, МГТУ, Станкин, ЛПИ, Токийский институт точной механики, Мюнхенский университет, Дрезденский технический университет и др.

Существующие методы, главным образом, направлены на исследование упругих свойств конструкции, хотя приведенный обзор литературных источников в таких областях науки, как: теория упругости, теория колебания деформируемых систем, физика твердого тела и др. показали, что при работе сложных систем возникают физические процессы, порождающие силы сопротивления, существенно изменяющие свойства конструкции по сравнению со статическим состоянием.

Существующие методы исследования в станкостроении не в полной мере оценивают долю погрешности, вносимой станком и его каж-

для формообразующим узлом на отклонение размера, формы и расположения в процессе обработки деталей.

В настоящее время существует необходимость разработки метода исследования и повышения точности станка, не снижая его других показателей. Такие методы могут быть разработаны при исследованиях протекающих физических процессов, формирующих силы сопротивления в различных формообразующих узлах.

Задачи исследования могут быть решены расчетным и экспериментальными методами. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Расчетные методы имеют ограниченную точность из-за сильного разброса исходных данных, упрощений в моделях. В работе использован расчетно-экспериментальный метод.

На основании проведенного анализа при реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи: Разработать математическую модель формирования точности станка, обосновать параметры точности, изменяющиеся при действии силовых возмущений; разработать методику экспериментальных исследований; разработать методы и средства измерения деформаций для исследования сопротивляемости станка при действии силовых возмущений; проверить степень адекватности выбранной модели исследования и реального процесса формирования точности обработки; разработать практические методы повышения точности станка при действии силовых возмущений.

В качестве объекта исследования выбран многоцелевой станок СМП-250 фрезерно-расточной группы, отличающейся высокой степенью автоматизации.

Вторая глава посвящена разработке методических положений, необходимых при проведении работы, включающих: разработку математической модели формирования точности станка, исходя из анализа кинематики формообразования и анализа формирования силовых возмущений; установление взаимосвязи параметров траектории формообразования и точности обработки, выбор параметров траектории формообразования, изменяющихся при действии силовых возмущений; разработку методики экспериментального исследования влияния процесса вращения шпинделя и процесса движения головки по направляющим скольжения на точность обработки.

На данном станке, определяющей по точности является расточка отверстий. В силу этого в работе рассматривается вопрос формирования точности при расточных операциях.

В случае растачивания кинематическая схема резания основана

на двух движениях, вращательном и прямолинейном, осуществляемым соответственно шпинделем и шпиндельной головкой. Результирующая траектория является винтовой линией. В силу этого в качестве объекта наблюдения за выходными параметрами станка целесообразно принять параметры траектории винтовой линии. В процессе обработки деталей на станках возникают погрешности, искажающие траекторию винтовой линии. Общий вид уравнения возмущенного движения в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\begin{cases} X = [x_0 + (\Delta x_0 + \Delta x_0(t)) + (\Delta x_{0z} + \Delta x_{0z}(t))] + \\ \quad + [R + (\Delta R + \Delta R(t))] \cos(\omega t + \varphi_0) \\ Y = [y_0 + (\Delta y_0 + \Delta y_0(t)) + (\Delta y_{0z} + \Delta y_{0z}(t))] + \\ \quad + [R + (\Delta R + \Delta R(t))] \sin(\omega t + \varphi_0) \\ Z = [z_0 + (\Delta z_0 + \Delta z_0(t))] + S t \end{cases} \quad (I)$$

где: X, Y, Z – текущие координаты; x_0, y_0, z_0 – начало отсчета; $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$ – изменение положения отсчета до начала резания; $\Delta x_0(t), \Delta y_0(t), \Delta z_0(t)$ – отклонение положения начала отсчета в процессе резания; $\Delta x_{0z}, \Delta y_{0z}$ – изменение положения оси до начала резания; $\Delta x_{0z}(t), \Delta y_{0z}(t)$ – отклонение положения оси в процессе резания; R – требуемый радиус траектории; ΔR – отклонение радиуса до обработки; $\Delta R(t)$ – отклонение радиуса при обработке; S – скорость поступательного движения режущей кромки вдоль оси Z ; ω – частота вращения шпинделя; φ_0 – угол начала обработки относительно координат; t – время обработки одной поверхности.

На основании ГОСТ 24642-81 определена взаимосвязь между параметрами винтовой линии и параметрами точности обработки.

Силовые возмущения приводят к искажению следующих параметров винтовой линии: $\Delta R(t), \Delta z_0(t), \Delta y_0(t)$, в свою очередь, отклонение размера Δ_d по диаметру, Δ_{sz} вдоль оси Z , формы Δ_f и расположения Δ_p зависят от:

$$\Delta_d = f(\Delta R(t)), \Delta_{sz} = f(\Delta z_0(t)), \Delta_f = f(\Delta R(t)), \Delta_p = f(\Delta y_0(t)) \quad (2)$$

Для установления зависимостей между выбранными параметрами винтовой линии и действующими процессами требуется проанализировать протекающие физические процессы, формирующие силы сопротивления.

Если на станок в неработающем состоянии действует внешнее возмущение, то силовые смещения зависят от силы трения в стыках и силы упругости материала. В процессе обработки силовая картина

приобретает сложный характер, так как возникают дополнительные силы сопротивления. Анализ силовой картины показывает, что при действии на шпиндель возмущения, в виде силы резания P_x , возникает сила $F_{w.o}$ от опрокидывающего момента $M_{w.o}$, из-за дисбаланса массы. Возникают силы $F_{w.r}$ от гироскопического момента

M_r , который зависит от прецессии. В свою очередь, прецессия складывается из двух факторов податливости шпинделя и податливости опор. К этим силам присоединяются силы внутреннего трения

$F_{w.t}$ в шпинделе и его упругости $F_{u.r}$. Тогда результирующая сила $P_{z.w}$, действующая на шпиндель и его опоры, зависит от:

$$P_{z.w} = f(P_x, F_{w.o}, F_{w.r}, F_{w.t}, F_{u.r}) \quad (3)$$

Неуравновешенная часть силы $P_{z.w}$ со стороны шпинделя действует на шпиндельную головку. В головке образуются силы сопротивления, зависящие от внутреннего трения материала $F_{r.g}$, и силы упругости корпуса $F_{r.r}$. Тогда результирующая сила $P_{z.r}$, действующая на шпиндельную головку, зависит от:

$$P_{z.r} = f(P_{z.w}, F_{r.g}, F_{r.r}) \quad (4)$$

Неуравновешенная часть силы $P_{z.r}$ со стороны головки воспринимается направляющими головки и частично приводной частью (винтовой пары). Сила со стороны головки передается через направляющие на станину. Уравновешивание этой силы осуществляется направляющими головки. В вертикальной плоскости при действии силы резания вверх по оси Z неуравновешенные силы воспринимаются прижимными планками при действии вниз-горизонтальными плоскостями и V -образной направляющей. При действии силы в горизонтальной плоскости сила воспринимается только V -образной направляющей. Силы сопротивления в данном случае зависят от упругих свойств материала направляющих $F_{n.r}$ и сил $F_{n.m}$, зависящих от свойств масляного слоя в направляющих.

При движении головки по направляющим возникает гидродинамическая подъемная сила $F_{n.s}$. Она зависит от коэффициента вязкости масла μ , скорости скольжения S , длины и ширины направляющих и т.д. Всплывание приводит к уменьшению силы трения в направляющих $F_{n.s}$, что приводит к изменению величины деформаций в горизонтальной плоскости. Тогда результирующая сила $P_{z.n}$, действующая на стык, зависит от:

$$P_{z.n} = f(P_{z.r}, F_{n.r}, F_{n.m}, F_{n.s}, F_{m.s}) \quad (5)$$

Анализ силовой картины показывает, что величина внешнего возмущения в зоне резания остается постоянной, но результирующие силы, действующие и передаваемые на узлы станка, образуют сложный характер из-за возникающих сил сопротивления в конструкции. Строго говоря, речь идет не столько о силах, сколько о моментах этих сил. Действующие силы и силы противодействия, образуя сложный характер, взаимодействуя, приводят к изменению параметров точности станка.

В качестве физической модели исследования выбраны следующие формообразующие узлы: шпиндель, шпиндельная головка, стол и станнина. Такой выбор произведен на основе декомпозиции системы с учетом механизма формирования в них силы сопротивления.

Анализ механизма формирования силовой картины в процессе резания позволил наметить основные этапы проведения экспериментальных исследований:

- Определение влияния: величины, направления и точки приложения внешних силовых возмущений (сил резания) на формирование точности в статическом состоянии.

- Определение влияния силы сопротивления, вызванной изменением момента количества шпинделя, на формирование точности в процессе обработки.

- Определение влияния силы сопротивления, вызванной изменением гидродинамической подъемной силы в стыке шпиндельной головки и направляющих, на формирование точности в процессе обработки.

В работе не производилось непосредственное измерение сил, а их действие оценивалось через деформации системы, приведенные к вершине резца. Для реализации работы необходимо иметь такую измерительную систему, которая позволила бы проводить исследование сопротивляемости станка при действии силовых возмущений и удовлетворяла бы требованиям точности измерения, необходимых для получения достоверной информации о протекающих в станке процессах в момент обработки.

Третья глава посвящена разработке методов и средств измерительной системы для исследования станка, включающая в себя: методы измерения, разработку измерительных устройств и оснастки, градуировку и оценку погрешности измерения, проверку степени адекватности разработанной математической модели исследования реальному процессу формирования точности обработки.

На основе разработанной физической модели исследования и

математической модели формирования точности станка разработаны схемы измерения, которые позволяют определять свойства каждого формообразующего узла и всего станка.

Экспериментальные исследования характеризуются большим объемом информации, регистрируемой с помощью первичных преобразователей (ПП). Поэтому одним из условий проведения работы было создание автоматизированной системы для исследования сопротивляемости станка при действии силовых возмущений. В качестве ПП применены: частотомер ЦАТ-3М для измерения скорости круговых движений; динамометр УДМ-100 для измерения сил резания; БИИ-ИИ.05 для измерения осевых деформаций. Для измерения радиальных деформаций спроектировано и изготовлено пневматическое устройство для измерения линейных перемещений (авторское свидетельство № 1515158). Разработаны алгоритм и программа расчета динамических характеристик на машине ЕС 1022. Экспериментальным путем проверены его выходные характеристики.

Спроектирована и изготовлена оснастка для измерительной системы, базирующейся на математической модели исследования.

Оценка погрешностей измерения показала, что измерительная система обеспечивает измерение исследуемых параметров со следующими погрешностями от диапазона измерения: круговых движений $\pm 1,8\%$, силы резания $\pm 2,5\%$, силовые смещения $\pm 1,4\%$.

Проведена проверка адекватности разработанной математической модели исследования реальному процессу обработки. Расхождение между расчетно-экспериментальными значениями и параметрами обработанных деталей, измеренных на приборе "TOLYROND-50" и "Кругломер-293", не превышает $\pm 15\%$.

В четвертой главе на основе разработанных во второй главе теоретических положений приводятся экспериментальные исследования станка СМП-250. Исследования проводились с целью объяснения механизма формирования сопротивляемости станка и установления функциональной взаимосвязи между выбранными параметрами и действующими факторами.

На первом этапе эксперименты проводились в статическом состоянии, которое принято за исходное для дальнейших исследований. Определены силовые смещения $\Delta R_{ст}$ для каждого формообразующего узла и всего станка для случая: $x_0 = 150$ мм; $y_0 = 125$ мм; $z_0 = 30, 100, 120, 170$ мм и по углу поворота шпинделя φ , через 45° .

Переходя от силовых смещений к точности обработки, для исследуемого станка установлено, что при нагружении его формообразующих узлов в статическом состоянии в диапазоне сил $P_x = 10-100$ Н изменения отклонения размера составляют $\Delta_d = 5,7 - 58$ мкм; отклонение размера вдоль оси $\Delta_{\sigma_2} = 0,4-4,5$ мкм; отклонение формы от круглости $\Delta_{\varphi_k} = 0,3-3$ мкм; отклонение формы в продольном направлении $\Delta_{\varphi_n} = 0,6-6,0$ мкм.

Результаты исследований показали, что основным источником формирования отклонения формы в поперечном направлении является несимметричность конструкции в силовом отношении, а отклонение формы в продольном направлении вызвано увеличением вылета шпиндельной головки.

На втором этапе эксперименты проводились с изменением момента количества движения шпинделя M_e за счет изменения частоты вращения ω и искусственным увеличением момента инерции J_z с помощью уравновешенного диска. Эксперименты показали, что с увеличением M_e за счет изменения ω от 1,05 Гц до 33,3 Гц деформации шпинделя в точке вершины резца нелинейно уменьшаются до 35%, шпиндельной головки до 60% относительно деформации в статическом состоянии. Увеличение M_e в два раза за счет диска уменьшает деформации шпинделя на 15% и шпиндельной головки на 10% по сравнению с исходным состоянием (Рис. I а).

Уменьшение деформаций шпинделя с увеличением M_e связано с тем, что под действием силы резания шпиндель совершает круговые колебания Ω , причем изогнутая ось вращается со скоростью ω в ту же сторону, в которую вращается сам шпиндель и возникает круговая синхронная прецессия ($\omega = \Omega$). В этом случае возникает гироскопический момент $M_{\omega.r}$, направленный в сторону уменьшения угла разворота шпинделя, и стремится вернуть ось шпинделя в первоначальное положение.

Уменьшение деформаций шпиндельной головки с увеличением M_e вызвано тем, что при увеличении M_e возникающий $M_{\omega.r}$ на опорах шпинделя порождает силы сопротивления, направленные в противоположную сторону действующей силы резания, и результирующие силы, передаваемые на шпиндельную головку и ее направляющие, будут уменьшаться, соответственно будут уменьшаться и ее деформации. Нелинейность зависимости $\Delta R(t)$ от изменения M_e связано с конструктивной особенностью шпиндельного узла, как тела с одной степенью свободы, установленного на податливых опорах и с распределенной массой по длине.

Степень влияния M_e на силовое смещение $\Delta R_w(t)$ шпинделя и $\Delta R_r(t)$ головки характеризуется нелинейными коэффициентами:

$$K_w = f(M_e), \quad K_r = f(M_e)$$

Уменьшение силовых смещений $\Delta R_w(t)$ шпинделя и $\Delta R_r(t)$ головки при увеличении M_e приводит к уменьшению отклонения размера Δd на 35-40%, отклонения формы $\Delta \phi$ на 40-45% относительно статического состояния (Рис. I б). При этом замечено, что уменьшение $\Delta \phi$ зависит от уменьшения $\Delta R_r(t)$ шпиндельной головки.

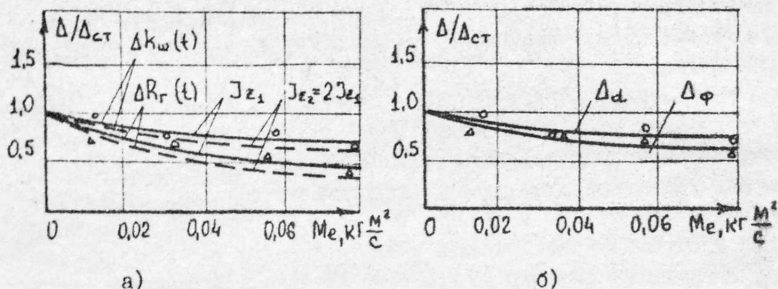


Рис. I. График зависимости $\Delta R(t)$, Δd , $\Delta \phi$ от изменения M_e

$\Delta_{ст}$ — смещение (отклонение) в статическом состоянии; Δ — смещение (отклонение) при изменении M_e ; $\Delta R_w(t)$ — смещение шпинделя; $\Delta R_r(t)$ — смещение шпиндельной головки

На третьем этапе эксперименты проводились с изменением скорости продольных подач с целью определения изменения гидродинамической подъемной силы, действующей на шпиндельную головку (S изменяли от 15 мм/мин до 500 мм/мин при $\omega = const$). С увеличением S до 500 мм/мин, шпиндельная головка относительно своих направляющих поднимается в вертикальной плоскости нелинейно до 6 мкм (Рис. 2 а). При этом с увеличением S до 250 мм/мин силовые смещения шпиндельной головки в горизонтальной плоскости интенсивно увеличиваются до 2,5 раза по сравнению со статическим состоянием, при $S = 300-350$ мм/мин, они увеличиваются до 2,7 раза, при дальнейшем увеличении S до 500 мм/мин, силовые смещения шпиндельной головки уменьшаются до 2,4 раза (Рис. 2 а).

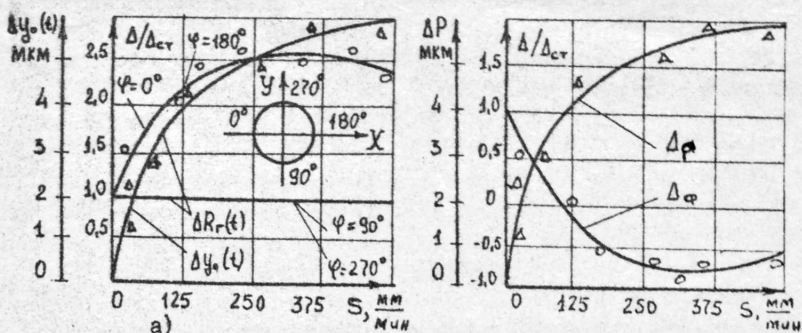


Рис. 2. График зависимости $\Delta R_r(t)$, $\Delta y_\phi(t)$, $\Delta\phi$, $\Delta\alpha$ от изменения S

$\Delta_{ст}$ — смещение в статическом состоянии;
 Δ — смещение при изменении S

Подъем головки в вертикальной плоскости при увеличении S связан с возникающим "гидродинамическим эффектом", который приводит к "всплыванию" шпиндельной головки. При этом упругие свойства винтовой пары привода головки и ограниченность зазора между головкой и ее верхними направляющими ограничивают "всплывание" шпиндельной головки в вертикальной плоскости.

Увеличение силовых смещений $\Delta R_r(t)$ в горизонтальной плоскости связано с уменьшением силы трения скольжения в нижнем стыке, вызванным увеличением толщины масляного слоя.

Уменьшение силовых смещений $\Delta R_r(t)$ при дальнейшем увеличении S связано с тем, что возникает трение между верхними направляющими головки.

Переход от силовых смещений $\Delta R_r(t)$ головки к точности обработки показал, что всплывание головки на направляющих приводит к изменению расположения оси растачиваемого отверстия в виде позиционного отклонения $\Delta\phi$ на различных подачах от 0 до 6 мкм (Рис. 2 б). Увеличение силовых смещений $\Delta R_r(t)$ в горизонтальной плоскости приводит к неравномерному их изменению. Для исследуемого станка при изменении S от 0 до 87 мм/мин соотношение $\Delta\phi/\Delta\phi_{ст}$ уменьшается и становится равным 0 при 87 мм/мин. При увеличении S до 300 мм/мин $\Delta\phi/\Delta\phi_{ст}$ пересекает нулевую линию и увеличивает ее в противоположную сторону до -0,83, при дальнейшем увеличении S до 500 мм/мин $\Delta\phi/\Delta\phi_{ст}$ изменяется до -0,5 (Рис. 2 б). Пример: Для исследуемого станка при силе резания

$P_x = 100 \text{ Н}$, с увеличением S от 0 до 87 мм/мин отклонение форм поперечного сечения Δ_{ϕ} уменьшается от 4 мкм до 0 при 87 мм/мин. При увеличении S до 300 мм/мин Δ_{ϕ} пересекает нулевую линию и изменяется в противоположном направлении до $-3,3$ мкм, при дальнейшем увеличении S до 500 мм/мин Δ_{ϕ} изменяется до $-2,0$ мкм.

Таким образом, деформации головки в горизонтальной плоскости с увеличением S в начале компенсируют влияние статической жесткости на отклонение формы до нуля, а при дальнейшем увеличении S данное явление превалирует в формировании погрешности.

Полученные зависимости входят в математическую модель, которая оценивает в численных значениях образования точности обработки и служит основой к разработке практических рекомендаций.

Пятая глава посвящена вопросам практического применения полученных результатов исследования.

Полученная математическая модель дала возможность: наметить мероприятия по повышению точности станка конструкторскими методами, без изменения других показателей точности, определить наиболее целесообразную область применения станка по точности обработки.

Предложен метод повышения точности станка за счет увеличения момента количества движения шпинделя M_e путем установки уравновешенного диска, обосновано место установки диска.

Увеличение M_e за счет увеличения момента инерции шпинделя с помощью уравновешенного диска с $2,47 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$ до $4,95 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$ дает возможность уменьшить отклонение размера и формы на 10–15%.

Известно, что в направляющих головки при сборке устанавливается зазор 5 ± 1 мкм. Из исследований видно, что при работе станка зазор выбирается в зависимости от величины подачи.

Задача заключается в том, чтобы уменьшить влияние зазора на точность без изменения его величины.

Существующая конструкция имеет геометрическую симметрию относительно оси Y (Рис.3 а) и изготовлена так, что нижняя опорная площадь в 3 раза больше, чем площадь верхних прижимных планок. Считая все другие факторы постоянными (вязкость смазки, длину направляющих, скорость скольжения и т.д.), следует, что гидродинамическая сила, поднимающая головку в зазоре в 3 раза больше, чем гидродинамическая сила, прижимающая головку. В результате

этого при изменении скорости подачи влияние оказывает весь зазор. Решить задачу можно, организовав конструкцию таким образом, чтобы гидродинамические силы уравнивали головку в зазоре. Это можно сделать различными методами, один из возможных вариантов представлен на рис. 3 б. В данной конструкции использована силовая симметрия как относительно вертикальной плоскости, так и горизонтальной плоскости.

В результате действие зазора с 5 мкм уменьшается в 2 раза до 2,5 мкм. Соответственно уменьшится в 2 раза отклонение формы и расположения по сравнению с существующим действием исследуемого процесса.

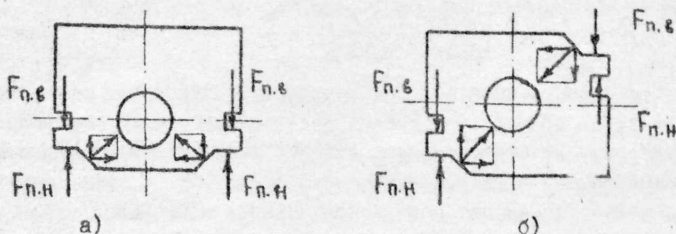


Рис. 3. Направляющие шпиндельной головки

На основе полученных результатов исследования установлено, что при увеличении длины направляющих на 30-35%, отклонение формы в продольном сечении можно уменьшить на 25-30%. Проанализированы преимущества и недостатки предложенных вариантов.

Используя материалы работы, составлена рабочая методика для оценки свойства конструкции при испытании станков по точности как дополнение к нормативным документам.

Рабочая методика разработана применительно к исследованному станку с учетом его конструктивных особенностей.

Разработанная методика учитывает: силы, возникающие в зоне резания, их величины, направления и точки приложения по траектории формообразования; силы сопротивления, возникающие в различных частях конструкции, вызванные изменениями частоты вращения шпинделя и скорости продольных подач шпиндельной головки, которые позволяют определить долю погрешности, вносимой каждым формообразующим узлом и всем станком на формирование отклонения размера, формы и расположения.

Полученные результаты исследования станка при действии силовых возмущений дали возможность решить вопросы оценки технологических возможностей станка с точки зрения отклонения размера, формы и расположения и определять наиболее целесообразную область его применения. Например: для получения минимального отклонения расположения обработку можно производить при минимальных подачах S от 5 до 25 мм/мин (Рис. 2 б). В исследуемом станке минимальное отклонение формы можно получить в диапазоне подач $S = 80-90$ мм/мин (Рис. 2 б). Уменьшение отклонения формы в поперечном направлении возможно обеспечить через увеличение частоты вращения шпинделя $\omega = 16,7-33,3 \text{ с}^{-1}$, которое позволяет повысить точность обработки по отклонению размера (Рис. I б).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили разработать методические положения, позволяющие исследовать влияние на формирование отклонения размера, формы и расположение таких явлений как гироскопический момент и гидродинамический эффект.

2. Разработанная математическая модель, основанная на анализе физических процессов, сопровождающих процесс обработки, дает возможность получить зависимости между погрешностями обработки и возникающими силовыми факторами.

3. Разработанная математическая модель процесса формирования отклонения (размера, формы и расположения) адекватна реальному процессу формирования этих показателей на станке с погрешностью не более $\pm 15\%$.

4. Математическая модель дает возможность наметить пути совершенствования станка в отношении точности конструкторскими методами, которые обеспечивают повышение точности обработки по отклонению размера на 10-15%, отклонению формы и расположения до 50% относительно исходного состояния станка по параметрам изучаемых процессов.

5. Разработанный метод исследования точности станка при действии силовых возмущений дает возможность определить целесообразную область применения станка и назначение оптимальных режимов обработки для достижения требуемой точности обработки.

6. Установлено, что при нагружении конструкции по траектории формообразования в статическом состоянии, при вылете шпиндельной головки $Z_0 = 30-170$ мм, в диапазоне сил $P_x = 10-100$ Н

станок обеспечивает: отклонение размера $\Delta d = 5,7-58$ мкм, отклонение размера вдоль оси $\Delta s_a = 0,4-4,5$ мкм, отклонение формы в поперечном сечении $\Delta \varphi_k = 0,3-3$ мкм, отклонение в продольном направлении $\Delta \varphi_n = 0,6-6,0$ мкм.

7. Для исследуемой конструкции установлено, что увеличение кинетического момента M_e шпинделя приведет к нелинейному уменьшению силовых смещений $\Delta R_{\omega}(t)$ шпинделя до 35%, $\Delta R_t(t)$ шпиндельной головки до 60%. При увеличении M_e от $2,6 \cdot 10^{-3}$ кг м²/с до $82,3 \cdot 10^{-3}$ кг м²/с отклонение размера уменьшается на 35-40%, отклонение формы на 40-45%.

8. Установлено, что возникающие гидродинамические подъемные силы в стыке, вызванные изменением скорости продольных подач шпиндельной головки приведет: к подъему головки относительно своих направляющих в вертикальной плоскости до 6 мкм, и увеличению силовых смещений $\Delta R_r(t)$ головки в горизонтальной плоскости до 2,7 раза. При этом отклонение расположения Δp будет равно величине подъема головки $\Delta y_o(t)$, отклонение формы $\Delta \varphi / \Delta \varphi_{ст}$ при изменении S от 0 до 87 мм/мин уменьшается и становится равным 0. При увеличении S до 300 мм/мин, $\Delta \varphi / \Delta \varphi_{ст}$ увеличивается в противоположную сторону до -0,83, при дальнейшем увеличении S до 500 мм/мин $\Delta \varphi / \Delta \varphi_{ст}$ изменяется до -0,5.

9. Создана измерительная система для исследования точности станка при действии силовых возмущений, включающая в себя периферийные устройства и первичные преобразователи, позволяющие определять величины силовых смещений каждого формообразующего узла и всего станка во всех точках траекторий формообразования, при исследовании конструкции в статическом состоянии и в процессе обработки.

Созданная измерительная система обеспечивает измерение исследуемых параметров с погрешностью: скорости круговых движений $\pm 1,8\%$, силы резания $\pm 2,5\%$, силовых смещений $\pm 1,4\%$ от диапазона измерения.

10. Спроектировано и изготовлено пневматическое устройство для измерения силовых смещений (авторское свидетельство №1515158). Разработан алгоритм и программа расчета динамических характеристик на машине ЕС 1022. Проведено исследование и определены выходные характеристики устройства, обеспечивающего точность измерения $\pm 0,3\%$ от диапазона измерений.

II. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанного метода повышения точности станка при действии силовых возмущений и практических рекомендаций по повышению точности обработки составляет 27500 рублей.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Хамраев И.Ш., Иванов А.Ю. Изменение свойств станка при силовых возмущениях / МВТУ им.Н.Э.Баумана. - М., 1988. - 12 с.: ил. - Библиогр. 10 назв. Деп. в ВНИИТЭМР № 432 мш - 88.

2. Дмитриев Б.М., Хамраев И.Ш. Обеспечение достоверности оценки точности станка при действии силовых возмущений / МВТУ им.Н.Э.Баумана. - М., 1988. - 25 с.: ил. - Библиогр. 18 назв. Деп. в ВНИИТЭМР, № 433 мш - 88.

