

МФ 7 АС 5

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Иманкулов Уметкул Эсенкулович

УДК 621.9.06

УМЕНЬШЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ
ПРИ ТОЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ
ПО УГЛУ ПОВОРОТА ШПИНДЕЛЯ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иманкулов

Москва 1991 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Бурцев В.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Чернянский П.М.,
кандидат технических наук,
доцент Тропейко Г.Ф.

Ведущая организация - завод "Сетунь" производственного
объединения "Ала-Тоо"

Защита диссертации состоится "27" июня 1991 г.
на заседании специализированного совета К 053.15.15 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Манская ул., дом 5.

в библиотеке МГТУ

экземпляр, заверенный
адресу.

2003 1991 г.

Р.К.Мещеряков

М 497 805

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях интенсивного внедрения в производство высокоскоростного программно-управляемого оборудования, элементов САПР и ГАП, новых высокопроизводительных инструментов, с повышением требований к точности обработки, особенно к точности формы сопрягаемых поверхностей, повышается и требование к достоверности математических моделей, описывающих их.

Из производственных исследований следует, что для тел вращения брак по радиальному биению достигает до 78 %. В теории точности формообразования поверхностей достаточно полное развитие и полезные приложения получили методы расчета систем с постоянными параметрами. При этом погрешность формы детали, вызванная переменностью жесткости по углу поворота шпинделя в наиболее фундаментальных работах рассматриваются и исследуются как погрешность, обусловленная вынужденными колебаниями. Однако, процесс образования погрешностей формы и расположения поверхностей при изменении жесткости по углу поворота шпинделя принципиально отличается от образования этих погрешностей при динамическом и кинематическом возбуждениях колебаний. По той же причине нет точно установленной взаимосвязи между колебанием силы резания и формированием радиального биения поверхности. Указанный недостаток наблюдается и при анализе математических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь между контролируемым фактором (например, профиль поперечного сечения заготовки) и управляемым параметром точности (например, профиль того же сечения детали) в системах автоматического управления.

Отсутствие адекватных математических моделей как следствие недостаточной изученности процесса образования радиального биения поверхности при комбинационном жесткостном возбуждении колебаний с динамическими изменениями жесткости технологической системы является сдерживающим фактором и в создании новых методов обеспечения точности формы и расположения поверхностей детали.

Цель работы разработка и исследование способов уменьшения отклонений формы при точении в условиях переменной жесткости по углу поворота шпинделя на основе изучения физической сущности процесса образования радиального биения поверхности детали.



Методика исследования базируется на основных положениях технологии машиностроения, теории резания, теории колебаний механических систем. Эксперименты выполнены на натуральных объектах, с применением современных методов и средств контроля. Используются методы математического планирования испытаний. Обработка и анализ экспериментальных данных выполнен с применением ЭВМ.

Научная новизна. Установлено влияние неравномерной по углу поворота шпинделя жесткости на радиальное биение поверхности; выявлена причинно-следственная связь между изменением жесткости и формированием погрешности обработки. Раскрыт механизм подвода энергии, питающей вибрацию при переменной по углу поворота шпинделя жесткости.

Практическая ценность. Разработаны методика расчета ожидаемой погрешности радиального биения поверхности, способ и средства управления ее величиной. При этом учтены относительные перемещения инструмента и заготовки при переменной жесткости под действием силы резания и других внешних сил и проявление дополнительной переменной силы, обуславливающей динамическое изменение жесткости. Рассмотрены пути снижения вибрации при переменной жесткости по углу поворота шпинделя, получены соответствующие аналитические выражения, которые можно использовать при машинных экспериментах и расчетах.

Реализация результатов работы. Результаты работы, а также разработанные автором методики исследований используются на кафедре "Металлорежущие станки и инструменты" БИИ для выполнения госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ, проводимых кафедрой совместно с рядом НПО страны. Данные полученные в исследовании использованы в лекциях и лабораторных работах кафедры. На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации по повышению виброустойчивости и стойкости резца, по уменьшению радиального биения обработанной поверхности, способ токарной обработки, которые внедрены на заводе "Сиргизэлектродвигатель".

Апробация работы. Отдельные разделы и работа в целом докладывались на заседаниях кафедры "Технология автоматизированного механосборочного производства" МТУ им. Н.Э.Баумана и кафедры "Металлорежущие станки и инструменты" БИИ; на семинаре "Совер -

пленствование существующих и создание новых процессов изготовления деталей и изделий в машиностроении", 24 - 25 июня 1987 г., г. Москва; а также на научно-технических конференциях: II республиканской "Гибкие автоматизированные производства и промышленные роботы", 25 октября 1988 г., г. Фрунзе; региональной республик Средней Азии и Казахстана "Методы и средства повышения эффективности машиностроительного производства", 30 - 31 октября 1989 г., г. Фрунзе; посвященной 100-летию В.М.Кована "Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий", 1 - 4 октября 1990 г., г. Москва.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 2 машинописные, 3 печатные работы, получены авторское свидетельство и положительное решение на изобретенные способы.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и выводов, изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 8 таблиц, список литературы из 176 наименований, 4 приложений. В приложениях содержатся: программы и примеры расчетов, выполненных на ЭВМ, копии авторского свидетельства и положительного решения на изобретенные способы, справка о внедрении результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, учитывая наиболее полное проявление закона копирования и переноса погрешностей при точении, в качестве объекта исследования выбраны операции однократной и чистовой токарной обработки валов, устанавливаемых в центрах, в патроне и в патроне с поджимом задним центром.

Из литературного обзора следует, что некоторые теоретические положения, касающиеся погрешностей вызванных изменениями жесткости по углу поворота шпинделя и механизма преобразования относительных смещений инструмента и заготовки в погрешность формы детали разработаны в работах Соколовского А.П., Каширина А.И., Сателъ Э.А., Корсакова В.С., Дальского А.М., Кудинова В.А., Подураева В.Н., Альбрехта Р., Багмани В., Опитца Х. и многих других. Особо отмечается вклад Вотинова К.В., предвосхитивший многие поздние исследования.

В результате проведенного литературного обзора выявлено,

что погрешности образуются при переменной жесткости по углу поворота шпинделя в подавляющем большинстве случаев рассматриваются как результат вынужденных колебаний заготовки и инструмента. Связывая пространственные перемещения и погрешности элементов технологической системы через коэффициент динамичности, посредством экспериментов, пытаются учесть те дополнительные погрешности, которые не выявлены при статическом нагружении. Анализ показывает, что существующие математические модели не объясняют ряд результатов экспериментов: если вынужденные колебания преобладают, то почему при увеличении глубины резания прямо пропорционально растут амплитуды погрешностей формы детали и переменной части силы резания (рис. 1); почему в установившемся режиме точения при смещении резца к центру детали ("врезании") сила резания уменьшается, а при отходе увеличивается (рис. 2); почему при точении профиль сечения заготовки не копируется на профиль того же сечения детали, а получаются почти прямые копии изменения податливо и по углу поворота шпинделя (рис. 3)?

На основании изложенного и в соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Разработать математическую модель и методику расчета погрешностей формы и расположения поверхностей шеек валов при переменной в течении оборота шпинделя жесткости.

2. Раскрыть механизм преобразования колебаний центра заготовки и формообразующей вершины инструмента в погрешность профиля в поперечном сечении детали.

3. Раскрыть влияние переменной жесткости по углу поворота шпинделя на устойчивость процесса точения.

4. Разработать рекомендации (методы и средства) по уменьшению радиального биения поверхности.

Во второй главе предложена схема (рис. 4) для расчета изменений радиуса исходной цилиндрической заготовки при изменении жесткости по углу поворота шпинделя под действием силы резания. При увеличении податливости вала с опорами на ΔW , центр вала в этом сечении отходит от положения средней податливости на величину ΔX_0 , а вследствие уменьшения глубины резания на Δt , уменьшается и сила резания на ΔP , которые происходят одновременно со смещением резца на расстояние ΔX_p . Приращение радиуса детали можем найти как алгебраическую сумму этих смещений и выражая их через податливость и силу имеем:

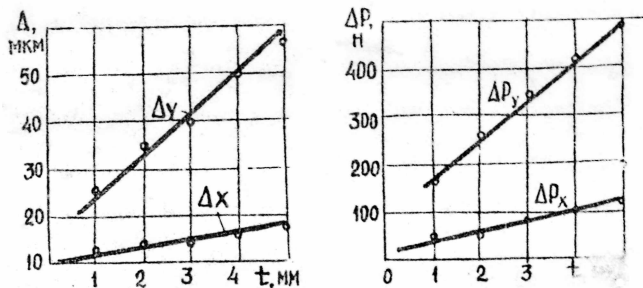


Рис.1. Зависимость амплитуды вибрации и составляющих сил резания от роста глубины резания (по Аблопохину В.А.)

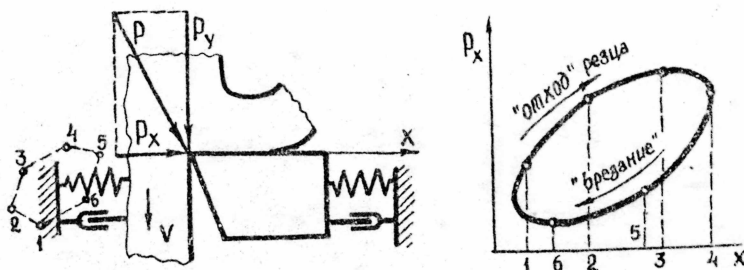


Рис.2. Изменения радиальной составляющей силы резания и смещения резца за один цикл колебаний.

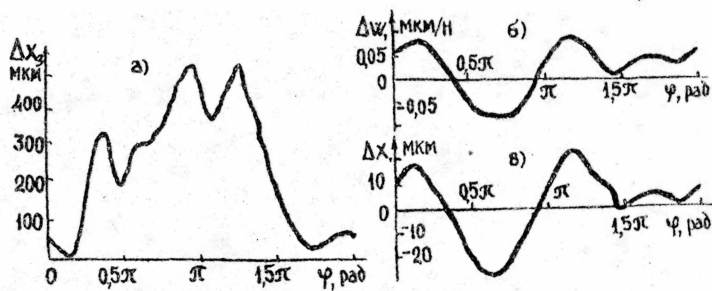


Рис.3. Исходное радиальное биение (а), податливость в том же сечении (б), и профиль поверхности детали после первого точения (в) на круговой развертке.

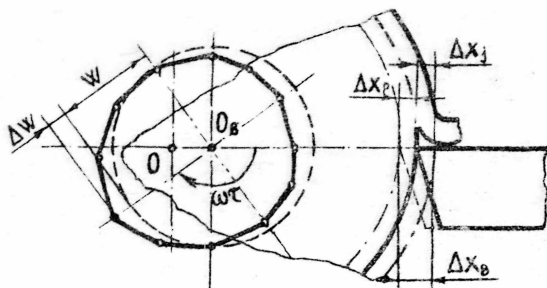


Рис.4. Расчетная схема образования погрешностей формы детали при изменении жесткости по углу поворота шпинделя.

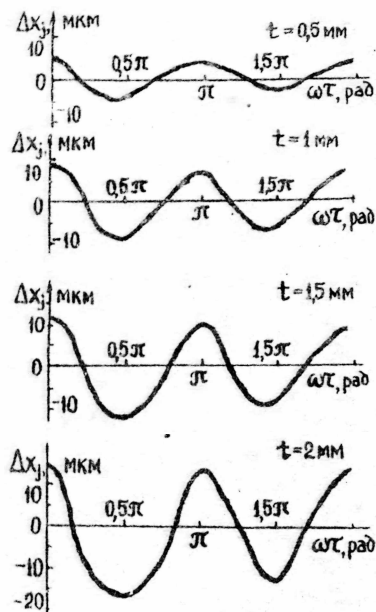


Рис.5. Изменение радиального биения при точении с различной глубиной резания.

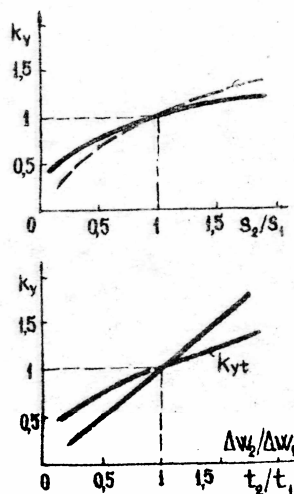


Рис.6. Зависимость коэффициента уменьшения погрешности от соотношений подач, глубин резания и амплитуд переменной части податливости.

$$\Delta x_j = (W_0 + \Delta W \sin \omega \tau + W_c)(P - \Delta P \sin \omega \tau) - P(W_0 + W_c) \quad (1)$$

Пренебрегая произведением $\Delta P \cdot \Delta W \sin^2 \omega \tau$ вследствие его малости, с учетом $P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^y \cdot V^n \cdot k$, принимая с удовлетворительной для практики точностью $X_p = 1$, получим

$$\Delta x_j = P \Delta W \sin \omega \tau / [1 + C_p \cdot S^y \cdot V^n \cdot k (W_0 + W_c) \cdot \sin \omega \tau] \quad (2)$$

где W_0 - постоянная часть податливости подсистемы вал-опоры, ΔW - амплитуда переменной части податливости тех же узлов, W_c - податливость суппорта, ω - угловая частота изменения податливости, τ - время.

Дополнительное изменение радиуса от тангенциального смещения вершины резца и центра детали можно найти из соотношения

$$\Delta x' = \Delta y^2 / 2R \quad (3)$$

здесь R - радиус детали, Δy - суммарное тангенциальное смещение.

При высоких частотах вращения шпинделя с учетом динамических явлений от появляющейся переменной силы ΔP , уравнение (2) имеет вид

$$\Delta x_i = \frac{P \cdot \Delta W \cdot \sin \omega \tau}{1 + C_p \cdot S^y \cdot V^n \cdot k \cdot [W_0 \cdot \mu_0 \cdot \sin(\omega \tau - \varphi_0) + W_c \cdot \mu_c \cdot \sin(\omega \tau - \varphi_c)]} \quad (4)$$

Поскольку трения в стыках отличается от вязкого, для расчета коэффициента динамичности μ и фазового угла запаздывания φ следует использовать формулы, где эти величины ставятся в зависимость от энергетических характеристик трения.

Из уравнений (2) и (4) имеем практически линейную зависимость погрешности Δx_j от глубины резания. Такая зависимость, к примеру показанная на рис. 5, имеет устойчивый характер и наблюдается во всех опытах даже при наличии вибрации. Из этих же уравнений следует, что изменение силы резания происходит не в той мере, в какой происходит изменение жесткости по углу поворота шпинделя, а в той мере, в какой изменяется глубина резания Δt (или погрешность Δx_j).

Определенный интерес представляет изменение переменной части податливости по длине вала. Анализ показывает, что при увеличении средней податливости по длине вала почти пропорционально увеличивается и переменная часть податливости. Этот вывод можно

использовать при расчете погрешности Δx_j , изменяющейся по первой, второй гармонике. При высоких частотах изменения жесткости по углу поворота шпинделя влияние динамических явлений возрастает. В последнем случае необходимо выделять переменную часть податливости в каждом сечении.

Для прогнозирования, анализа и управления точностью обработки деталей разработан алгоритм и программа расчета погрешностей при точении вала применительно к ЕС ЭВМ на языке "Фортран-IV". Общую погрешность в поперечном сечении детали для удобства рассматривали как сумму погрешностей обусловленных: статическими смещениями - Δx_0 , колебаниями припуска (твердости) - Δx_t , переменной в течении оборота шпинделя жесткостью - Δx_j . Исходя из принципа суперпозиции, эти погрешности образования радиуса шейки вала в каждый момент времени суммируются алгебраически. Результаты расчетов выводились в виде таблиц и графиков. Анализ результатов машинного моделирования и натурных экспериментов показал, что погрешность радиального биения поверхности детали, обусловленная изменением жесткости по углу поворота шпинделя составляет основную ее часть (65 - 85 %), причем чем выше сила резания, тем больше доля этой составляющей.

Анализ коэффициентов уменьшения погрешностей (рис. 6), который в условиях переменной в течении оборота жесткости имеет вид: $K_y = \Delta x_{j2} / \Delta x_{j1}$, где Δx_{j1} и Δx_{j2} - соответственно погрешности формы или расположения поверхностей, полученные на двух смежных переходах, позволяет сделать важный вывод. При обработке на одном и том же станке с неизменной установкой, если не происходит уменьшение силы резания (особенно, радиальной составляющей), то не происходит и уменьшение погрешностей радиального биения, что подтверждается и практикой резания.

Третья глава посвящена связи устойчивости процесса точения детали при изменении жесткости по углу поворота шпинделя с погрешностью Δx_j . Интересно проследить колебания сил резания, инструмента и заготовки. Многочисленные осциллограммы показывают, что вал и резец совершают радиальные колебания в одном и том же направлении. Из тех же осциллограмм следует, и это подтверждается всеми экспериментами по автоколебанию, что значение

силы P при "врезании" резца в металл меньше, чем при его "отходе" (рис. 2). Поэтому, как отмечается в третьем томе "Вибрации в технике" : ... "потеря устойчивости и появление автоколебаний возможно только при фазовом отставании силы от смещения". Такое несоответствие можно объяснить тем, что помимо силового возбуждения колебаний, имеют место жесткостное их возбуждение, которое приводит к параметрическому резонансу. При увеличении податливости шпиндельного узла с деталью от своего среднего значения, центр вала смещается на величину Δx_0 (рис. 7 а). В том же направлении на расстояние Δx_0 смещается и резец. Фактическая глубина резания становится равной разности $t_0 - \Delta x_j$, где t_0 - величина среднего припуска на обработку, откуда следует уменьшение силы резания. Затем при повороте заготовки на определенный угол, податливость подсистемы вал-опоры уменьшается, заготовка и резец занимают положение, показанное на рис. 7 б. Поскольку глубина резания в этом положении равна сумме

$t_0 + \Delta x_j$, происходит увеличение силы резания. Заметим, что на приведенную картину накладывается и изменение жесткости в тангенциальном направлении, но суть процесса остается неизменной.

Теперь проследим механизм подвода энергии, питающей вибрацию при переменной жесткости по углу поворота шпинделя. Анализ относительных перемещений детали и инструмента позволяет утверждать, что при увеличении жесткости от ее среднего значения сила резания P совершает большую работу, чем та отрицательная работа, которая совершается при уменьшении жесткости. Отчасти это видно из уравнений (2) и (4), где отрицательная амплитуда Δx_j больше положительной. При линейном росте податливости погрешность Δx_j растет по гиперболической зависимости, причем амплитуда отрицательной ветви синусообразной кривой больше амплитуды положительной ветви. А общее увеличение податливости вызывается ею обусловленными динамическими явлениями.

Для оценки в первом приближении находим относительные изменения потенциальной энергии. По аналогии с коэффициентом поглощения энергии ψ , для характеристики доли энергии, идущей для питания и поддержания вибрации введем понятие коэффициента накопления энергии λ . Тогда этот коэффициент можно найти как отношение разности потенциальной энергии в двух крайних по-

ложениях (т.е. при наибольшей и наименьшей жесткости) к среднему значению потенциальной энергии:

$$\lambda = 2(2C_\Delta W^2 + \Delta W + C_\Delta^2 W^2 \Delta W) / (C_\Delta^2 W^3 + W + 2C_\Delta W \Delta W) \quad (5)$$

где. W - средняя суммарная податливость технологической системы, а $C_\Delta = C_p S^{1/2} \gamma^{n/k}$.

Расчеты и графики изменений коэффициента λ показывают, что его значения могут доходить до 0,85 и стать больше чем ψ . В таких условиях всегда имеется опасная гармоника колебаний жесткости с частотой ω_j , которая оказывается кратной к частоте ω_c собственных колебаний технологической системы. А при наличии кратности $\omega_c/\omega_j = n/2$, где $n = 1, 2, \dots$ можно ожидать параметрического резонанса.

Некоторые результаты точения с появлением вибрации в процессе резания консольно закрепленной в патроне станка детали приведены в таблице I.

Таблица I.

Частота вращения шпинделя	об/мин	560	900	1120	710	900	1120	1400
	герц	9,3	15	18,6	11,8	15	18,6	23,3
Количество	пик/об	54	33	27	53	42	34	27
Частоты собственных колебаний, герц		520			630			
Основные возмущающие гармоники колебаний жесткости		56 35 28	35 28 28	56 28 27	56 35 27	42 28 21	35 23 21	56 28 28
Частоты колебаний жесткости, герц		520 326 260	520 326 260	520 260 260	650 414 318	630 410 315	630 410 315	1260 630 630
Коеф. накопл. энергии		0,6	0,6	0,63	0,6	0,6	0,63	0,7
Отношение частоты собственных колебаний к частоте кол. жесткости		1 1,5 2	1 1,5 2	1 2 2	1 1,5 2	1 1,5 2	1 1,5 2	0,5 1 1

Данные получены при глубине резания 0,5 мм и подач 0,12

мм/об. Частоты собственных колебаний технологической системы находили по частоте вибрации, поскольку они практически совпадают. Частоты колебаний жесткости определялись как произведение частот вращения шпинделя с номером гармоник переменной жесткости. Коэффициент поглощения энергии, найденный при статических нагрузениях был равен 0,62.

Наши исследования показывают, что условия возникновения параметрического резонанса выполняются тем легче, чем меньше отношение собственной частоты колебаний технологической системы к выделяющимся частотам (локальным максимумам) изменения жесткости по углу поворота шпинделя. Например, когда это отношение близко к 0,5, область параметрического колебания оказывается более широкой, а амплитуды в несколько раз большими, чем в других случаях. Характерной особенностью наблюдаемых колебаний является то, что параметрическое колебание (резонанс) сопровождается вынужденными колебаниями, с резонансами при отношении частот равных единице. Таким образом, в общем случае происходит комбинированные колебания, в которых преобладает жесткостное возбуждение.

Установлено, что процесс изменения жесткости по углу поворота шпинделя состоит на 70 - 80 % из периодических составляющих для станков Н - П классов точности. С такой же вероятностью можно прогнозировать появление вибраций при жесткостном возбуждении колебаний.

В четвертой главе показаны пути повышения точности при изменении жесткости по углу поворота шпинделя. Остановимся на обеспечении точности при точении детали путем оптимизации режимов резания. В качестве метода оптимизации был принят метод Нелдера и Мида, который обладает тем преимуществом, что решение может быть найдено для любого вида целевой функции и ограничений с требуемой точностью. В качестве целевой функции рассматривались затраты, обусловленные данной технологической операцией и удельные приведенные затраты.

Ограничения на элементы режима резания приняты: по размерам режущей части инструмента, на минимальное значение глубины резания, на минимальную подачу, по прочности режущей части инструмента, по мощности главного привода движения станка,

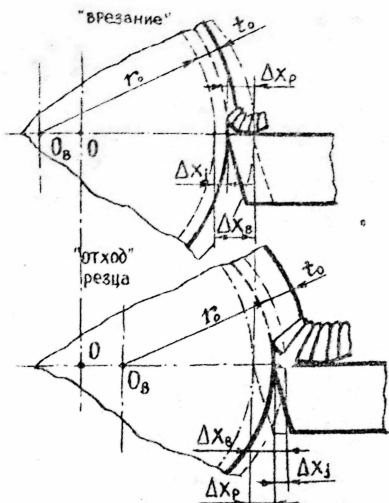


Рис.7. Изменение силы резания при изменении жесткости опор.

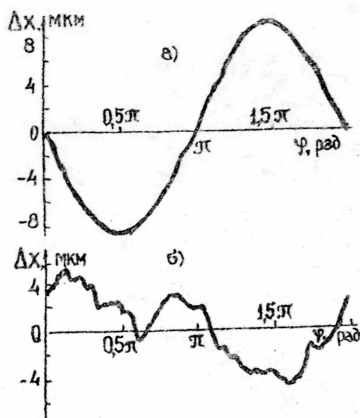


Рис.8. Радиальное биение при точении: а) в центрах, б) с установкой по изобретенному способу.

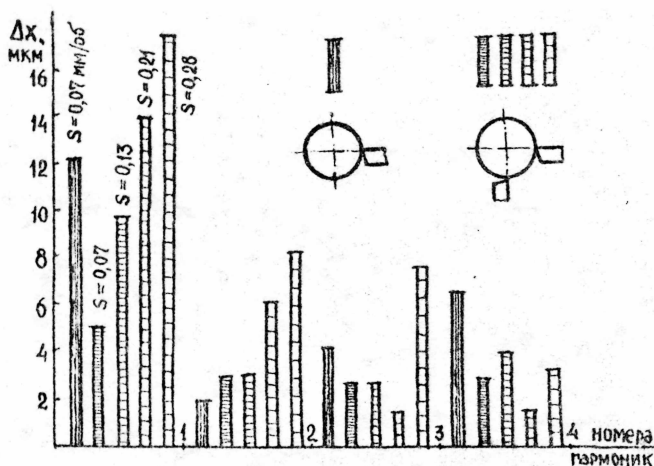


Рис.9. Сравнение амплитуд первых 4-х гармоник радиального биения детали при точении одним и двумя резцами.

по техническим характеристикам станка, по шероховатости обработанной поверхности. При назначении ограничений по точности исходили из разработанной математической модели, при этом учитывались и погрешности, вызванные размерным износом инструмента и температурными деформациями резца в установившемся тепловом состоянии. Расчет погрешностей и других ограничений производится по программе на ЭВМ.

Ограничения по виброустойчивости. Диагностировать колебания податливости в течении оборота можно анализируя радиальное биение детали после обработки с такой же глубиной резания (подачи), как и при основном точении. Далее следует сравнение кратности отношений частот собственных колебаний к частоте изменения жесткости с выделенными локальными максимумами. При кратности 0,5 следует ожидать параметрический резонанс, а при кратности, равной 1 резонанса от вынужденных колебаний. Обычно имеют место одновременно кратности, равные 0,5, 1, 1,5 и 2, поэтому происходит комбинированные колебания, которых необходимо исключить для устойчивого резания.

Входными параметрами являются механические свойства, форма и размеры, их точность, состояние поверхностного слоя заготовки; конструктивно-геометрические параметры инструмент, материалы режущей части, державки, стойкость; кинематические свойства станка, вид приспособления и способ закрепления, характеристики жесткости технологической системы, СОЖ, исходные значения глубины и скорости резания, подачи. Выходными параметрами являются значение целевой функции, оптимальные значения элементов режима резания, значения составляющих сил резания, всех технических ограничений, погрешностей формы и размера и другие необходимые сведения.

Оптимизация режимов резания в условиях, соответствующих однократной и чистовой токарной обработки показали эффективность разработанной программы. Для проверки соответствия расчетных данных с опытными, производили точение валиков с режимами, найденными при оптимизации. Имеется удовлетворительное совпадение.

Для уменьшения погрешности формы детали можно использовать способ установки детали по авторскому свидетельству № 1340912. Повышение точности достигается за счет некоторого защемления концов вала, фиксированной его установки в определенном угловом

положении, возможностью предварительного контроля изменений жесткости по углу поворота шпинделя и исходной погрешности формы детали, их учета при точении.

Как следует из наших экспериментов, подбором углового положения приспособления в шпиндельном узле можно добиться того, что исходная переменная жесткость, обуславливающая радиальное биение детали в виде смещения оси значительно уменьшается (рис. 8).

Для повышения точности формы детали можно рекомендовать способ токарной обработки (положительное решение ИНИИПТЭ по заявке № 4787339/06), согласно которому режущие элементы расположены смещенными относительно формообразующего элемента в направлении подачи, но при этом располагают в одном квадранте с центром, совпадающим с центром вращения заготовки, а угловое положение этих режущих элементов выбирают из условия равенства нулю суммы проекций радиальных и тангенциальных составляющих сил резания с радиальной составляющей силы резания формообразующего режущего элемента. Исследования показали, что для чистовой токарной обработки можно таким образом уменьшить радиальное биение обточенной поверхности до 30 % (рис. 9).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Величина радиального биения поверхности детали формируется как результат действия динамических, кинематических колебаний и переменной по углу поворота шпинделя жесткости. Погрешность, обусловленная последней причиной в ряде случаев превалирует и достигает 80 - 95 % в суммарном балансе радиального биения поверхности.

2. Формирование радиального биения поверхности детали, обусловленного изменением жесткости по углу поворота шпинделя, происходит как результат смещения оси заготовки и формообразующей вершины инструмента в одном и том же направлении. Величина смещения резца при этом всегда меньше смещения оси заготовки. По этой причине, при "врезании" резца (смещение резца к центру заготовки), происходит уменьшение силы резания, а при "отходе" увеличение.

3. Изменение жесткости по углу поворота шпинделя, помимо непосредственного влияния на величину погрешности, обуславливает колебание силы резания, вызванное изменением глубины резания.

как результат возникновения радиального биения поверхности. В конечном итоге это вызывает динамические явления, уменьшающие средние значения жесткости.

4. Величина радиального биения, обусловленная переменной в течении оборота жесткостью, растет прямо пропорционально средней силе резания и величине переменной податливости. Отсюда следует, что с увеличением количества рабочих ходов не происходит уменьшение погрешностей формы и расположения поверхностей.

5. Потерю устойчивости процесса резания при переменной по углу поворота шпинделя жесткости рекомендуется определять сравнивая отношения частоты собственных колебаний технологической системы к частоте изменения жесткости, предварительно выделяя номера высокочастотных гармоник с локальными максимумами податливости. Для токарных станков средних размеров, коэффициент поглощения энергии которых не более 0,6, вибрации надо ожидать в окрестности отношений частоты собственных колебаний к частоте изменения жесткости, равных 0,5, 1 (1,5, 2). При приближении этого отношения к 0,5 происходит жесткостный резонанс, а 1 - резонанс от вынужденных колебаний.

6. Разработана методика управления величиной радиального биения путем оптимизации режимов резания.

7. При поиске оптимальных режимов резания рекомендуется дополнительно учесть ограничения по погрешности формы и параметру виброустойчивости, обусловленные неравномерной по углу поворота шпинделя жесткостью.

8. Для деталей типа валов можно рекомендовать способ установки заготовки по авторскому свидетельству № 1340912 на эксцентриковый передний центр. Ориентированием направления эксцентриситета переднего центра относительно шпинделя можно уменьшить размах колебаний жесткости и как следствие, уменьшить величину радиального биения поверхности.

9. Для уменьшения погрешности формы детали, обусловленной изменением жесткости по углу поворота шпинделя, рекомендуется уменьшать силу резания, особенно ее радиальную составляющую. Это условие обеспечивается в способе токарной обработки (положительное решение НИИПТЭ по заявке № 4787339/08), согласно которому точение производится разделением припуска на несколько режущих элементов, расположенных в одном квадранте, причем их угловое по-

ложение высирают таким образом, что радиальная составляющая силы резания, приведенная к формообразующему режущему элементу оказывается минимальной.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Иманкулов У.Э. Отклонение формы при точении вала, вызванное изменением жесткости по углу поворота шпинделя / МВТУ. - М., 1987. - 10 с. - Деп. в ВНИИТЭМР, 13.05.87, № 222-мш 87.

2. Иманкулов У.Э. Расчет оптимальных режимов точения вала при заданной точности обработки // Совершенствование существующих и создание новых процессов изготовления деталей и изделий в машиностроении. - М., 1987. - С. 108 - 111.

3. Иманкулов У.Э. Параметрическое возбуждение колебаний при точении / МВТУ. - М., 1987. - 24 с. - Деп. в ВНИИТЭМР, 25.12.87, № 558-мш 87.

4. Иманкулов У.Э. Обеспечение точности при изменениях жесткости по углу поворота шпинделя // II Респ. науч.-техн. конф. Гибкие автоматиз. производства и пром. роботы: Тезисы докладов. Труды, 1988. - С. 46 - 47.

5. Иманкулов У.Э. Влияние особенностей жесткости технологической системы на процесс резания // Технол. обесп. качества машиностроительных изделий: Тезисы докл. науч.-техн. конф. посвященной 100-летию В.М.Кована. - М., 1990. - С. 121 - 123.

6. А.с. 1340912 СССР. МКИ В23В23/04. Способ установки детали в центрах / У.Э.Иманкулов // Б.И. - 1987. - № 36.



Подписано к печати 25.04.91 Заказ 438
Объем II п.л. Тираж 100 экз. Ротапринт МГТУ