

М 3206/4

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Уколов Михаил Степанович

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ
(на примере вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6520-ФЗ)

Специальность 05.03.01 - Процессы и машины обработки
материалов резанием; автоматические линии

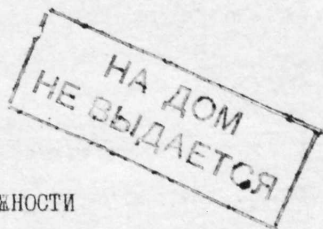
АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1977 г.

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Уколов Михаил Степанович



ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ

(на примере вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6520-ФЗ)

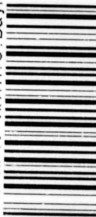
Специальность 05.03.01 - Процессы и машины обработки
материалов резанием; автоматические линии

1320614

АВТОРЕФЕРАТ

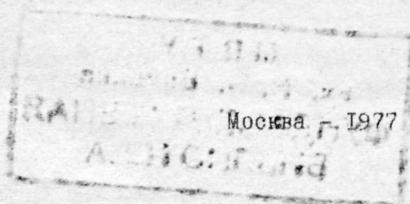
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1320614

Уколов М.С. Исследование у



Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового
Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель
д.т.н. профессор

А.С.Проников

Официальные оппоненты

д.т.н. профессор Б.А.Дубовиков

к.т.н. доцент А.А.Шатилов

Ведущее предприятие - Московский машиностроительный завод
"Знамя Революции"

Защита диссертации состоится " " _____ 1978 г.
на заседании специализированного Ученого Совета К053.15.01
по автоматизации в машиностроении МВТУ им. Н.Э.Баумана по
адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул, дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах,
заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

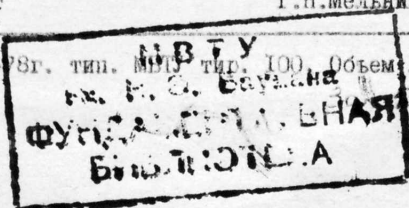
МВТУ им. Н.Э.Баумана

Автореферат разослан " " _____ 1978 г.

Ученый секретарь специализированного
Ученого Совета
к.т.н. доцент

Г.Н.Мельников

Л 71201 подп. к печ. 2/1-78г. тип. МВТУ, тираж 100, Объем 1 п.л.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение качества и надежности продукции машиностроения (и станкостроения в частности) приобретает особое значение в экономической стратегии партии на современном этапе. В связи с резким увеличением выпуска станков с ЧПУ остро встает проблема повышения их технологической (точностной) надежности, под которой понимается свойство станка выполнять обусловленные его назначением технологические операции, сохраняя во времени точность и качество обрабатываемых поверхностей в заданных пределах. Для успешного решения этой важной и сложной проблемы необходимо проведение широкого фронта научно-исследовательских работ.

Целью работы является исследование уровня технологической надежности станков с ЧПУ и разработка метода его оценки.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи решаются на базе разработанных профессором А.С.Прониковым положений и методики по исследованию технологической надежности станков.

Теоретическая часть работы включает вопросы: анализа особенностей и расчета точности технологического процесса обработки деталей на станках с ЧПУ; разработки общего методического подхода для исследования технологической надежности станков с ЧПУ с учетом их специфики; разработки математической модели изменения станком точности обработки и выводу аналитических зависимостей для определения показателей технологической надежности; применения ЭВМ при исследовании технологической надежности.

Экспериментальная часть работы посвящена исследованию погрешностей, формирующих показатели технологической надежности станков с ЧПУ, и факторов, влияющих на точность обработки (на примере вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6520-ФВ), а также разработке методов определения доминирующих погрешностей и оценке степени их влияния на технологическую надежность.

Научная новизна. Разработана методика оценки уровня технологической надежности станков с ЧПУ с учетом их специфики, получены аналитические зависимости, связывающие показатели технологической надежности (вероятность безотказной работы $P(t)$, резерв станка по точности обработки δ_T и коэффициент резерва K_T) с параметрами точности конкретного станка и обра-

батываемых заготовок.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет проводить качественную и количественную оценку уровня технологической надежности станков с ЧПУ, определять влияние отдельных погрешностей и изменение их величины во времени на технологическую надежность и находить эффективные пути ее повышения. На примере исследуемого станка показана возможность повышения резерва δ_T путем уменьшения тепловых деформаций.

Реализация работы. Исследования, проведенные в диссертационной работе, являются частью научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре "Станки и автоматы механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана с ВНИИМаш и Московским заводом "Динамо" имени С.М.Кирова. Результаты работы использованы при эксплуатации станков с ЧПУ на заводе "Динамо", а также при разработке совместно с ВНИИМаш методик по испытаниям станков с ЧПУ на технологическую надежность и проектов ГОСТ "Надежность технологических систем. Термины и определения" ПГ 400-657-76, "Надежность технологических систем. Общие требования к методам оценки" ПГ 400-636-76. Внедрение разработанных рекомендаций на заводе "Динамо" позволило снизить вероятность появления брака за счет повышения резерва станков с ЧПУ по точности обработки.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на Совете секции Межведомственного научно-технического совета по проблеме надежности, долговечности и контроля качества промышленной продукции (г. Москва, 1975 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности программного управления в машиностроении" (г. Ташкент, 1975 г.), Научно-технической конференции "Методы и средства повышения надежности машин" (г. Минск, 1976 г.), Научно-техническом Совете ВНИИМаш (г. Москва, 1976 г.).

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 3 работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов, изложенных на 184 страницах, содержит 114 страниц машинописного текста, 71 рисунок, 8 таблиц и список литературы 78 наименований.

Первая глава "Состояние вопроса и задачи исследований" посвящена анализу состояния проблемы надежности в станкостроении и ее специфических особенностей. В работе проанализиро-

ваны исследования в области точности и надежности функционирования технологических систем.

Большой вклад в формирование и развитие науки о точности производства внесли советские ученые А.А.Зыков, А.Б.Яхин, Н.А.Бородачев, В.М.Кован, Э.А.Лател, В.С.Корсаков, А.П.Соколовский, Б.С.Балакшин, И.С.Ачеркан, А.Н.Гаврилов и др. Основные аспекты теории надежности функционирования сложных систем отражены в работах акад. Н.Г.Бруевича, акад. Б.В.Гнеденко, Л.И.Волчкевича, А.Д.Соловьева, Ю.К.Беляева и др.

Надежность станков с ЧПУ можно рассматривать с двух точек зрения: надежность станка, как машины (надежность функционирования) и надежность станка, как технологической системы (технологическая надежность). В связи с возрастающими требованиями к качеству выпускаемой продукции требования к станку, как к технологической системе, выдвигаются на первый план. Поэтому точность обработки должна рассматриваться в течение всего периода эксплуатации. Этот новый подход к проблеме надежности нашел отражение в работах проф. А.С.Проникова и его учеников (Б.М.Дмитриева, И.Т.Ковалева, М.С.Перетятко, В.Н.Юрина, Г.В.Семенова, И.В.Кашкадамова, М.М.Шиферсона и др.).

Для поддержания качества выпускаемой продукции на требуемом уровне необходимо изучение закономерностей протекания технологических процессов и выявление тех параметров, воздействие на которые наиболее эффективно для повышения точности и производительности. В силу ряда специфических особенностей станков с ЧПУ многие процессы (например, износ и тепловые деформации)

протекают у них более интенсивно, чем в обычных станках: станки с ЧПУ более энергоемки, эксплуатируются более интенсивно, благодаря высокой степени автоматизации доля машинного времени у них достигает 80-85% и др. В станках с ЧПУ необходимо проводить большее количество проверок, включая новые виды (например, проверка точности позиционирования). Специфика станков с ЧПУ создает дополнительные трудности при исследовании технологической надежности. Конструктивные особенности, принцип действия, условия эксплуатации и особые требования к станкам с ЧПУ - все это существенно отличает станки с ЧПУ от обычных станков и требует разработки новых методов исследования технологической надежности.

В настоящее время большинство работ по исследованию технологической надежности относится к обычным, универсальным

станкам (в основном - токарным, расточным, шлифовальным), в то время как наиболее характерной и распространенной на станках с ЧПУ является фрезерная обработка. Станки фрезерной группы составляют основную долю в общем парке станков с ЧПУ, поэтому исследование их технологической надежности представляет практический интерес. В качестве объекта исследований выбран вертикально-фрезерный станок с ЧПУ модели 6520-ФЗ.

Задачами настоящей работы являются: определение последовательности и содержания этапов расчета технологической надежности станков с ЧПУ с учетом их специфики; проведение анализа и теоретического исследования точности процесса обработки на станках с ЧПУ и разработка математической модели для вывода аналитических зависимостей, связывающих показатели технологической надежности с параметрами точности станка и обрабатываемых деталей; определение доминирующих погрешностей, влияющих на точность обработки, и проведение их экспериментальных исследований; выявление факторов, в наибольшей степени влияющих на технологическую надежность станков и на точность обработки; разработка алгоритма и программы расчета технологической надежности станка с ЧПУ на ЭВМ (расчет показателей надежности); разработка рекомендаций по повышению технологической надежности исследуемых станков.

Вторая глава "Теоретическое исследование технологической надежности станков с ЧПУ" посвящена разработке методического подхода, математической модели изменения станком с ЧПУ точности обработки и выводу аналитических зависимостей для определения показателей технологической надежности.

Технологическая подготовка и обработка деталей на станках с ЧПУ имеет ряд специфических особенностей и существенно отличается от обработки на универсальных станках. Методика исследования технологической надежности станков с ЧПУ предусматривает следующую последовательность и содержание этапов:

1. Анализ специфики станка с ЧПУ и системы управления (типа системы, схемы управления, конструктивных особенностей станка, компоновки, привода и др.).

2. Выбор показателей для оценки технологической надежности.

3. Выбор наиболее характерных для исследуемого станка операций, вида обработки, параметров точности и качества обрабатываемых поверхностей.

4. Применение метода разработки структурных схем. Анализ

структурной схемы показал, что у станка с ЧПУ модели 6520-43 основным параметром точности, лимитирующим технологическую надежность, является "точность размера по координате Y" (поперечная ось). Этот параметр формируется всем комплексом станка с ЧПУ (его механической частью и системой управления) и гораздо большим количеством погрешностей по сравнению с универсальными станками, он наиболее характерен для станков с ЧПУ вертикальной компоновки и поэтому представляет особый интерес для исследований.

5. Разработка модели изменения станком с ЧПУ точности обработки. На базе схемы потери машиной работоспособности, предложенной в общем виде профессором А.С.Прониковым, разработана модель изменения станком с ЧПУ точности обработки с учетом погрешностей, присущих как обычным станкам (геометрических Δ_r , от упругих деформаций $\Delta_{\text{ж}}$, от быстро протекающих процессов Δ_b , от процессов средней скорости Δ_c и от медленно протекающих процессов Δ_m), а также погрешностей, присущих только станкам с ЧПУ и отражающих их специфику (погрешности программирования $\Delta_{\text{пр}}$, наладки на программу Δ_n , автоматической смены инструмента $\Delta_{\text{си}}$, позиционирования $\Delta_{\text{поз}}$). Общая погрешность обработки на станках с ЧПУ $\Delta_{\text{ст}}$ есть функция многих переменных

$$\Delta_{\text{ст}} = f(\Delta_{\text{пр}}, \Delta_n, \Delta_{\text{поз}}, \Delta_{\text{си}}, \Delta_r, \Delta_{\text{ж}}, \Delta_b, \Delta_c, \Delta_m).$$

Указанные погрешности имеют разный характер и величину, по-разному проявляются во времени и приводят к снижению поля допуска на обработку.

6. Вывод аналитических зависимостей, связывающих показатели технологической надежности δ_T , $P(t)$ и K_T с параметрами точности станка и обрабатываемых деталей. В работе дан метод определения этих показателей на примере станка с ЧПУ модели 6520-43.

К концу межналадочного периода $T_{\text{мн}}$ резерв станка с ЧПУ по точности обработки δ_T с учетом вероятностного сложения погрешностей равен

$$\delta_T = (\delta - \Delta_{\text{пр}}) - [(\Delta_r + \Delta_{\text{ж}}) + \sqrt{\left(\frac{\Delta_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{поз}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{си}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_b}{2}\right)^2} + \bar{\Delta}_c + \sqrt{\left(\frac{\Delta_n'}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{поз}}'}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{си}}'}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_b'}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_c}{2}\right)^2}], \quad (I)$$

где Δ_n' , $\Delta_{\text{поз}}'$, $\Delta_{\text{си}}'$ и Δ_b' - значения погрешностей Δ_n , $\Delta_{\text{поз}}$, $\Delta_{\text{си}}$, Δ_b в конце межналадочного периода $T_{\text{мн}}$. Коэффициент резерва станка с ЧПУ по точности обработки K_T в конце межнала-

дочного периода равен

$$K_T = \frac{\delta - \Delta_{\text{пр}}}{(\Delta_r + \Delta_{\text{ж}}) + \sqrt{\left(\frac{\Delta_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{ноз}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{сн}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{б}}}{2}\right)^2} + \bar{\Delta}_c + \sqrt{\left(\frac{\Delta'_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_{\text{ноз}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_{\text{сн}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_b}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_c}{2}\right)^2}} \geq 1. \quad (2)$$

При шестисигмовом диапазоне рассеивания размеров вероятность безотказной работы $P(t)$ равна

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left\{ \frac{(\delta - \Delta_{\text{пр}}) - [(\Delta_r + \Delta_{\text{ж}}) + \sqrt{\left(\frac{\Delta_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{ноз}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{сн}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{б}}}{2}\right)^2} + \bar{\Delta}_c]}{\frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{\Delta'_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_{\text{ноз}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_{\text{сн}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_b}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta'_c}{2}\right)^2}} \right\}, \quad (3)$$

где Φ - нормированная функция Лапласа ($0 \leq \Phi \leq 0,5$);

$\bar{\Delta}_c$ - математическое ожидание центра рассеивания размеров в конце межналадочного периода (при $t = T_{\text{мн}}$).

Третья глава "Исследование погрешностей, формирующих показатели технологической надежности и определяющих начальную точность станка с ЧПУ" посвящена расчету и экспериментальному определению погрешностей программирования, наладки на программу, от упругих деформаций, геометрических и позиционирования. Основную долю из указанных погрешностей составляют погрешности позиционирования, достигающие 89 мкм при двухстороннем позиционировании и 27 мкм при одностороннем.

Основным фактором, влияющим на точность позиционирования, является температура масла гидросистемы. Нагрев масла за первые 1,5 ч с 20 до 51°C приводит к увеличению рассеивания отклонений при двухстороннем позиционировании на 51 мкм (на всей длине хода салазок) за счет роста зоны нечувствительности при реверсе. Возникновение зоны нечувствительности объясняется зазором в зацеплении шестерен редуктора и упругими свойствами привода (главным образом - увеличением сжимаемости масла в гидроцилиндре при нагреве). Это было подтверждено также и при исследовании повторяемости, которое показало, что даже при небольших интервалах перемещений салазок при подходе к точкам слева и справа всегда есть "недобег", и смещение центра группирования размеров увеличивается в зависимости от длины интервала перемещения (при интервале 8 мм смещение центра около 15 мкм, при 24 мм - около 13+15 мкм, при 40 мм - около 18+19 мкм, при 80 мм - около 22+23 мкм). Характер рассеивания отклонений во всех опытах при позиционировании не зависит от интервала перемещений и близок к нормальному, что было подтверждено про-

веркой опытного распределения с теоретическим при помощи критериев согласия.

С целью получения информации о точности позиционирования непосредственно по результатам обработки предложен метод оценки точности позиционирования путем обработки ступенчатой детали. Метод позволяет оценить точность позиционирования станка одновременно по двум координатам, дает большую статистику (до 30-ти размеров на каждой детали) и может применяться в производственных условиях.

Четвертая глава "Исследование влияния системы управления на технологическую надежность станка с ЧПУ" посвящена исследованию влияния электронной и механической части системы управления (СУ) на точность станка с ЧПУ модели 6520-ФЗ. Электронная часть станка с ЧПУ преобразовывает кодированную информацию в декодированную, т.е. в электрические сигналы, поступающие на исполнительные двигатели приводов. Таким образом, выходные параметры электронной части СУ являются входными параметрами ее механической части. Исследование параметров СУ (величины рассеивания углов при отработке шаговым двигателем импульсов) показало, что рассеивание углов у шагового двигателя (ШД), отсоединенного от механической части СУ составляет около 30% ($\pm 0,15^\circ$) от регламентированного паспортом допуска $\pm 0,5^\circ$. Однако, при подсоединении к ШД механической части СУ (цепи: "редуктор-задающий винт") рассеивание увеличивается до $\pm 0,6^\circ$, т.е. механическая часть СУ влияет на увеличение рассеивания углов при отработке ШД импульсов.

Значительные погрешности имеют и отдельные звенья механической части СУ, которые обуславливаются точностью изготовления и сборки поводковых устройств, редуктора, задающего винта, рычага, шупа и золотника (боковой зазор шестерен редуктора составляет $0,6 \pm 0,9^\circ$), погрешность поводковых соединений при передаче вращения с вала ШД на задающий винт носит синусоидальный характер и меняется в пределах $0 \pm 2,9^\circ$, накопленная погрешность шага задающих винтов достигает 14 мкм, периодическая - 7 мкм. Влияние указанных погрешностей приводит к искажению управляющей информации и снижению точности выхода рабочего органа в заданную координату. В работе даны рекомендации по повышению точности механической части системы управления (по повышению точности поводковых соединений, уменьшению бокового зазора шестерен редуктора и снижению погрешностей задающих винтов).

Пятая глава "Исследование изменения станком с ЧПУ точности обработки за межналадочный период и оценка уровня его технологической надежности" посвящена исследованию влияния тепловых деформаций на точность обработки, расчету показателей технологической надежности и определению степени влияния отдельных погрешностей на уровень технологической надежности станка.

Анализ литературных источников, а также проведенные исследования показали, что основными факторами, снижающими точность обработки на станках с ЧПУ за межналадочный период, являются тепловые деформации. С целью определения причин возникновения тепловых деформаций, их величины и взаимосвязи с температурными полями измерение тепловых деформаций и температурных полей проводилось одновременно (в комплексе). Температура измерялась самописцами типа КСП-4 и термометрами с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$. Измерение расширения шпиндельной бабки, колонны и ее наклона проводилось индикаторами с ценой деления $0,001$ мм, установленными на жесткой конструкции, которая была независимой от станка и служила постоянной базой отсчета. Такой метод позволил измерять пространственные смещения (наклон и расширение) во времени отдельных узлов станка как на холостом ходу, так и при обработке, а также по показаниям индикаторов графо-аналитическим способом рассчитать расширение шпиндельной бабки, наклон и расширение колонны. Измерение тепловых деформаций и температурных полей проводилось в каждом опыте в течение 7-8 ч непрерывной работы станка на холостом ходу с частотами вращения 100, 200, 400, 630, 800, 1000, 1250 и 1600 об/мин в течение десяти месяцев в различное время года (с целью определения влияния температуры окружающего воздуха на тепловые деформации). Для определения величины зоны рассеивания тепловых деформаций и для повышения достоверности исследований каждый опыт повторялся от 7 до 15 раз (на каждой из указанной выше частоте). При частоте вращения от 100 до 1600 об/мин отклонения шпинделя изменяются в диапазоне от 6 до 96 мкм. Температурная стабилизация наступает через 7-8 ч при включении станка и через 10-13 ч после выключения.

Основным источником тепловыделений станка является шпиндельная бабка, которая нагревается до 53°C при 1600 об/мин, что приводит к ее расширению и смещению шпинделя на значительную величину. Расширение колонны незначительное (до 23 мкм), причем только половина этой погрешности влияет на смещение

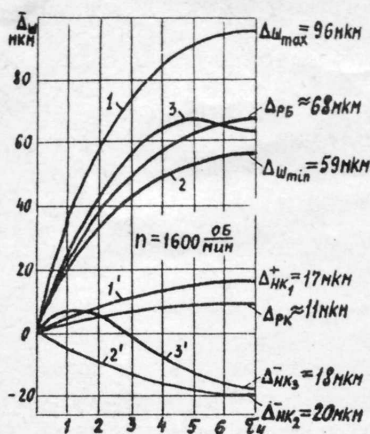


Рис.1. Отклонение шпинделя и колонны при различных температурных режимах

шпинделя вперед. Тепловые деформации приводят к наклону колонны назад или вперед, уменьшая или увеличивая тем самым величину отклонения шпинделя. "Покачивание" колонны при обработке приводит к неустойчивости получаемых размеров. Экспериментально установлено, что "покачивание" колонны зависит в основном от перепада температуры воздуха в помещении. При резком возрастании температуры наклон колонны вперед достигает 17 мкм при 1600 об/мин (кривая 1') и отклонение шпинделя максимальное ($\Delta_{ш\max} = 96$ мкм, кривая 1, рис. 1).

Когда температура воздуха в помещении высокая и почти не изменяется при работе станка, колонна наклоняется назад до 20 мкм

(кривая 2'). При этом отклонение шпинделя минимально ($\Delta_{ш\min} = 59$ мкм, кривая 2). Но, как показали эксперименты, в большинстве случаев температура в помещении колеблется. При этом происходит "покачивание" колонны (кривая 3') и закон отклонения шпинделя во времени отличается от кривых 1, 2 и носит более сложный характер (кривая 3).

В соответствии с разработанной математической моделью величина отклонения нижнего конца шпинделя $\Delta_{ш}$ вдоль оси Y выражена через тепловые деформации основных узлов станка

$$\Delta_{ш} = \Delta_{рб} + \Delta_{рк} \pm \Delta_{нк}, \quad (4)$$

где $\Delta_{рб}$ и $\Delta_{рк}$ - тепловые расширения шпиндельной бабки и колонны; $\pm \Delta_{нк}$ - наклон колонны (вперед или назад), отнесенный к концу шпинделя. С учетом формулы (4) максимальное (кривая 1) и минимальное (кривая 2) отклонения шпинделя описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \Delta_{ш\max} &= \Delta_{рб} + \Delta_{рк} + \Delta_{нк} = (C_{рб} + C_{рк} + C_{нк}) \cdot (1 - e^{-0,5\tau}) = \\ &= (68 + 11 + 17) \cdot (1 - e^{-0,5\tau}) = 96(1 - e^{-0,5\tau}). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{ш\min} &= \Delta_{рб} + \Delta_{рк} - \Delta_{нк} = (C_{рб} + C_{рк} - C_{нк}) \cdot (1 - e^{-0,5\tau}) = \\ &= (68 + 11 - 20) \cdot (1 - e^{-0,5\tau}) = 59(1 - e^{-0,5\tau}). \end{aligned} \quad (6)$$

Для наиболее характерного случая (кривая 3) отклонение шпинделя $\Delta_{ш}$ во времени описывается уравнением

$$\Delta_{ш} = \Delta_{РБ} + \Delta_{РК} + [\Delta_{НК}] = C_{РБ}(1 - e^{-\delta_1 \tau}) + C_{РК}(1 - e^{-\delta_2 \tau}) + [C_1(1 - e^{-\delta_2 \tau}) - C_2(1 - e^{-\delta_1 \tau})] = (C_{РБ} + C_{РК} - C_2) \cdot (1 - e^{-\delta_2 \tau}) + C_1(1 - e^{-\delta_1 \tau}) =$$

$$= (68 + 11 - 85)(1 - e^{-0,5 \tau}) + 67(1 - e^{-1,1 \tau}) - 6(1 - e^{-0,5 \tau}). \quad (7)$$

Экспериментальное определение степени влияния тепловых деформаций на точность обработки показало, что смещение шпинделя вследствие тепловых деформаций полностью передается на деталь. Так, например, погрешность обработки деталей-образцов при 1000 об/мин достигает 60 мкм через 6 ч.

Экспериментально показано, что величина температуры и тепловых деформаций при обработке алюминиевых сплавов и при работе станка на холостом ходу одинакова, поэтому результаты исследований тепловых деформаций на холостом ходу можно распространять и на случаи обработки легких сплавов.

В результате проведенных исследований был разработан алгоритм и программа расчета на ЭВМ показателей δ_T , $P(t)$ и K_T . Определяя численные значения показателей при различных величинах погрешностей можно оценивать уровень технологической надежности

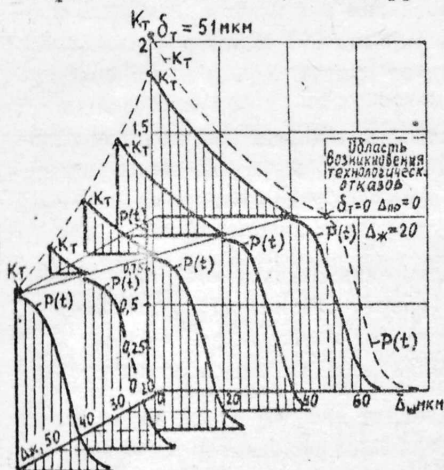


Рис. 2. Изменение показателей K_T и $P(t)$ в зависимости от тепловых и упругих деформаций

сти станка за данный межналадочный период, а также прогнозировать изменение станком точности обработки при эксплуатации.

На рис. 2 показано изменение показателей δ_T , $P(t)$ и K_T при варьировании одновременно двумя погрешностями — от тепловых и от упругих деформаций. В начальный момент работы станка (при $\Delta_{ш} = 0$ и $\Delta_{ж} = 20$ мкм) показатель $K_T = 2,04$, $P(t) \approx 1$, $\delta_T = 51$ мкм. В этом случае технологические отказы начинаются при $\Delta_{ш} \geq 40$ мкм (с учетом погрешности прог-

раммирования $\Delta_{пр} = 10$ мкм). При $\Delta_{ж} = 30, 40$ и 50 мкм отказы наступают соответственно при $\Delta_{ш} = 30, 20$ и 10 мкм, а при $\Delta_{ж} = 60$ мкм отказ наступает сразу при включении станка. Из анализа формул (2) и (3) видно, что при варьировании одновременно двумя погрешностями $\Delta_{ш}$ и $\Delta_{г}$, $\Delta_{ж}$ и $\Delta_{г}$ результаты будут аналогичны рассмотренному случаю, когда варьируются погрешности $\Delta_{ш}$ и $\Delta_{ж}$. Таким образом, при обработке деталей на станках с ЧПУ, зная закон изменения и величину погрешностей (например, от тепловых и упругих деформаций), можно задавать такие режимы резания, при которых не будут возникать технологические отказы, и тем самым управлять точностью технологического процесса, не давая ему опускаться за установленный по точности уровень.

Численные значения показателей K_T и $P(t)$ для любого промежутка времени можно также определять, подставляя в формулы (2) и (3) математические зависимости (5) и (7), описывающие закон смещения шпинделя во времени при различных условиях работы станка (с учетом времени года и температурного режима в помещении).

Низкая надежность станка в области повышенных режимов (при $n \geq 800$ об/мин) приводит к необходимости искать пути ее повышения, поскольку требуется обеспечить резерв точности у станка для компенсации действия медленно протекающих процессов. Проведенные исследования технологической надежности станка с ЧПУ и получение численных величин показателей δ_T , $P(t)$ и K_T позволили найти простой и эффективный путь повышения надежности — путем снижения тепловых деформаций (охлаждения шпиндельной бабки и задней стенки колонны). Охлаждение шпиндельной бабки двумя вентиляторами с боков и одним сверху позволило исключить полностью смещение шпинделя при $n \leq 630$ об/мин и снизить смещения с 96 до 36 мкм (при 1600 об/мин) и с 65 до 7 мкм при 800 об/мин.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод оценки уровня технологической надежности станков с ЧПУ. Дан анализ формирования во времени точности технологического процесса обработки деталей на станках с ЧПУ и основных видов погрешностей, характерных для этих станков, определена последовательность и содержание этапов расчета технологической надежности с учетом специфики станка и системы управления.

2. На базе схемы потери машиной работоспособности разработана модель изменения станком с ЧПУ точности обработки, в которой учитываются погрешности, присущие станкам с ЧПУ и отражающие их специфику (погрешности программирования, наладки на программу, автоматической смены инструмента, позиционирования). Модель позволяет получать аналитические зависимости, связывающие показатели технологической надежности δ_T , $P(t)$ и K_T с параметрами точности конкретного станка и обрабатываемых заготовок.

3. Применение метода разработки структурных схем технологической надежности станков с ЧПУ позволило проанализировать процесс формирования во времени параметров точности обработки с учетом специфики станка и системы управления, выбрать и обосновать наиболее характерный для исследования параметр, лимитирующий технологическую надежность станков вертикальной компоновки — "точность размера по координате Y". Показано, что этот параметр формируется всем комплексом станка и системы управления, которая играет при этом важную роль.

4. Экспериментально определено, что электронная часть СУ (цепь: "Устройство ЧПУ — ИЩ") вносит незначительную часть погрешности в работу СУ в виде рассеивания углов, достигающего $\pm 0,15^\circ$ (по паспорту $\pm 0,5^\circ$) при отработке ИЩ импульсов, и что основная доля погрешности обуславливается механической частью СУ: погрешностями редуктора (боковым зазором в зацеплении шестерен, достигающим $0,6 \pm 0,9^\circ$); поводковых устройств ($0 \pm 2,9^\circ$) и задающих винтов, в результате чего искажается управляющая информация, передаваемая на золотник. Кроме того, подсоединение механической части задающего устройства (цепи: "редуктор — золотник") вызывает увеличение рассеивания углов до $\pm 0,6^\circ$.

5. Экспериментально определены доминирующие погрешности, снижающие точность обработки и технологическую надежность станка — погрешности позиционирования (одностороннего — 27 мкм, двухстороннего — 89 мкм) и погрешности от тепловых деформаций, достигающие 96 мкм через 6 ч работы на максимальных частотах вращения 1600 об/мин. Увеличение погрешности при двухстороннем позиционировании по сравнению с односторонним происходит во-первых, из-за сжимаемости масла при увеличении его температуры и во-вторых, из-за наличия зазора в редукторе. Для повышения точности позиционирования необходимо: редуктор делать беззазорным или с минимальным зазором в зацеплении; при-

менять систему принудительного охлаждения масла в гидросистеме.

6. Разработан метод оценки влияния тепловых деформаций на уровень технологической надежности станков с ЧПУ вертикальной компоновки, позволяющий определять долю и степень влияния тепловых деформаций станка (и его отдельных узлов) на точность обработки во времени.

7. Разработана модель формирования тепловых деформаций станков с ЧПУ вертикальной компоновки и получены зависимости, связывающие параметры точности обрабатываемых заготовок с тепловыми деформациями отдельных узлов станка. Показано, что у станков вертикальной компоновки отклонение шпинделя вдоль оси "У" зависит от величины расширения шпиндельной бабки и колонны, а также от направления наклона колонны. Причем погрешность из-за наклона колонны может как увеличивать, так и уменьшать общую погрешность $\Delta_{\text{ш}}$ и обуславливается процессом перераспределения температуры по объему колонны. "Покачивание" колонны приводит к нестабильности получаемых размеров при обработке (особенно в холодное время года, когда колонна отклоняется особенно резко).

8. Погрешности от тепловых деформаций переменны во времени и в зависимости от частоты вращения шпинделя (от 200 до 1600 об/мин) достигают максимума соответственно 18+96 мкм через 6 ч работы. При частоте 100 об/мин и ниже нагрев станка и тепловые деформации практически отсутствуют. Основными факторами, влияющими на тепловые деформации узлов и деталей станка являются: частота вращения шпинделя, время работы станка и перепад температуры окружающего воздуха. Величина температуры и тепловых деформаций при работе станка на холостом ходу и при обработке алюминиевых сплавов практически одинакова, поэтому результаты исследований тепловых деформаций станка на холостом ходу можно распространять и на случаи обработки.

9. Разработан алгоритм и программа расчета показателей технологической надежности, позволяющие путем варьирования погрешностями получать численные величины показателей и оценивать уровень технологической надежности станка. Зная величины погрешностей и закон их изменения, можно задавать такие режимы резания, при которых не будут возникать технологические отказы, и тем самым управлять точностью технологического процесса, не давая ему опускаться за установленный уровень, а также прогнозировать потерю станком точности обработки во вре-

мени, т.е. определять как будет расходоваться запас станка по точности за межналадочный период через определенный период эксплуатации.

10. На примере исследуемого станка показано, что его технологические отказы наступают вследствие тепловых деформаций примерно через 5 ч работы на частотах 800+1600 об/мин. Низкая надежность станка в области повышенных режимов приводит к необходимости искать пути ее повышения, поскольку требуется обеспечить резерв точности для компенсации медленно протекающих процессов. В результате проведенных исследований найден простой путь повышения технологической надежности - путем снижения тепловых деформаций шпиндельной бабки, так как она вносит основную долю погрешности. Охлаждение шпиндельной бабки вентиляторами показало, что можно снизить тепловые деформации примерно на 40+80% при высоких частотах вращения шпинделя (800+1600 об/мин) и практически полностью исключить их влияние на обработку при частотах ниже 630 об/мин.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Стародубов В.С., Уколов М.С. О точностной надежности металлорежущих станков с ЧПУ. В сб. "Повышение эффективности программного управления в машиностроении", Ташкент, 1974 г.
2. Стародубов В.С., Уколов М.С. К вопросу о технологической надежности металлорежущих станков с числовым программным управлением. "Надежность и контроль качества", №5, 1976, Москва.
3. Стародубов В.С., Уколов М.С. Оценка технологической надежности станков с цифровым ПУ при эксплуатации. Материалы научно-технической конференции "Методы и средства повышения надежности машин", БелИНТИ, г. Минск, 24-25 марта, 1976 г.