

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Э. БАУМАНА**



УДК: 621.9
На правах рукописи

Дмитриев Борис Михайлович

**Анализ причин изменения точности станка и разработка
метода стабилизации точности на принципах
саморегулирования**

Специальность:
05. 03.01. Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Диссертация на соискание доктора технических наук

Москва- 2007

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете имени Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Волчкевич Леонид Иванович

Доктор технических наук, профессор Бушуев Владимир Васильевич

Доктор технических наук, профессор Кузнецов Павел Михайлович

Ведущая организация:

Предприятие ОАО «Красный Пролетарий»

Защита состоится «30» мая 2007 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном
техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 115 005 Москва,
2-ая Бауманская улица, д.5

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим
направить по указанному адресу.

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

Тел. 267-09-63

Автореферат разослан «3» апреля 2007

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212. 141. 06

д. т. н., профессор

Михайлов В. П.

Подписано к печати

Объем 2,0 п. л.

Тираж

100 экз.

Заказ

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана

9911

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Машиностроение находится в своем развитии под постоянным давлением фундаментальной тенденции. Это постоянное требование повышения качества с постоянным требованием повышения производительности. На каждом этапе развития возникают производные сопровождающие эту тенденцию. На современном этапе это автоматизация производственных процессов, обработка труднообрабатываемых материалов, частая смена объектов производства и т.д.

До 50-х годов XX в. превалировало требование к точности размеров деталей. С 50-х годов возникают претензии к точности отклонения формы и расположения. Современный этап развития машиностроения требует не только идеальной поверхности для нанотехнологии, но и получения как заданной формы отклонения, так и ее величины (выпуклость направляющих станков и т. д.). Причем требуется не только высокая точность, но, что особенно важно, длительное ее сохранение во времени.

В технологии машиностроения существует своя объективная тенденция. Количество и качество выпускаемых изделий падает со временем эксплуатации технологического оборудования. В любой момент эксплуатации попытка увеличить производительность приводит к однозначному падению точности. На современном этапе количественное значение погрешности оценивается, как правило, линейно – угловыми показателями. Однако с геометрических позиций оценки точности трудно объяснить, почему отклонение формы в 10 мкм хуже или лучше, чем 5 мкм. Хотя обе величины в поле допуска на размер. Геометрическая интерпретация погрешности условие необходимое, но не достаточное. Достаточным можно считать, при оценке качества детали, энергетическую составляющую в объеме геометрической оценки. Для получения погрешности размера одной геометрической величины для ст. 3 и 38ХМНЮА потребуется разный объем работы. Точно так же в эксплуатации они будут вести себя по-разному. Для того, чтобы собрать

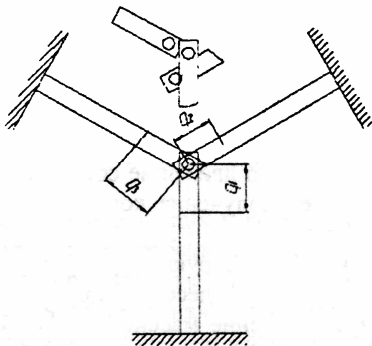


Рис. 1

НТВ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1783657

Дмитриев Б.М. Анализ причин

М Г Т У
ИМ.Н.Э. БАУМАНА
Т Е Х Н И К А

стержневую систему (рис. 1), стержни которой изготовлены с различными погрешностями, необходимо один стержень растянуть, другой сжать. После сборки система напряглась, за счёт работы на растяжение/сжатие. После того как система включилась в работу, в зависимости от направления внешней силы, проявляются свойства погрешности изготовления. Если под действием приложенной внешней силы стержень продолжает растягиваться, то это плохо, т.к. запас прочности у этого стержня ниже, чем у того, который был сжат.

Технология машиностроения разработала теорию точности для управления процессом образования погрешности размера. Теория основана на определенных положениях. Суммарная погрешность размера зависит от нескольких элементарных составляющих. Они считаются независимыми. Количественное значение элементарных составляющих оценивается в геометрических показателях. Исследование каждой из составляющих общей погрешности производят в статике, суммарная погрешность оценивается как алгебраическая сумма составляющих. Теории не нужен фактор времени эксплуатации оборудования. По существу теория точности - теория линейная. Она хорошо зарекомендовала себя при обеспечении заданного уровня погрешности размера деталей в процессе обработки. Она проста в применении как в экспериментальной, так и расчетной частях. В этой связи она нашла широкое применение и в работах станкостроителей. Они (станкостроители) используют положения теории точности при разработке конструкции станка. Однако теория точности – теория линейная, а станок система нелинейная (зазоры, термические явления и т. д.). В результате во время эксплуатации эти расхождения проявляются в виде не соответствия результатов теории и практики.

Для ликвидации таких последствий вводят диагностические системы, системы коррекции возникающих погрешностей, предсказания программы обработки и т. д. Все эти действия полезные, но по отношению к станочной системе в целом и к ее несущей системе в частности, внешние. Не зависимо от этих действий станочная система стареет и теряет свою точность.

Современное состояние в вопросах точности характеризуется тем, что требования к точности ужесточаются, переходят в область отклонения формы и расположения, т.е. в область, где основное влияние оказывает станочная система.

Практика эксплуатации станков говорит о том, что во время рабочего процесса в станке имеет место два рода движений. Одно – это движение формообразования и второе – это движение собственно конструкции станка. Первое движение определяет получение конфигурации детали, а второе – точность поверхностей детали.

Источником движения конструкции (несущей системы станка – НС) является силовая часть рабочего процесса и свойство конструкции сопротивляться этим возмущениям. Движение массива конструкции, вторичное, суммируясь с движением формообразования определяет точность обработки

внутри цикла формообразования. Данное исследование направлено на изучение свойств конструкции образовывать вторичное движение. Техническим объектом являются соединения в конструкции станка, а научным предметом являются условия возникновения и существования вторичного движения конструкции станка.

Актуальность работы состоит в том, что современные требования к точности достигают нанометрических размеров, требуется не только обеспечить точность размеров, но и отклонения формы. Дальнейшее повышение точности станка и особенно ее сохранение во времени длительной эксплуатации не может осуществляться без исследования процессов, происходящих в соединениях конструкции и ухудшающих их состояние.

Существующие возможности линейной теории точности применимы к станкам нормальной точности, но для прецизионного станкостроения эти методы применимы в ограниченных случаях. Современные требования таковы, что линейная теория уже не удовлетворяет требуемой точности и длительности ее сохранения. В этой связи требуется поиск иных подходов к решению проблемы.

Предварительные исследования, связанные с выявлением перспективных направлений по повышению точности и ее стабильности обнаружили обнадеживающие результаты в направлении исследования взаимодействия двух движений (формообразования и вторичного движения конструкции, приводящего к изменению параметров геометрической точности элементов конструкции станка в пространстве и во времени). Кроме объяснения механизма образования отклонения формы данное направления позволяет подойти к объяснению изменения точности станка во время эксплуатации.

В этой связи **целью работы** явилась разработка инструмента, с помощью которого на этапе проектирования станка создаются условия обеспечивающие получение требуемой точности станка на заданном промежутке времени эксплуатации.

Под точностью станка понимаем свойство конструкции сохранять в заданных пределах параметры геометрической точности элементов станка во время эксплуатации.

Для достижения цели требуется решить задачи:

- обосновать выбор направления исследования;
- результат этого шага формирует задачу следующего уровня: какие силы и как взаимодействуют они в конструкции при длительной эксплуатации станка;
- знание характера сил, возникающих в конструкции во время эксплуатации, определяет требования к разработке механизма преобразования их действия в процессе деградации точности станочной системы, что требует разработки механики вторичного движения конструкции станка;
- разработать метод саморегулирования свойств стыковых поверхностей с целью стабилизации сил сопротивления конструкции;

- разработать метод оценки уровня свойства станка производить детали в количественном выражении.

Объект исследования. В качестве технического объекта для достижения обозначенной цели были выбраны станочные системы построенные на основе метода формообразования – методе следов. Несущая система конструкции таких станков выполняет одновременно две противоречивые функции. Одна функция силовая. Она обеспечивает устойчивость процессу резания за счет того, что развивает силы сопротивления против внешних сил. Другая функция, функция системы управления точностью обработки. Управление точностью обеспечивается в момент формообразования за счет элементов геометрической точности станка. Опоры шпинделей, направляющие, кулачки, точные ходовые винты и другие элементы, их взаимные положения выполняют как функции точности обработки, так и силовые функции. Силы, возникающие в конструкции, приводят к тому, что геометрическая точность элементов станка изменяется в пространстве и времени. Выполнение конструкцией станка двойных функций приводит к зависимости точности станка от его производительности. Сама конструкция станка, развивая силы сопротивления, совершает работу. Это для нее не проходит бесследно. Она стареет, расходуя свою внутреннюю энергию.

Формирование детали происходит в зоне резания, т.е. в том месте где инструмент соприкасается с заготовкой. В точке касания происходит как формообразование так и образование точности обработанных поверхностей. Технологическая наука досконально исследовала все процессы, которые происходят от точки встречи инструмента и до базовых поверхностей станка под инструмент и заготовку. В данной работе рассматриваются процессы происходящие в конструкции и приводящие к движению названных баз, т.е. то, что происходит в конструкции станка.

Методы исследований. При проведении исследований использовали методы термодинамики, информатики, механики деформированного твердого тела, сопромата, теоретической механики, технологии машиностроения, теории резания и технических измерений. Исследования основаны на аксиоматическом методе, т.е. на наблюдениях и специально организованных экспериментах.

В экспериментальной части были разработаны информационно – измерительные системы, работающие в автоматизированном режиме. Аттестацию системы получали в МЦСМе, с помощью предварительно проведенных градуировок средств измерения на основе нормативных документов по поверкам.

Достоверность результатов исследований зависит от двух основных составляющих. Это методики формирования процесса получения знаний и от экспериментов, которые призваны обеспечивать исследователя количественными значениями исследуемых явлений. Методическая сторона работы основана на методе дедукции, на аксиоматическом способе. Когда методиче-

ская часть работы базируется на аксиомах, которые формируют опытным путем на основе наблюдений и специально организованных экспериментах. В этом случае, если возникает ситуация, вызывающая сомнения, то формулируют теорему. После ее доказательства данное положение является исходным для дальнейшей работы. Такое построение процедуры исследования, в определенной степени является гарантией получить по окончании работы достоверный результат.

Экспериментальная часть работы основывалась на известных методах и средствах. В тех случаях, когда стандартные приемы претерпевали изменения, то для достоверности первичные преобразователи периодически градуировались, а вторичная аппаратура подвергалась аттестации через метрологическую службу МВТУ.

Научную новизну работы определяет разработка начальных положений механики движения несущей системы станка, что обеспечивает возможность исследования процесса изменения точности станка за время длительной эксплуатации и формирует условия для разработки метода саморегулирования вторичного движения с целью стабилизации процесса изменения точности станка.

Практическая ценность:

1. Разработаны методы количественной оценки параметров сил действия и сил противодействия конструкции, возникающих во время рабочего процесса.
2. Спроектированы и изготовлены информационно-измерительные системы. Для исследования количественных значений параметров процессов ухудшающих точность станка.
3. Разработаны схемы стабилизации свойств соединений в конструкции станка, обеспечивающие стабильность сил сопротивления во время рабочего процесса.
4. Предложен и апробирован метод экспериментальной оценки параметров процесса изменения жесткости конструкции от действия термических возмущений.
5. Сформирован метод расчета процесса изменения жесткости стыков и сопряжений с учетом вторичного движения в соединениях.
6. Разработан метод построения шкалы для количественной оценки свойства станка производить детали.
7. Сформированы положения по саморегулированию параметров вторичного движения с целью стабилизации процесса изменения точности станка.

На защиту выносятся:

- обоснование выбора пути исследования станочной системы по параметрам точности в виде постановки проблемы. При постановке проблемы учитывается факт нелинейности процесса изменения точности станка в течение дли-

тельного времени эксплуатации, учитывается тот факт, что несущая конструкция движется в момент формообразования;

- метод анализа силовых взаимодействий в конструкции станка;
- разработки в виде начальных положений механики несущей системы станка, позволяющей преобразовывать возникающие силы в процесс образования погрешности станка;
- метод составления кинематических уравнений возмущенного движения формообразования;
- методика саморегулирования свойств соединений отдельных деталей с целью стабилизации сил сопротивления конструкции станка;
- метод разработки шкалы количественной оценки свойства станка производить детали.

Реализация результатов работ. Результаты исследований использованы на Ульяновском машиностроительном заводе в виде самоустанавливающегося корпуса ШВП в приводах станков с ЧПУ. На Савеловском машиностроительном заводе изготовлен стенд для набора линеек индуктосина системы обратной связи координатных перемещений станков с ЧПУ. На московском станкостроительном заводе им. С. Орджоникидзе использовалась методика при проведении испытаний станков. Материалы исследований использованы в НИИТме при разработке испытательно – диагностического центра, методы, средства испытаний станков на заводе Тантал (г. Саратов), заводе тяжелых зуборезных станков (г. Саратов), НИИТМ (г. Москва), НИАТ (г. Москва), ВНИИНМАШ (г. Москва), ВНИИМС (г. Москва).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях разного уровня: в МГТУ, МАТИ, в МДНТП, в г. Хабаровске, Н-Новгороде, в г. Костроме, Львове, Кировограде. На НТС заводах: УМЗ, Прогресс, им. Орджоникидзе. На НТС НИИ: НИИТМ, НИАТ, ВНИИМС, ВНИИНМАШ. Полное изложение содержания работы обсуждалось на заседаниях кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им Н. Э. Баумана.

Публикации. По результатам проделанной работы опубликовано 49 научных трудов; из них 3 монографии (в соавторстве), получено 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, общих выводов, списка литературы из 104 наименований и приложений. Работа содержит 199 страниц машинописного текста, 62 рисунков, 5 таблиц, 16 страниц текста приложений. Общий объем работы составляет 218 страницы сквозной нумерации.

Краткое содержание работы.

Введение. Во введении обозначена проблемная ситуация по точности станка, как части проблемы точности обработки.

В первой главе сформирована процедура выбора направления и пути для достижения цели работы. Указанные действия могут обеспечиваться разными подходами, отличающиеся объемом исследований и уверенностью в

правильности намеченного пути. В данном случае можно обосновать направление путем обзора технических публикаций, аналитическим обзором литературы, а можно через формирование технической проблемы. Данная работа основана на формировании проблемы.

Формирование проблемы, в современном понимании, представляет собой пошаговую процедуру с формирования желаемой системы знаний (ЖСЗ). На первом этапе формирования проблемы устанавливается граница и характер ЖСЗ. Границы определяются условиями движения конструкции в результате действия податливости, термических явлений, изнашивания. Считается при этом, что вопросы вибрационных движений конструкции решены. Характер ЖСЗ должен быть определен границами инженерных знаний. Для конкретизации границ производят упорядочивание основных понятий. Глубина проводимых исследований ограничивается погрешностью размеров, отклонений формы и расположения. Следующая группа действий состоит в формировании существующей системы знаний (ССЗ) внутри ЖСЗ. Это формирование производится как известное множество объектов, на которых реализуются известные отношения с фиксированными свойствами, заданными в определенных шкалах (геометрическая точность, статическая жесткость, шкалы классов точности станков и т. д.) ССЗ создавали ученые многих научных школ: МВТУ (Яхин А. Б., Кован В. М., Дальский А.М., Проников А.С., Грановский Г.И.), СТАНКИН (Балакшин Б. С., Базров Б. М., Бушуев В.В., Ачеркан Н.С., Пуш В.Э.), школа ЛПИ (Соколовский А. П., Скраган В. А.), центры на Урале и Востоке. Станкостроительные НИИ (ЭНИМС – Владзиевский, Дикушин В.И., Кудинов В.А., Вотинов К.В.) и заводы (ЗКП, МЗКРС, Свердлова, г. Иваново, Свердловска, Челябинска, Хабаровска и т. д.). Неоценимый вклад в развитие вопросов точности обработки внесли научные центры Европы, США, Японии. Следует отметить такие фамилии как Шлезингер Г., Кикебуш К., Тейлор Г., Опитц Г., Матиас Р., Енджиевски Ж., Окушима К., Сата Т., Атия М.

Система знаний содержит основополагающие моменты. Некоторые из них: управление точностью размеров основано на воздействие элементарных составляющих, исследование параметров элементарных составляющих производится в статике, время межналадочного периода не регламентировано. По существу разработанная теория точности, теория статического состояния технологической системы. Следующее действие состоит в формировании собственно проблемы. Для этого из ЖСЗ выделяют ССЗ. Проблемная ситуация представляет собой область знаний, которой необходимо дополнить ССЗ чтобы получить ЖСЗ. В этом случае становится ясно, чтобы управлять движением станочной системой с целью стабилизации ее состояния, необходимо дополнить знаниями кинематики движения конструкции и ее динамикой. А это возможно с помощью методов механики, т. е. проблема состоит в разработке механики движения конструкции станка. Для того, чтобы сформиро-

вать собственно проблему помимо лозунга требуется еще анализ путей перехода от проблемной ситуации к проблеме.

Условия движения баз станка под заготовку и инструмент состоят в том, что эти базы являются естественными элементами конструкции, которые суммируют силы сопротивления. Подобные задачи рассматривает аналитическая механика на основе принципа виртуальных перемещений (механика Гамильтона-Остроградского). В принципе виртуальных перемещений связи рассматриваются как голономные, т.е. не влияющие на скорость и ускорения объекта движения, в данном случае баз. Связи стационарные, не зависят от трения, они удерживающие. Как правило, это удерживающие, недеформируемые стержни, нерастяжимые нити и т.д. В случае с базами станка связи не голономные, не стационарные, зависят от трения (как внешнего, так и внутреннего), единственное, что они – удерживающие, но этого не достаточно для того, чтобы использовать принцип виртуальных перемещений.

В данном случае подлежат исследованию движения базы под заготовку и инструмент, условия их движения определяет станочная среда. Особенность станочной среды состоит в том, что она не сплошная т. к. в конструкции имеются ниши, нелинейности в виде зазоров. Среда гетерогенная т. к. состоит из отдельных деталей, соединенных в общую структуру. Среда анизотропная, т. е. имеет разные свойства по разным направлениям действия сил, возникающих во время рабочего процесса. Но любая механика в своих методах использует силы, которые должны быть известны как по номенклатуре, так и по количественному значению их параметров. На данный момент разработано множество различных механик. Это механика движения свободных тел. Механика сыпучих сред, движения жидкости и газа. Механика твердых и деформируемых тел и т.д. Отличие их состоит в двух аспектах: предмет движения и условия движения этого предмета. В данном случае предметом движения являются базы станка под инструмент и заготовку. Условия движения характеризуются тем, что эти базы движутся вместе с источником сил сопротивления, т.е. с несущей системой станка. Таким образом, проблема в разработке инструмента для исследования движения станочной среды состоит из двух взаимосвязанных частей: установления номенклатуры сил, определяющих формирование движения конструкции и разработке основных положений механики гетерогенной, анизотропной, не сплошной среды. Анализ механик показал, что для такого предмета движения и для такой среды аналогов не обнаружено. Наиболее близкой к условиям движения является механика грунтов, скальных пород, но предмет движения резко отличается. Наиболее близкой к предмету движения является механика твердого тела, но условия движения далеки от станочных.

Вторая глава посвящена исследованию вопроса о силах, приводящих в движение конструкцию станка и, как следствие, изменяющих точность станка в пространстве обработки и во времени эксплуатации.

Силы, приводящие в движение конструкцию, возникают в результате различия природы возникновения сил действия, внешних сил и сил противодействия, внутренних сил конструкции. Силы внешние по отношению к конструкции станка, это силы резания, силы трения, веса, инерциальные силы и т. д. Силы внутренние, силы, возникающие за счет внутренней энергии металла конструкции. Это упругость, износостойкость и т. д. Внутренние силы возникают внутри станочной конструкции и действуют в одном пространстве и в одно и тоже время. Особенность этой среды состоит в том, что она обладает сложным свойством. Сложность этого свойства состоит в том, что реакция на скорость внешнего возмущения у конструкции различна и зависит от величины скорости действующей нагрузки и имеет два порога чувствительности. Это скорость релаксации конструкции и скорость, соответствующая наступлению внутреннего резонанса. Если скорость возмущения со стороны внешних сил не превосходит скорости релаксации, то конструкция успевает сформировать силы сопротивления адекватные по основным параметрам силам внешним. Если скорость воздействия внешних сил выше скорости релаксации, то конструкция не успевает сформировать адекватное сопротивление. В конструкции возникают ускорения, которые порождают силы, суммирующиеся с внешними силами. При достижении соответствующей скорости возмущения наступает так называемый внутренний резонанс. Как правило, в станочной системе первая область до скорости релаксации нагружается со скоростью подачи. Этой области посвящена данная работа. Вторая область характеризуется областью образования погрешностей, возникающих со скоростью резания.

Для того чтобы иметь возможность оперировать с силами, необходимо иметь систему отсчета. Разные части конструкции начинают движение в разные моменты времени. В этой связи для синхронизации процессов требуется так же система отсчета. Система отсчета содержит систему координат, линейно – угловые средства для изменения параметров в. движения, хронометр для синхронизации процессов, термометр для учета действия термических возмущений. В силу того, что кроме в. движения существует движение формообразования и они существуют и проявляются совместно и одновременно, то системы отсчета обоих движений совмещают. Общим элементом совмещающим оба движения является точка касания инструмента и заготовки. Это виртуальная не материальная точка. За бесконечно малое время эта точка объединяет и заготовку и инструмент. Учитывая тот факт, что в данном случае движение ф. считаем за идеальное, необходимость исследовать точности станка переходят от точки касания к базам заготовки и инструмента. Начало координат располагаем в плоскости параллельной фланцу патрона (токарный станок) и в точке пересечения этой плоскости и оси шпинделя. Поскольку система отсчета должна быть инерционной, то плоскость с началом координат связана с землей. При исследовании в. движения заготовки исследуют движение фланца относительно инерциальной системы отсчета. Заготовку

считаем за абсолютно жесткое тело. Система отсчета, исследующая движение вершины резца расположена в плоскости параллельной основной и закреплена на суппорте. Движение суппорта считаем прямолинейным и равномерным, т. е. тоже имеем инерциальную систему отсчета. В данной плоскости располагается система отсчета со своей системой координат (рис.2). Выбрав систему отсчета, однозначно определяют изучаемое пространство и время действия. Пространство ограничено конструкцией и рабочим пространством станка. Время ограничено началом эксплуатации и предельным состоянием. Причем время работы станка выстраивается во временную размерную цепь: время обработки детали, время чистового прохода, когда формируется точность, время межналадочного периода, смены и т. д. Но начало отсчета времени - одно. Это начало эксплуатации станочной системы.

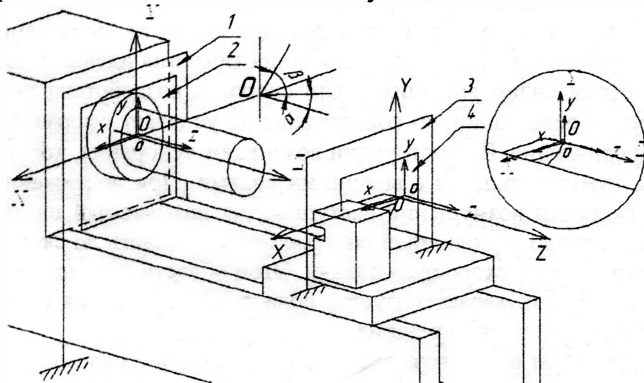


Рис. 2.

Для того чтобы сформировать номенклатуру сил внешних, используем положения термодинамики, как науки о преобразовании энергии. При изучении термодинамических систем (ТДС), необходимо выделить ТДС из среды. (По определению ТДС – это система макротел, обменивающихся энергией между составными частями и с внешней средой). Считая станок термодинамической системой, выделим его из среды. Границей раздела используем поверхность металла конструкции станка, которая развивает силы сопротивления против внешних сил. Из внешней среды на конструкцию и его несущую систему оказывают действие электромагнитная энергия, кинетическая и потенциальная. Из термодинамики известно два способа преобразования одного вида энергии в другой. Это – механическая работа и теплообразование. Поскольку все силы, действующие во время рабочего процесса распределены в пространстве, то для однозначности их оценок нужен некоторый принцип. В этом отношении воспользуемся предложением Ю. Н. Роботнова, который предложил считать в таких ситуациях за механическую силу коэффициент при перемещении в формуле механической работе. Аналогичное

предложение существует у Гиббса (1839 -1903), который предложил считать температуру термодинамической силой при физической энтропии в формуле теплоты. Конструкция за счет своих особенностей преобразует механическую силу в вибрационную составляющую, силу воздействия на конструкцию (силы резания, силы веса), на силу изнашивания действующих в сопряжениях. Термическая сила преобразуется в силу воздействующую на конструкцию и силу, обуславливающую дрейф уровня наладки ЧПУ. Таким образом, номенклатура внешних сил может быть представлена набором: механические силы – силы воздействия на конструкцию как малоцикловое нагружение, вибрационное воздействие со знакопеременным воздействием, силы изнашивания. Термические силы – действие на конструкцию как малоцикловое нагружение и воздействие на систему ЧПУ. В соответствии с законами механики действие внешних сил вызывает противодействие со стороны НС станка, причем в полном соответствии с номенклатурой действия. Для того чтобы регулировать параметры в движения несущей системы, необходимо знать причины возникновения сил сопротивления, надо знать какие конструкторско-технологические решения формируют данный вид сил. Но силы сопротивления формируются единой внутренней энергией конструкции.

Внутренняя энергия любой механической системы представляет собой сумму энергий заключенных в объеме конструкции за исключением ее кинетической энергии в макро движение, т.е. исключая (в данном случае) кинетическую энергию формообразующих узлов. Это кинетическая энергия атомов в узлах кристаллической решетки, определяющая температуру конструкции. Это потенциальная энергия притяжения/отталкивания атомов в кристаллической решетки, которые ответственны за упругость, износостойкость, демпфирование, за параметры силы трения.

Возникает необходимость в декомпозиции внутренней энергии на составляющие. Была проделана экспериментальная работа в этом направлении. Эксперимент имел цель разработать положение по декомпозиции внутренней энергии конструкции для выделения элементарных сил сопротивления (механических, термических, износowych), т. к. они формируются в одном пространстве и в одно время. А для воздействия на параметры вторичного движения с целью их стабилизации, надо знать их параметры без их взаимодействий. Эксперимент состоял в следующем. На типовой детали для токарной обработки выделили несколько размеров те, которые формируются со скоростью подачи. На основе существующей теории точности сформировали набор элементарных составляющих, определяющих суммарную погрешность. Сформировали измерительную систему, установленную на станке так, чтобы в момент обработки снимать информацию о поведении каждой из элементарных погрешностей. Информацию, полученную во время обработки деталей о каждой составляющей, суммировали. Измеряли погрешность на обработанной детали. Сравнивали полученную суммарную информацию от отдельных элементарных погрешностей с погрешностью полученной с обрабо-

танной детали. При наличии разницы более $\pm 10\%$, производили поиск причины несоответствия, вводили новый информационный канал. Вновь производили обработку и т. д. до установленной величины расхождения. За базовую погрешность брали погрешность полученную на детали. В результате было установлено, что процессы возникающие в станке во время работы оказывают взаимовлияние (тепло в опорах шпинделя изменяет его жесткость, тепло поступающее в заготовку изменяет ее положение во время обработки и т. д.) Эти обстоятельства позволили сделать следующие утверждения: декомпозировать несущую систему станка на составные элементы можно как угодно, в зависимости от целей, но обязательным условием является знание степени влияния составных частей друг на друга на границах разделов. В этом случае номенклатура сил сопротивления будет выглядеть следующим образом: сила сопротивления механическим воздействиям (жесткость конструкции), сила сопротивления термическим возмущениям, сила сопротивления изнашиванию. Эти силы возникают в конструкции как в монолите. Но в конструкции масса стыков и сопряжений. Наличие этих элементов изменяет характер сил сопротивления и в первую очередь жесткости. Жесткость изменяется под действием тепла, изнашивания и ослабления затяжки резьбовых соединений. При оценке параметров сил сопротивления необходимо исследовать их взаимовлияние в соединениях (стыках и сопряжениях).

Третья глава посвящена исследованию причин нелинейности процесса изменения точности станка.

Точка приложения внешних сил изменяется в рабочем пространстве. Угол действия силы изменяется в зависимости от режимов обработки. Модуль силы изменяется от многих причин. В силу того, что точка приложения изменяется в пространстве, то это действие учитывается через действие момента. Модуль силы за длительное время эксплуатации усредняется в пределах технических возможностей станка. На сегодня известны, как методы, так и средства по оценке характера изменения внешних сил, так и по их количественной оценке. От действия внешних сил нелинейности возникает в результате наличия переменного момента, зависящего от геометрии обрабатываемых деталей.

Силы противодействия, развиваемые несущей системой станка, распределены по конструкции, но в своем действии приводятся так же к базам под инструмент и заготовку, где взаимодействуют с внешними силами. Геометрические параметры каждого вида сил сопротивления являются известными. Точка приложения располагается на базах станка, направление действия определено направлением в. движения, т. е. перпендикулярно к направлению подачи. Эти параметры постоянны во время эксплуатации станка и являются известными за время эксплуатации. Неизвестным остается модуль суммарной силы сопротивления, и характер его изменения во времени. Состав суммарной силы сопротивления известен из номенклатуры. Это сила сопротивления механическим воздействиям, термическим возмущениям и сила со-

противления изнашиванию. Набор этих сил и их количественное выражение в сумме определяет количественный уровень внутренней энергии несущей системы.

Принцип декомпозиции основан на физических свойствах металлов конструкции, развивать силы сопротивления. Если рассматривать свойства сплошного металла подвергающегося такой сумме воздействия, то граница раздела свойств будет находится на уровне свойств кристаллической решетки металла. В случае с конструкцией, где имеют место стыки и сопряжения, т. е. поверхности соединения деталей, то границами разделов свойств будут поверхности деталей. Для того, чтобы определить характер изменения свойства НС развивать силы сопротивления данного вида в пределах технических возможностей станка, необходимо иметь определенную модель поведения конструкции. В модели должны фигурировать силы и кинематические характеристики в движения несущей системы станка. В качестве таких моделей могут быть использованы законы Гука, для механических воздействий, Гей-Люсака для термических возмущений и закон Хрушова М. М. для абразивного изнашивания.

По существу это не законы т. к. в них отсутствует время. Как определил Ю. Н. Роботнов это определяющие уравнения. Условия получения этих уравнений достаточно однозначны: в эксперименте воспроизводится только исследуемый вид нагружения/ реакции. Иные воздействия исключаются или стабилизируются. Исследования проводятся на монолитных образцах из одного материала ограниченных размеров. Для исследования характера поведения элементарных сил сопротивления конструкции на основе определяющих уравнений необходимо воспроизводить условия названных законов получения.

Для исследования обозначенных свойств (механических и термических) были разработаны информационно – измерительные системы. С вопросами оценки сил сопротивления изнашиванию экспериментальным путем разобрался А. С. Проников. Исследования механических возмущений проводились при воспроизведении всех сил, действующих во время обработки, т. е. при обработке с резанием заготовок. При исследовании термических явлений воспроизводили работу всех механизмов, а тепло от резания имитировали нагревателями (ТЭН), работавшими по программе обработки типовой детали.

Исследования механических возмущений производили считая аргумен-

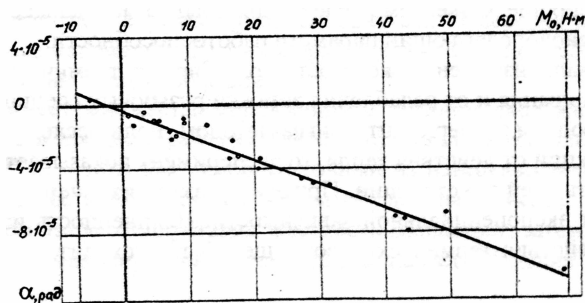


Рис. 3

том силы резания. Исследования термических возмущений производили считая аргументом температуру в характерных точках конструкции. Режимы внешних сил соответствовали обработке типовой детали из ст. 45. В результате обработки экспериментальных данных результаты показали линейную зависимость величины перемещения от сил /моментов резания (рис.3). Угол наклона характеризует жесткость конструкции при механических возмущениях (в данном случае в угловом направлении).

Исследование сил сопротивления термическим воздействием представляет по существу оценку коэффициента линейного расширения. В силу того, что определяющим для конструкции станка является угловое движение, так как линейное можно компенсировать, то определяли коэффициент углового движения. В эксперименте воспроизводили нормальные условия работы конструкции. Оценивали поведение оси шпинделя относительно станины. В качестве аргумента использовали температуру конструкции. В данном случае значение одной температуры не определяет однозначно поведение системы. Для однозначности оценки приходится учитывать температуру в характерных точках как алгебраическую сумму температур.

Угол наклона в зависимости при термических исследованиях говорит о величине коэффициента углового расширения конструкции (рис.4). Эксперименты показали, что свойство конструкции развивать элементарные силы сопротивления в данном случае также не противоречит линейной зависимости.

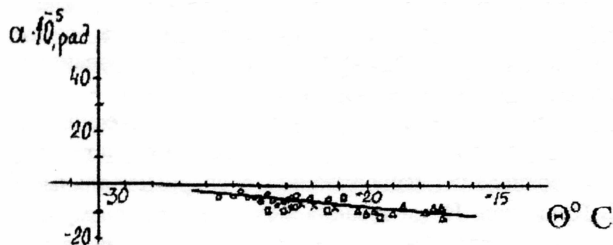


Рис. 4.

Следующий шаг в этих исследованиях состоял в том, чтобы установить степень влияния элементарных сил на условия существования друг друга, т. е. взаимное влияние. Объектом исследования была выбрана жесткость конструкции как основополагающий параметр работоспособности.

Исследовали изменение жесткости от действия термических возмущений, от изнашивания и от ослабления затяжки резьбовых соединений. Исследования проводили экспериментальным методом. Если исследовать свойство всей конструкции от действия тепла, то эксперимент показывает, что изменяется жесткость всей конструкции. Причем характер изменения жесткости не противоречит экспоненциальной зависимости. Нелинейность изменения жесткости от действия термических возмущений происходит вследствие того,

что в движение конструкции приводит к изменению условий на стыках. Детали изменяют свои первоначальные положения из-за действия тепла. Скорость изменения зависит как от интенсивности теплового потока, так и от качества конструкторско-технологических решений.

Была поставлена цель: установить функциональную зависимость между действием тепла и процессом изменения жесткости конструкции. Проведенные исследования показали на однозначную связь термических движений конструкции по пяти степеням свободы оси шпинделя и изменения жесткости в горизонтальной плоскости (для токарного станка).

$$j_y(t) = j_0 \pm [\bar{K}_\alpha \cdot \alpha(t) \pm \bar{K}_\beta \cdot \beta(t)] K_1 \pm [\bar{K}_x \cdot q_x(t) \pm \bar{K}_y \cdot q_y(t) \pm \bar{K}_z \cdot q_z(t)] K_2$$

Где $j_y(t)$ – текущее значение жесткости $\left(\frac{H \cdot м}{рад}\right)$; j_0 – начальное значение

жесткости «холодного» станка; $\bar{K}_\alpha, \bar{K}_\beta$ – коэффициенты, характеризующие свойство конструкции при угловых движениях; $\bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{K}_z$ – коэффициенты, характеризующие свойство конструкции при действии линейных движений; K_1, K_2 – коэффициент, согласующий размерность входящих величин $\left(\frac{H \cdot м}{рад^2}\right)$ и $\left(\frac{H \cdot м}{мм \cdot рад}\right)$ соответственно).

Для одного из исследованных станков 1Е61ПМФЗ зависимость при частоте вращения шпинделя 1600 мин^{-1} имеет вид:

$$j_\alpha(T) = 1100 - [0.98\alpha(T) - 0.37\beta(T) \cdot 10^4 - [2.32q_y(T) - 2.07q_z(T) + 0.014q_x(T)] \cdot 10]$$

В общем, виде изменение жесткости от времени работы в течение смены

$$j_\alpha(T) = 1100 \cdot e^{-0.116T},$$

где 1100 начальная жесткость $\left(\frac{H \cdot м}{рад}\right)$; T – время, ограниченное временем смены (6 часов).

Изменение жесткости происходит в результате изменения конфигурации плоскости прилегания в стыках, изменение натяга в опорах шпинделя и носит нелинейные характер.

Исследование влияния процесса изнашивания на характер поведения жесткости станка проводили на расточном гидрокопировальном станке для расточки отверстий в корпусах гидроаппаратуры. Отверстия внутри имеют так называемые «карманы». Для их формирования станок снабжен планшуппортом с радиальной подачей резца.

Станок имеет множество сопряжений с трением скольжения, которые изнашиваются в процессе работы. Износ сопряжений контролировали методом вырезанных лунок, как наиболее точный из известных методов. Характер изменения жесткости несущей системы – сложный (рис. 5).

На первом этапе эксплуатации жесткость возрастает, затем, на короткий промежуток, стабилизируется, затем плавно падает. Падение носит экспо-

ненциальный характер. Исследование процесса изнашивания показали, что на первом этапе происходит макроприработка поверхностей, т. к. существует погрешность изготовления и сборки. После приработки высокая жесткость объясняется полным контактом поверхностей. Затем в процессе дальнейшей работы начинает образовываться выработка в виде формы изношенной поверхности.

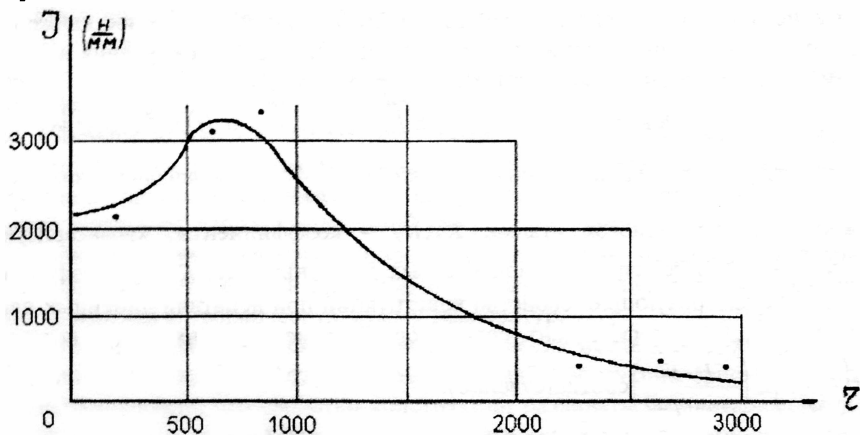


Рис. 5.

Площадь контакта уменьшается, жесткость падает. Когда сформировалась конфигурация изношенной поверхности для данного сопряжения, то жесткость изменяется, но с меньшей скоростью. Аналогично предыдущему закон изменения жесткости нелинейной и так же зависит, как от режимов, так и от конструкторско-технологических решений заложенных в сопряжениях.

Влияние ослабления затяжки резьбовых соединений несущей системы проводили на токарном полуавтомате повышенной точности. Резьбовых соединений в любой конструкции станка предостаточно.

Они имеют разные габариты, выполняют разные функции, изготовлены из разных материалов и с разной точностью, работают в разных условиях. Но все они вместе и порознь определяют жесткость конструкции. Резьбовой механизм предельно прост конструктивно, но имеет весьма сложное напряженное состояние. Это сложное состояние во время эксплуатации и особенно под действием вибрации трансформируется.

Трансформация состоит в том, что в резьбовом механизме усилие затяжки может возрасть, оставаться постоянным, ослабляться. Все зависит от условий работы и конструкторско-технологических решений (И. В. Крагельский). Однако усилие затяжки не может возрасть до бесконечности, так же как остаться постоянным т. к. наличие наклонной плоскости в витках определяет условия к отвинчиванию.

Совместное действие значительного числа соединений может сформировать сложный закон изменения усилия затяжки и как следствие закон изменения жесткости (рис. 6).

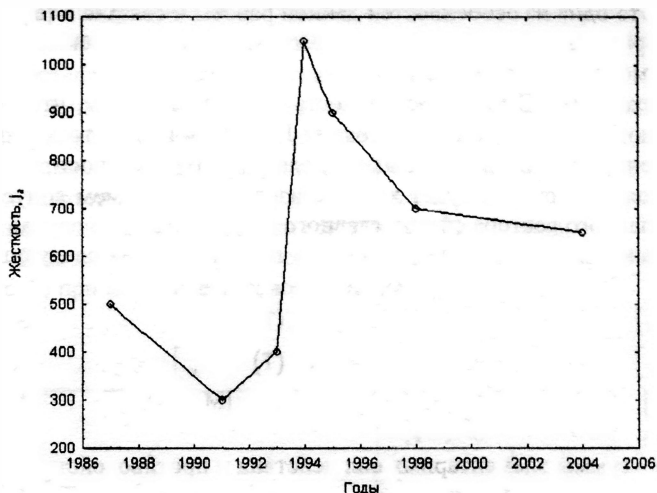


Рис. 6.

Проведенные исследования показали на аналогичный характер изменения жесткости от ослабления затяжки и влияния изнашивания.

Суммарное воздействие внешних факторов приводит к возникновению в. движения в несущей системе конструкции станка. Это движение несущей системы приводит к тому, что в соединениях конструкции изменяются условия на контактах.

Нелинейность процесса изменения точности станка во времени зависит от влияния стыков и сопряжений.

Четвертая глава посвящена разработке основных положений механики несущей системы станка. Задача стабилизации точности станка в течение заданного срока службы сводится к обеспечению стабильности параметров сил сопротивления. Известно, что силы сопротивления изменяются по экспоненциальному закону. В этой связи речь не идет о ликвидации вторичного движения.

Речь идет об обеспечении этому процессу скорости в заданных пределах. Общий лозунг о стабилизации сил сопротивления разбивается на две составные задачи: разделение общей силы сопротивления на элементарные составляющие и оценка их количественного выражения. Если первая часть определена предыдущими исследованиями: сила сопротивления механическим воздействиям, термическим и износосовым, то количественная оценка не может быть оценена непосредственными методами. Для решения этого вопроса нужно использовать реакцию конструкции через параметры вторичного движения. Исследованием свойств механического движения замкнутой системы

механика. В связи с особенностями вторичного движения конструкции требуется своя механика. Построение этой механики основано по классической схеме: статика, кинематика, но вместо динамики раздел связанный с взаимодействием сил. Это одна из особенностей данной работы и связана с тем, что в системе при формировании точности со скоростями подач ускорения малы, и действиями их можно пренебречь.

Статика механики НС имеет особенность состоящую в том, что речь идет не об абсолютном статическом состоянии НС., речь идет о том, чтобы скорость в. движения была бы в заданных пределах. Это будет относительное статическое состояние, которое будет характеризоваться наличием допустимой величиной главного вектора силы и главного момента. В этом случае условие относительной стабильности может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Sigma P_x(T) < [P_x] & \quad \Sigma M_{xy}(T) < [M_{xy}] \\ \Sigma P_y(T) < [P_y] & \quad \Sigma M_{yz}(T) < [M_{yz}] \\ \Sigma P_z(T) < [P_z] & \quad \Sigma M_{zx}(T) < [M_{zx}] \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$0 < T < T_0$$

где суммы $\Sigma P(T)$ - суммы элементарных сил действия и противодействия; $[P]$ допустимая величина проекции главного вектора на оси. Аналогично и моменты.

Для того чтобы обеспечивать составляющие в левой части, необходимо иметь количественное значение допустимых значений. Это процедуру осуществлять через кинематику движений в НС.

Допустимые значения обобщенных сил определяют через параметры движения. Точность станка проявляется при совместном действии обоих видов движений: формообразования и вторичного движения. Это условие может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sum \dot{q}_x < |\dot{q}_x| & \quad \sum \omega_{xy} < |\omega_{xy}| \\ \sum \dot{q}_y < |\dot{q}_y| & \quad \sum \omega_{yz} < |\omega_{yz}| \\ \sum \dot{q}_z < |\dot{q}_z| & \quad \sum \omega_{zx} < |\omega_{zx}| \end{aligned} \quad (4.2)$$

где $\dot{q}_i$ - линейная скорость возмущенного движения; ω - круговая скорость возмущенного движения.

В левой части неравенств стоят скорости элементарных причин (механические, термические, износосовые). В правой части допустимые величины этих движений. Для того чтобы формировать уровень левой части надо знать допустимые значения в правой. Допустимые значения определяют из ТЗ на станок, как отношение допустимых значений погрешности в начале эксплуатации и аналогичного в предельном состоянии, ко времени между состояниями. Под предельным может быть время смены, до первого ремонта, га-

рантийный срок, срок службы и т. д. Время до предельного состояния также используют из ТЗ.

Допустимые скорости представляют собой совместные действия движения формообразования и вторичного движения. Для того чтобы определить степень влияния вторичного движения, используем принцип кинематики путем составления кинематических уравнений. В общем виде $\dot{q} = i \cdot s$.

В данном случае i – коэффициент, показывающий как конструкция преобразует рабочий процесс в движение несущей системы, т.е. преобразование вторичного движения (в. движения) в данном соединении в движение базы (под заготовку/инструмент). Данный коэффициент по существу есть передаточное отношение источника движения к базе станка.

В качестве примера рассмотрим составление кинематического уравнения (рис. 7) при механических возмущениях.

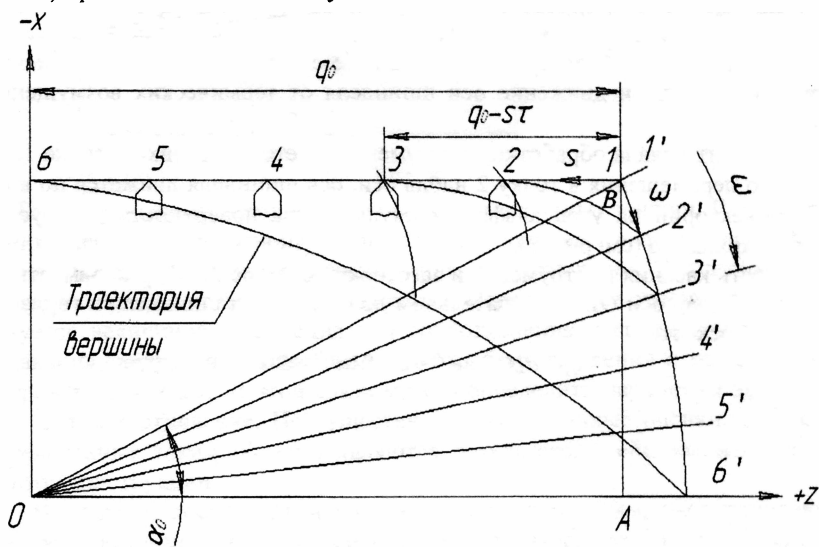


Рис. 7

Механическое взаимодействие инструмента и заготовки происходит в момент врезания. При этом заготовка отжимается из первоначального положения на определенный угол α_0 (см. рис. 5). Линейное перемещение на $AB = q_m$. Величины этих перемещений зависят от жесткости шпинделя в горизонтальной плоскости по угловому положению. Конструкция запасает в этот момент определенный уровень потенциальной энергии. Потенциальная энергия зависит от жесткости и проявляется от действия составляющих силы резания и момента.

После врезания резец начинает двигаться вдоль оси шпинделя со скоростью подачи к началу координат. Величина силы резания изменяется незна-

чительно, допустим, что остается постоянной. Но величина момента изменяется, т.к. изменяется плечо со скоростью подачи. При переходе резца из положения 1 в 2 по горизонтали точка встречи резца и заготовки переместится по траектории 2-2', т.е. по вертикали соответственно углу поворота заготовки т.д.

Движение оси шпинделя в исходное положение происходит из-за высвобождения потенциальной энергии, запасенной с момент срезания в заготовку. В результате прямолинейного совместного движения резца вдоль оси и кругового движения формируется траектория резца на заготовке.

Скорость движения точки касания резца на обрабатываемой поверхности по оси OX :

$$\dot{q}_x = \alpha_0 S - \frac{\alpha_0}{z_0} S^2 \tau$$

Величина угла α_0 соответствует углу поворота при действии механических сил в состоянии поставки станка и когда он «холодный».

Аналогично можно представить процесс взаимодействия движений формообразования и движение оси шпинделя от термических возмущений (рис. 7).

В момент начала обработки инструмент касается заготовки в точке 1. За время его перемещения в точку 2 вдоль оси, ось шпинделя движется по круговой траектории на угол альфа. В результате на поверхности образуется спираль Архимеда (см. рис. 8).

Скорость касания инструмента и заготовки вдоль оси OX при совместном движении вдоль оси OZ и вращательном движении оси шпинделя в горизонтальной плоскости:

$$\dot{q}_x = \alpha_m (z_0 \cdot \lambda e^{-\lambda t} - S - S \lambda t e^{-\lambda t} + S \cdot e^{-\lambda t})$$

тельной. Оно возникает из-за ослабления затяжки резьбовых соединений. При разработке мероприятий с целью стабилизации сил сопротивления конструкции, движения этих типов соединений логично рассматривать методами механики несущей системы станка.

Пятая глава имеет цель обобщить результаты проведенных исследований. Исследование точности станка и ее стабильности в течение длительной эксплуатации с учетом вторичного движения несущей системы станка дает возможность в отличие от линейной теории точности иметь следующее положение:

- Конструкция станка во время рабочего процесса суммируют оба движения (формообразования и вторичного движения). Исследование этого взаимодействия позволяет количественно определить свойства станка производить детали;
- Исследование поведения конструкции как суммы элементарных движений, возникающих в разных соединениях конструкции и в разное время эксплуатации позволяет определить причины появления тех или иных отклонений на обработанных поверхностях деталей;
- Положения механики несущей системы станка обнаруживает возможность устанавливать механизм образования не только погрешности размера, но и отклонения формы/расположения;
- Механика несущей системы станка, примененная к движениям в соединениях, формирует возможность исследовать причинные изменения сил сопротивления в соединениях. Для этого требуется анализ статического состояния соединений, кинематики вторичного движения в соединениях;
- Исследование изменения точности станка в течение разных периодов эксплуатации станочной системы показало, что расходование внутренней энергии конструкции не противоречит экспоненциальной зависимости, характерной для любых термодинамических систем и в частности станочных. Отличие состоит в параметрах этих закономерностей, которые зависят от количества и качества внутренней энергии конструкции;
- Применительно к данному исследованию количество внутренней энергии характеризуется жесткостью конструкции, ее износостойкостью и термическим сопротивлением. Качество внутренней энергии определяется скоростью изменения этих показателей. На данном этапе исследований наиболее показательным является изменение жесткости. В первом приближении, считаем как износостойкость, так и термическую стойкость величинами постоянными.

Совокупность этих полученных в результате исследований положений дает основание говорить о формировании нетрадиционного подхода к иссле-

дованию и обеспечению стабильной точности станка и формирование основ нелинейно теории точности станка.

Обобщение представлено в виде методики по обеспечению стабильной точности станка в пределах требуемого времени эксплуатации. Ее использование предусматривается на этапе проектирования станка. Методика представляет собой типовую методику в виде пошаговой процедуры с итерациями и направлена на стабилизацию сил сопротивления, развиваемые конструкцией станка. Научную основу методики составляют основные положения механики несущей системы. Область применения методики составляют станки, построенные на методе формообразования следов/касания. В силовом отношении - это та область, которая ограничена скоростью возмущения внешних нагрузок скоростью релаксации конструкции.

Механическое движение определяется однозначно двумя параметрами: траекторией и законом движения. В силу невозможности непосредственной оценки действующих сил в конструкции объектом исследования являются эти параметры. По их характеристикам судят о силах сопротивления.

Методика состоит из двух частей. Первая часть в качестве технического объекта имеет в основном траекторию вторичного движения поверхностей в соединениях деталей. При разработке требований на свойства соединений основной упор делается на качество поверхностей, при этом качество обеспечивается технологическими методами.

Вторая часть в качестве объекта имеет в основном закон движения, хотя и траектория тоже в поле изучения. В данном случае основу методов по обеспечению стабильности сил сопротивления составляют конструкторские методы, основанные на анализе процессов изменения параметров сил сопротивления от действия вторичного движения.

Цель методики в первой части заключается в формировании требований на свойства соединений. Свойства касаются качества поверхностей деталей в соединениях, качества соединения поверхностей. Методика начинает свой путь с общих требований предъявляемых к станку в ТЗ, с последующим углублением в конструкцию. Пределом является требование к соединению (стыку/сопряжению). При этом считается известным, как методы, так и средства обеспечивающие свойства деталей. Движение в соединении пространственное, но определяющими будут направления перпендикулярно к поверхности детали. В этом направлении решающим будут силы затяжки резьбовых соединений, упругие свойства материалов. Другое направление влияющее на формирование сил сопротивления является движение по касательной к поверхности. В данном случае определяющим будет сила затяжки и ее изменение во времени и трение на поверхности соединений.

Цель методики во второй части состоит в том, чтобы обеспечить стабильность сил сопротивления воздействуя на параметры движения в основных соединениях конструкции. При этом подлежат воздействию, как параметры траектории так и закона. В основу данного подхода положен тезис: движение

в соединениях существует и будет существовать во все время эксплуатации конструкции. В существующей системе знаний считается, что конструкция во время рабочего процесса находится в равновесном состоянии. После изготовления, как ее собрали, так она и будет существовать, но наличие движения в конструкции изменяет условия на контактах и изменяет уровень сил сопротивления. Появляется возможность воздействовать на конструкцию и технологию изготовления так, чтобы это движение формировало условия, направленные на стабилизацию свойства соединения. Вопрос состоит в том, на сколько и в какую сторону осуществлять изменение траектории и закона. В практике станкостроения известен так называемый прием «предсказания». Это выпуклость на направляющих скольжения, предсказание положения оси шпинделя при действии термических возмущений. Однако такое действие основано на богатом опыте из практики эксплуатации. В данном случае появляется возможность осуществлять подобные действия на этапе проектирования. Причем смысл действий состоит не в том, чтобы воздействовать на одно соединение, а эффект можно ожидать при воздействии на все определяющие соединения. При этом все действия, как по траектории, так и по законам должны быть согласованы в пространстве и синхронизированы во времени. В противном случае можно получить еще хуже, чем при традиционном подходе. В работе эта процедура названа, как саморегулирование. Существующее понятие (предсказание) отражает статическое действие по обеспечению точности станка. Под саморегулированием будем понимать специально организованные условия существования вторичного движения на поверхности каждого соединения с целью использования этого движения для стабилизации сил сопротивления.

В соединениях конструкторско-технологическими методами формируется условия обеспечивающие регулирование свойства соединения за счет вторичного движения. В качестве таких возможностей представим два примера.

При изготовлении базовой поверхности шпиндельной бабки предъявляются жесткие требования к ее плоскостности. Во время работы температура на уровне оси шпинделя выше, чем в стыке. Это приводит к образованию отклонения формы на стыке от термических возмущений. Как следствие жесткость изменяется от максимальной в начале работы, до минимальной в конце смены. Для стабилизации жесткости в начальный период плоскость изготавливается выпуклой и по мере разогрева жесткость увеличивается, так как стык становится плоским и затем с образованием выпуклости уменьшается (рис. 8). Параметры этих движений согласуются с движениями других соединений.

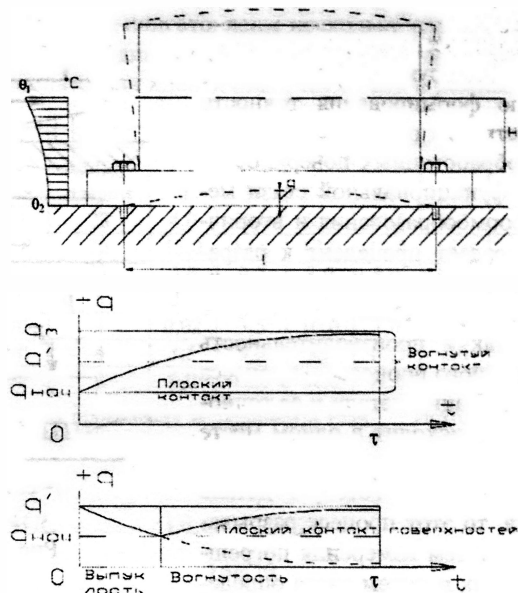


Рис. 9

Известно, что во время работы направляющие токарного станка изнашиваются неравномерно вследствие неравномерной эпюры давления. Для обеспечения равномерности износа требуется создание условий, когда работа по изнашиванию у левого торца суппорта равна работе правого (рис.10).

В этом случае путь трения что у левой точки суппорта, что у правой, один и тот же. Условия смазки одинаковые. Разным остается только давление. Для того чтобы обеспечить равенство износа направляющих с обеих сторон суппорта, надо создать условия, когда давление в правом торце будет больше, чем в левом. Это можно сделать для данной системы сил путем образования выборки на направляющих суппорта.

Ситуация с двумя потоками вторичного движения возникает в соединениях, выполняющих одну и ту же функцию – сохранение стабильного положения выходного звена в пространстве и времени. Эта ситуация характерна для таких соединений как вершина резца в контакте с заготовкой. Это изнашивание и термическое движение. Во время работы резец изнашивается и вершина отодвигается от заготовки. В это же время тепло образующееся при резании приводит в движение стержень резца. При этом вершина движется в противоположном направлении и компенсирует износ. Задача заключается в формировании законов обоих движений так, чтобы они имели одинаковые параметры. Основу решения будет составлять физико-механические свойства

инструмента. Естественно такой инструмент необходим только для чистовых проходов.

Исследование влияния вторичного движения на поведение конструкции создает условия к объяснению формирования точности обработки и в частности образования отклонения формы на обработанных поверхностях деталей. Наличие функциональной связи между движением формообразования и вторичным движением создает прецедент к разработке шкалы по количественной оценке свойства станка производить детали.

Как точность, так и производительность есть две стороны одного процесса – процесса образования конфигурации детали и ее точности. Этот процесс происходит в одном месте (на вершине резца) и в одно время (во время чистового подхода). Когда готовую деталь снимают со станка, то этот процесс разрывается и о нем судят путем измерения погрешности на поверхностях и путем счета определяют производительность.

Если этот процесс рассмотреть в одно и тоже время и в одном пространстве, то можно это использовать для количественной оценки этого свойства. Во время чистового прохода надо снять объем материала $W = \pi \cdot d \cdot t \cdot l$ (d – диаметр заготовки; t – глубина резания; l – длина обработки). После обработки на поверхности останется слой металла объемом $w = \int_0^l q(z) dz$ (рис. 11).

Отношение этих объемов говорит о свойстве станка, его способности производить детали.

$$\chi = \frac{\int_0^l q(z) dz}{\pi \cdot d \cdot t \cdot \tau}, \quad 0 < \chi < 1$$

Данное соотношение безразмерное и на его основе возможно создание шкалы названного свойства, задав при этом определенный масштаб. Это отношение может простирается от нуля до единицы. Но практически этот диа-

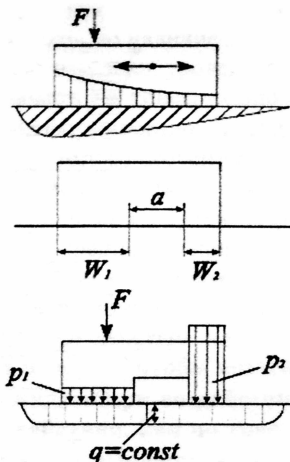


Рис. 10.

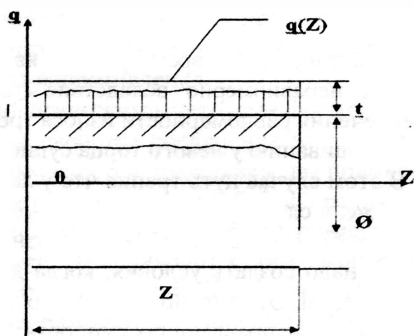


Рис. 11.

пазон будет уже, и значения будут внутри диапазона. Была произведена такая оценка. Для этого были подготовлены несколько партий заготовок (по четыре штуки на станок) с одинаковыми геометрическими параметрами из ст. 45. Инструмент использовали идентичный, также как и режимы обработки.

Таблица

Модель станка	Год выпуска	Время эксплуатации	Время работы станка, мин					Суммарная площадь мм ²	$\chi/\%$
			0	20	240	60	180		
16K20 ₁	1971	23	4,0	20,0	0,5	20,0	0,5	45,0	0,45
16K20 ₂	1971	23	15,0	14,0	17,0	19,0	16,0	81,0	0,81
16K20 ₃	1973	21	4,0	9,0	8,0	8,0	11,0	40,0	0,40
1K62	1989	5	0,5	4,5	0,5	0,02	0,02	5,54	0,06
SUI-VD	1990	4	0,02	3,5	10,0	1,0	2,5	17,02	0,17
DLG-SH	1990	4	1,5	9,0	5,0	10,5	8,0	34,0	0,34
MK6046	1992	2	6,0	12,0	12,0	12,0	10,5	52,5	0,53

Время проведения эксперимента 1994

Исходная площадь мм² - 100

MK6046

SUL

DLG

16K20

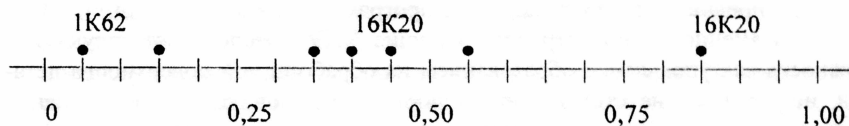


Рис. 12.

Первый образец обрабатывали на «холодном» станке. Затем через равные промежутки времени обрабатывали остальные образцы в течение пяти часов. В промежутках станок работал на холостом ходу. Затем путем измерения оценивали объем оставшегося металла на поверхностях деталей. Находили соотношение χ для каждой детали и суммировали в таблице. На рис. 12 представлены результаты произведенных измерений для разных станков токарной группы.

Заключение

Свойства конструкции станка, основанного на методе формообразования следов, обеспечивает два фундаментальных свойства: формировать силы сопротивления и одновременно обеспечивать элементы системы управления точностью. Такое сочетание обеспечивает ряд преимуществ перед другими методами формообразования (копирования, обкатки). Указанные преимущества способствуют таким свойствам как мобильность, универсальность в вы-

боре режимов обработки, высокой точности обработки. Однако эти преимущества обеспечиваются сложной силовой картиной, возникающей в конструкции во время рабочего процесса. Возникают взаимовлияния сил, имеющих разную природу происхождения. Наличие соединений между отдельными деталями (стыков/сопряжений) приводят к возникновению нелинейности в процессе изменения уровня сил сопротивления.

Наличие трех областей в свойстве конструкции развивать силы сопротивления (от статике до релаксации, от релаксации до резонанса и за резонансной зоной) определяют появление погрешностей разного рода. Обозначенные и многое другие свойства конструкции требуют своих исследований, если будет сохранена тенденция в использование обсуждаемого способа формообразования.

Станкостроение в настоящее время имеет возможности в управление образования заданных конфигураций деталей, управляемые режимами обработки, производительностью, такими процессами как смена инструмента /заготовки, процессом транспортировки заготовок и т.д. Но управление точностью сохранилось на уровне начала эпохи автоматизированного производства, основанного на подналадке. Отличие состоит в том, что в начале прошлого века это делал станочник, а сейчас система диагностики совместно с системой предналадки, предсказание программы управления и т.д.

В современном станкостроении наличие ЧПУ обеспечивает такую возможность как управление образованием на обработанной поверхности деталей, не только и не столько погрешностей размеров, сколько отклонения формы и расположения (выпуклость на направляющих скольжения и т.д.) заданной величины и формы. Такое направление в развитии станкостроения требует, чтобы изменение точности станка во время обработки было на порядок стабильнее образуемого отклонения формы. Данный подход так же требует высокого уровня стабильности конструкции во время рабочего процесса. Результаты данной работы обозначают пути по стабилизации состояния конструкции станка в течение длительной эксплуатации, что является основой к разработке методов управления образованием отклонения формы и расположения на обработанных поверхностях деталей с помощью системы ЧПУ.

Требования к стабильности поведения конструкции может быть обеспечено конструкторско-техническими приемами. В частности за счет сознательного формирования требований к соединениям деталей несущей конструкции станка, а также развития и совершенствования принципа саморегулирования свойства конструкции к стабилизации сил сопротивления.

Общие выводы

1. Несущая система станка выполняет две противоречивые функции: силовую и управление точностью. Силовая обеспечивает устойчивость про-

цессу резания. Управление точностью осуществляется посредством геометрической точности элементов конструкции станка. Такое сочетание приводит к простоте конструкции, но взамен получают сложные силовые взаимодействия и влияния, оказывающие влияние на нелинейность изменения точности станка.

2. Во время рабочего процесса в конструкции присутствуют два рода движений. Это движение формообразования, которое совершает работу по сдвигу стружки и образует конфигурацию детали. Возмущения, возникающие при этом, порождают вторичное движение в конструкции. Вторичное движение суммируется с движением формообразования и в результате на обработанной поверхности образуются погрешности.
3. Использование в расчетах стыков и сопряжений, положение о движении конструкции дает возможность при проектировании учитывать влияние движения в соединениях на стабильность точности.
4. Точность станка и его производительность зависят от единого свойства конструкции формировать силы сопротивления против внешних возмущений. Это обстоятельство создает условия для оценки в количественном выражении свойства станка производить годные детали. Как результат этого обстоятельства возможно создание шкалы данного свойства.
5. Наличие в конструкции стыков и напряжений, сложность силового взаимодействия при условии наличия вторичного движения приводит к процессу расходования внутренней энергии конструкции. Процесс изменения энергии идет в одном направлении, в сторону ее уменьшения. Закон изменения нелинейный и не противоречит логарифмическому.
6. Рассмотрение погрешности детали не только с точки зрения геометрических показателей, но и с учетом количества внутренней энергии в объеме геометрических характеристик, позволяет объяснить стремление машиностроения иметь более точные детали и изменяет подход к исследованию точности станка.
7. Наличие вторичного движения, ухудшающего как точность станка, так и его производительность, и ужесточение требований, как к одному параметру, так и к другому, требует использования механики этого движения. Разработанные начальные положения такой механики обеспечили уже на начальных этапах разработки механики возможность не только объяснить образование отклонения формы, но и регулировать явления, происходящие в соединениях.
8. Предложенный способ составления кинематических уравнений и уравнений движения позволил установить кинематическую связь между движением формообразования и вторичным движением на количественном уровне, позволили объяснить образования отклонения формы на обработанной поверхности и процесс ее изменения во времени.
9. Наличие движения в поверхностях соединений приводит к изменению свойств поверхностей формировать силы сопротивления. При учете это-

го явления появляется возможность регулировать параметры этого движения с целью стабилизации процесса формирования сил сопротивления в соединениях. Это возможно на принципах саморегулирования.

10. Нелинейность процесса изменения точности станка зависит от многих причин и, в частности, от несимметричности свойств рабочего пространства станка, от нелинейности процесса изменения параметров сил сопротивления конструкции.
11. Существующие знания в вопросах точности, зависящие как от конструкции, так и от технологии изготовления и сборки, дополненные результатами исследования механического движения несущей системы станка, дают возможность на этапе проектирования активно влиять на принятие решений по точности станка.

Основное содержание работы опубликовано в следующих материалах:

1. Технологическая надежность станков/ Под ред. А. С. Проникова- М.: Машиностроение, 1971. - 342 с.
2. Точность и надежность станков с ЧПУ/ Под ред. Проникова А. С., М.: Машиностроение, 1982. - 255 с.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник – учебник; В 3- х т.: Проектирование станков/А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; Под общ. ред. А.С. Проникова - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана- Машиностроение, 1999. – 444 с.
4. Проников А. С., Дмитриев Б. М. Оценка сроков службы деталей станков// Эксплуатация, ремонт и модернизация оборудования.- М.: МДНТП.- 1970.-С. 37-42.
5. Дмитриев Б. М., Прогнозирование долговечности сопряжений типа направляющих скольжения// Надежность и контроль качества. Стандарты.- 1973.- №10.- С.56-60.
6. Дмитриев Б. М., Прогнозирование потери точности из –за износа основных сопряжений// Надежность и контроль качества. Стандарты. – 1973.- №10.-С.71-74.
7. Дмитриев Б. М., Шеремет Л. И. прогнозирование долговечности пары скольжения ходового винта, применяемого в силовых устройствах//Авиационная промышленность.- 1976.- №1.- С.77-78.
8. Дмитриев Б. М., Шумейко И. А. Оценка возможности станка по обеспечению точности геометрических параметров// Станки и инструмент.- 1978.-№5.-С.6-8.
9. Проников А.С., Дмитриев Б.М., Шеремет Л.И. Определение закона распределения вероятности безотказной работы кинематической пары винт-гайка методом статистических испытаний// Известия вузов. Машиностроение.-1978.-№12.-С.26-30.

10. Дмитриев Б. М., Шумейко И. А. Изменение жесткости станка при относительном перемещении формообразующих узлов станка// Изв. вузов. Машиностроение.- 1979.-№1.- С.134-138.
11. Дмитриев Б. М., Авдеев В. Б. Влияние тепловых деформаций на точность токарной обработки//Известия вузов. Машиностроение.- 1980.- №5.-С.84-88.
12. Дмитриев Б. М., Парфенов Ю. И. Исследование жесткости суппорта токарного станка// Известия вузов. Машиностроение.- 1980.-№9.-С.82-86.
13. Дмитриев Б.М. Прогнозирование длительности межремонтного периода на стадии исследования надежности опытного образца станка // Труды МВТУ. 1980. – 334. – С.21-27.
14. Дмитриев Б. М., Авдеев В. Б. Испытание токарного станка с ЧПУ на надежность по параметрам точности//Станки и инструмент. - 1981.- №11.-С.24-25.
15. Дмитриев Б. М., Влияние тепловых деформаций станка на точность обработки//Известия вузов. Машиностроение. – 1980. - №2. – С.36-40.
16. Дмитриев Б. М., Байдаков А. М. Характеристика теплового сопротивления шпиндельного узла// Станки и инструмент.- 1982.-№9.-С.24-25.
17. Дмитриев Б. М., Кузнецов В. П. Изменение во времени точностных характеристик измерительной системы токарного станка с ЧПУ //Известия вузов. Машиностроение. - 1980. - №9. – С.28-32.
18. Дмитриев Б. М., Королев О. Г. Изменение жесткости станка от действия тепловых возмущений.// Известия вузов. Машиностроение. – 1994. - №10. – С.42-46.
19. Дмитриев Б. М., Миронов М. Ю./ Обеспечение достоверности испытаний металлорежущих станков// Состояние и проблемы технических измерений: Тезисы докладов на 4-ой Всероссийской науч.- техн. конф.- М., 1997.- С.404.
20. Дмитриев Б. М., Иванов А. Ю./ Исследование причин изменения жесткости станка при его эксплуатации// Машиностроительные технологии: Тезисы докладов Всероссийской конференции- М.,1998.- С.145
21. Дмитриев Б. М. Основное свойство станка и способы его измерения.: //Тезисы докладов на 6-ой Всероссийской науч.- техн. конф. - М., 1999. - С.347
22. Дмитриев Б. М. Оценка остаточного ресурса технической системы //Тезисы докладов на 6-ом Всероссийском Совещании-семинаре. - М., 2001. - С.123
23. А.С. №748072 СССР, МКИ F16H25/22. Шариковый винтовой механизм /А.С. Проников, Б.М. Дмитриев, Е.И.Рожков. №2604227. Заявка 18.4.78. //Б.И. – 1980. - №26.

- 24.А.С. №878004 СССР, МКИ F16H17/11. Упругая опора / А. С. Проников, Б.М. Дмитриев, Е.И. Рожков, В.Н. Бирюков, Ю.Д. Сдоров. №2896996: Заявка 21.3.80 // Б.И. – 1981. - №12.
- 25.А.С. №932019 СССР, МКИ В24В43/21. Передача винт-гайка / А.С. Проников, Б.М. Дмитриев, Е.И. Рожков, В.Н. Бирюков, Ю.Д. Сидоров. №299549: Заявка 22.10.80 // Б.И. – 1982. - №38.
- 26.А.С. №1515158 СССР, МКИ G01В13/02. Пневматическое устройство для измерения линейных перемещений/ Ю.И. Медников, Б.М. Дмитриев, И.Ш. Хамраев// Б.И. – 1988. - №38.