

На правах рукописи

КОЛОДЯЖНЫЙ Дмитрий Юрьевич

УСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПРИ ПРЕРЫВИСТОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ
ЗАГОТОВОК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Специальность 05.02.08 – технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2012

Работа выполнена в Федеральном бюджетном государственном образовательном учреждении Высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: заслуженный деятель науки Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор,
Мурашкин Сергей Леонидович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Коротких Михаил Тимофеевич;

кандидат технических наук, доцент,
Дмитриев Сергей Иванович.

Ведущая организация: ЗАО «Петербургский тракторный завод»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 21 февраля 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 ФБГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29, в ауд. 41, I учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФБГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 17 января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.26, доктор технических наук,
профессор

Тисенко В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из важных мероприятий, направленных на повышение эффективности машиностроительного производства является снижение расхода металла, за счет применения прогрессивных методов получения заготовок. Примером применения таких методов при изготовлении деталей массового производства является изготовление зубьев зубчатых колес обработкой давлением в горячем и холодном состоянии. В таких технологических системах (ТС), наряду с возможным возбуждением автоколебаний, обусловленных нелинейностью силы резания, имеют место вынужденные колебания вследствие переменной силы резания.

Следует также учитывать, что точность деталей является одним из основных показателей их качества, а стабильное его обеспечение – важнейшим условием надежности любых технологических процессов.

Обеспечение надежности возможно за счет уменьшения амплитуды колебаний до приемлемого уровня. Поэтому повышение эффективности процесса прерывистого резания по качеству и точности за счет увеличения виброустойчивости системы станка является актуальной задачей и представляет значительный практический интерес.

Цель работы. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости движения ТС, снижению уровня вынужденных колебаний при изготовлении деталей с прерывистыми поверхностями и повышение точности обработки.

Методика исследований. Параметры расчетных математических моделей исследуемой ТС определялись с использованием общепринятых методов исследования динамики станков.

Исследование нелинейных колебаний выполнялось аналитическим методом, а также методом Льенара с использованием фазовой плоскости.

Анализ вынужденных колебаний ТС проводился на основании расчета и исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы. Экспериментальная проверка полученных результатов и расчетных данных проводилась в лабораторных и производственных условиях. Силовые зависимости определялись с использованием многофакторного планирования экспериментов.

Научную новизну работы составляют:

- математические модели автономной и неавтономной ТС при прерывистом резании;
- методика определения условий мягкого и жесткого возбуждения автоколебательного процесса;
- зависимости для определения гармонических составляющих периодических сил резания при прерывистом резании и влияния на них режимных параметров;
- расчетные модели для определения АЧХ ТС от воздействия полигармонической силы;

3. Практическая ценность:

- разработан и исследован двойной резец с возможностью регулирования расстояний между вершинами резцов;
- установлено рациональное расстояние между вершинами резца для различных технологических условий, при котором минимизируется амплитуда вынужденных колебаний;
- получены зависимости стойкости двойного резца от режимов резания;
- разработаны промышленные рекомендации по точению наружного диаметра зубчатых колес с учетом параметров технологической системы и режимов резания.
- получены эмпирические зависимости сил резания от режимов резания для стали 40ХН и для стали 30.

Промышленная реализация работы. Двойные резцы, оснащенные многогранными неперетачиваемыми пластинами, внедрены в производство при обработке заготовок зубчатых колес со сформированными зубьями по наружному диаметру на ВГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют", на одном из дочерних обществ ОАО "Кировский завод" и ряде других предприятий Северо-западного региона РФ.

Апробация работы. Диссертационная работа и её отдельные разделы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Технология машиностроения" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), научно-технических совещаниях ОАО "Ленполиграфмаш", ОАО "Кировский завод", на Всероссийских конференциях по проблемам науки и высшей школы в СПбГПУ, на третьей межрегиональной научно-практической конференции в Алтайском государственном техническом университете, на Московском международном форуме по нанотехнологиям в октябре 2011 г.

Публикации. Основные результаты работы изложены в шести печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов и заключения, изложена на 132 страницах, включая: 6 таблиц, 43 рисунка, список литературы из 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость проведения исследований, направленных на повышение эффективности процесса изготовления зубчатых колес с предварительно сформированными зубьями и разработки специального режущего инструмента.

В первом разделе рассмотрены современные тенденции повышения эффективности технологических процессов изготовления зубчатых колес.

Анализ работ по обработке поверхности вершин зубьев заготовок зубчатых колес подтверждает ранее сделанные при оценке актуальности выводы о целесообразности формирования зубчатого венца на этапе получения заготовок. При этом возникают проблемы, связанные с обеспечением устойчивости ТС, минимизацией вынужденных колебаний и точности механической обработки.

Исследованию автоколебаний, имеющих место при обработке металлов резанием и анализу причин их возникновения, посвящены работы А. И. Каширина, А. П. Соколовского, Л. С. Мурашкина, В. А. Кудинова, И.С. Амосова и др. Проведенный анализ показал, что наиболее точно суть происходящих в ТС колебательных процессов можно объяснить и описать математически, используя в качестве одной из основных причины возникновения автоколебаний нелинейную характеристику силы резания.

Устойчивость движения ТС механической обработки можно изучать как аналитическим так и методом Лъенара на фазовой плоскости. Этот метод полностью учитывает нелинейные свойства, присущие данной системе. Ход интегральных кривых на фазовой плоскости позволяет судить о возможном положении равновесия при различных внешних воздействиях. Стационарному положению равновесия отвечает устойчивая особая точка, а колебательному – предельный цикл.

При этом наряду с возможным возбуждением автоколебаний при прерывистом резании имеют место вынужденные колебания вследствие переменной силы резания. Исследованию таких колебаний посвящены работы И.Г. Жаркова Л.С Мурашкина, Л.Н. Бердникова, С.Л Мурашкина, и др.

Отмечено, что при исследовании прерывистого наружного точения снижение динамической силы, действующей на резец, возможно за счет рационального выбора

режимов и условий резания, например, за счет разделения припуска и уменьшения вследствие этого возмущающих сил.

На основании выполненного анализа и в соответствии с поставленной целью настоящей работы сформулированы основные задачи.

1. Разработать конструктивную реализацию процесса резания, обеспечивающую уменьшение силы резания за счет разделения припуска.

2. Разработать методику определения динамических параметров технологической системы и нелинейных характеристик процесса резания.

3. Разработать математическую модель технологической системы при точении диаметра поверхности выступов зубчатого колеса и определить ее параметры.

4. Составить дифференциальные уравнения движения автономной системы токарной обработки.

5. Исследовать на фазовой плоскости методом Ляпунова условия как мягкого, так и жесткого возбуждения автоколебаний и предложить методику по определению рациональных режимов резания.

6. Составить дифференциальные уравнения движения неавтономной системы токарной обработки и определить ее амплитудно-частотные характеристики.

7. Для проверки расчетных данных АЧХ и правильности математической модели, провести соответствующие экспериментальные исследования.

8. Исследовать технологические характеристики процесса токарной обработки наружных диаметров зубчатых колес.

Второй раздел посвящен разработке и предварительному исследованию работы специального резца, обеспечивающего разделение припуска, описана методика определения динамических параметров подсистем технологической системы

Анализ конструкций инструментов для обработки по методу разделения глубины резания позволил создать двойной резец, схема которого приведена на рис. 1. За счет особенностей прерывистой обработки обеспечивается раздельная во времени работа каждого резца.

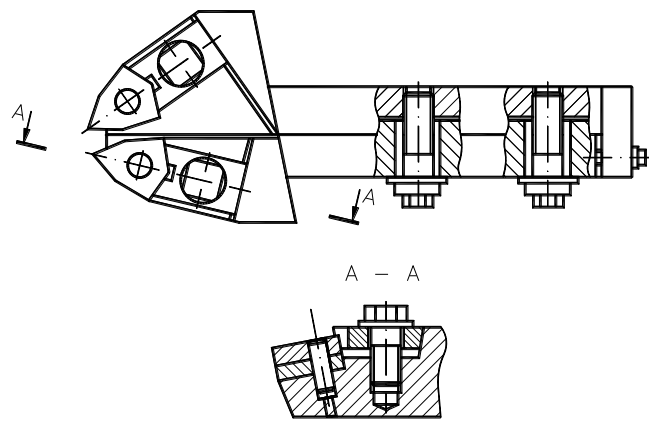


Рис. 1

В результате проведения предварительных экспериментов были определены величины смещений, при которых амплитуда колебаний была наименьшей. Эти смещения оказались близкими к расчетным величинам, полученными исходя из геометрических соотношений между координатой по высоте зуба и толщиной зуба по хорде.

Для проведения исследований выбран типовой представитель токарных станков - станок 16К20. Обрабатываемая заготовка устанавливалась на консольной оправке. Для исследования динамики технологической системы была разработана ее математическая модель

Выбор модели, прежде всего, связан с определением числа степеней свободы. Реальная система металлорежущего станка имеет большое число степеней свободы, каждой из которых отвечает своя собственная парциальная частота. В теории колебаний показано, что можно пренебречь некоторыми степенями свободы, если эти степени связаны с частотами, значительно отличающимися по величине от основных частот технологической системы. Окончательное суждение о правильности принятой модели и значении ее параметров дает сравнение результатов математического анализа с экспериментальными данными.

После определения числа степеней свободы и схемы априорной модели определялись: коэффициенты жесткости подсистем j по диаграмме "нагрузка-перемещение"; частоты собственных колебаний ω для каждой степени свободы; приведенные массы m через коэффициенты жесткости и частоты собственных колебаний; логарифмические декременты Δ собственных колебаний; коэффициент пропорциональности силы сопротивления скорости h ; характеристики сил резания.

Коэффициенты жесткости определялись по известной методике статическим методом, собственные частоты и логарифмические декременты – по осциллограммам затухающих колебаний, вызванных импульсным воздействием. Приведенные массы,

коэффициенты сил и моментов сопротивления, пропорциональных скорости рассчитывались по соответствующим зависимостям.

В разделе описана также методика определения зависимостей составляющих силы резания от технологических параметров.

Третий раздел посвящен определению параметров подсистем и составляющих сил резания.

Анализ частот собственных колебаний подсистем исследуемой априорной модели позволяет согласно теории колебаний обоснованно не учитывать те степени свободы, квадрат собственной частоты которых отличается от квадратов лимитирующих частот систем в 3 – 5 раз. Кроме того, при анализе динамических параметров априорной модели не учитываются те степени свободы, перемещения по которым мало влияют на суммарное смещение резца.

С учетом аналогичных соотношений собственных частот, а также коэффициентов жесткости и пропорциональности силы сопротивления скорости других подсистем, в качестве доминирующей колебательной системы была принята подсистема "резец-резцедержатель-поперечная каретка" в направлении $y - y$ (рис. 2).

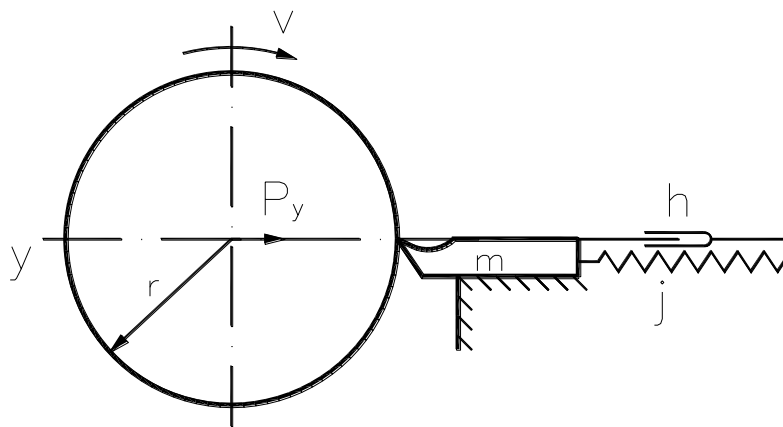


Рис. 2

Для определения силовых зависимостей использовался метод многофакторного планируемого эксперимента 2^3 . Нижний уровень глубины резания принимался равным 0,9 мм, а верхний – 2 мм. Подача варьировалась на двух уровнях – нижний 0,11 мм/об, а верхний - 0,34 мм/об. Скорость резания также изменялась на двух уровнях – нижний уровень 0,67 м/с, а верхний - 2,12 м/с.

В результате обработки результатов экспериментальных данных получены зависимости составляющих силы резания от параметров режима резания для резца, находящегося по центру заготовки при обработке стали 40ХН.

$$\left. \begin{aligned} P_z &= 1015 \cdot t^{0,87} \cdot S^{0,56} \cdot V^{-0,13} \\ P_y &= 649,3 \cdot t^{0,88} \cdot S^{0,57} \cdot V^{-0,10} \\ P_x &= 421,8 \cdot t^{0,89} \cdot S^{0,55} \cdot V^{-0,11} \end{aligned} \right\}$$

Получены также зависимости для резца, находящегося ниже центра заготовки.

$$\left. \begin{aligned} P_z &= 1781,7 \cdot t^{0,77} \cdot S^{0,57} \cdot V^{-0,14} \\ P_y &= 1128,7 \cdot t^{0,76} \cdot S^{0,59} \cdot V^{-0,12} \\ P_x &= 811,59 \cdot t^{0,77} \cdot S^{0,60} \cdot V^{-0,12} \end{aligned} \right\}$$

Аналогичные зависимости были получены при обработке стали 30.

Все эти данные были использованы для исследования устойчивости движения технологической системы и вынужденных колебаний в системе.

Четвертый раздел посвящен разработке математических моделей технологической системы при прерывистом резании и ее анализу.

Как отмечалось ранее исследование вопроса об условиях возникновения автоколебаний, имеющих место при резании металлов на станках, удобно вести с помощью анализа движения системы на фазовой плоскости. Это дает возможность, не прибегая к аппроксимации характеристики силы резания, определить, возможны ли автоколебания в исследуемой системе, и, в случае их существования, параметры - амплитуду и форму. Движение системы с одной степенью свободы описывается дифференциальным уравнением:

$$my'' + hy' + jy = P_y(y')$$

где $P_y(y')$ — нелинейная характеристика силы резания.

Этим методом исследованы условия возбуждения колебательных движений парциальных систем при работе на падающих и поднимающихся участках нелинейных характеристик сил.

В качестве примера на рис.3 приведен фазовый портрет для случая обработки стали 40ХН резцом, находящимся ниже центра заготовки ($t = 1$ мм, $S = 0,34$ мм/об, $V_1 = 0,5$ м/с; $V_2 = 2,16$ м/с). Здесь 1- характеристика силы сопротивления; 2- характеристика силы резания; 3- обобщенная характеристика; 4- интегральная кривая; 5- устойчивый предельный цикл.

В результате построения серии фазовых портретов и их анализа выяснено, что на падающем участке возможно мягкое возбуждение автоколебательного процесса, на

поднимающемся участке, вблизи от падающего – жесткое возбуждение. Участок с ярко выраженным положительным сопротивлением в системе характеризуется устойчивым резанием. Используя метод Льенара, определены параметры режима резания и технологической системы, при которых отсутствуют как мягкое, так и жесткое возбуждение автоколебаний.

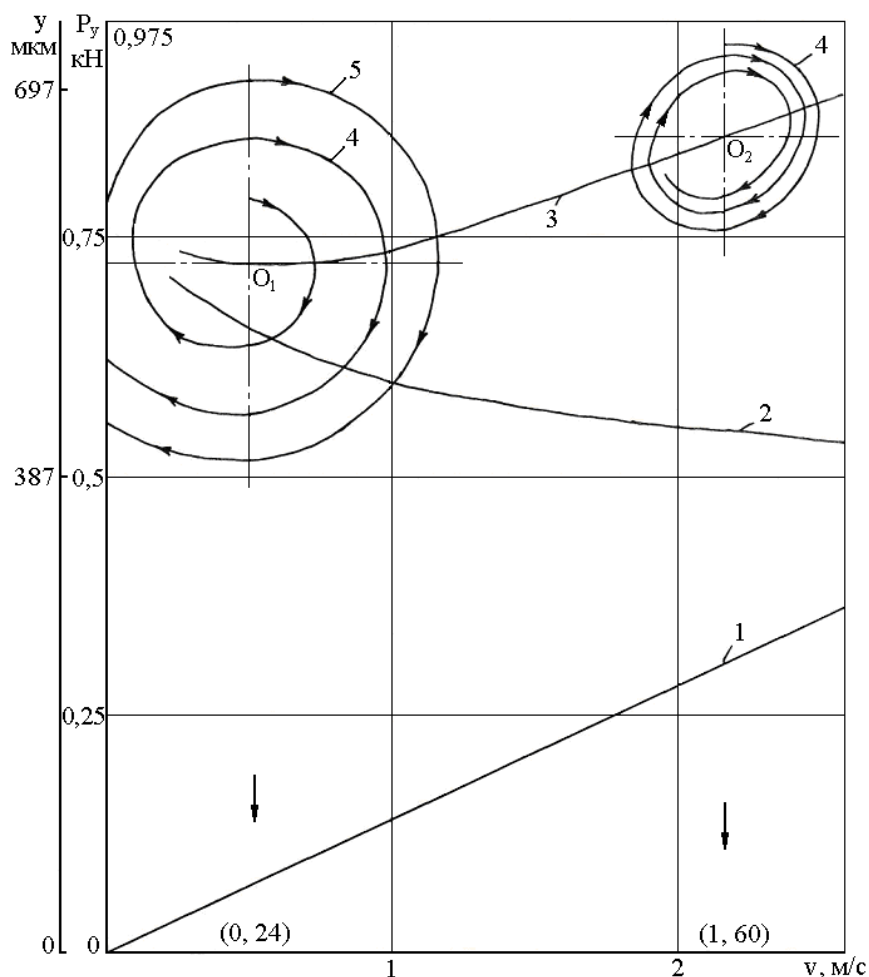


Рис. 3

Было определено, что резец, находящийся ниже центра заготовки, характеризует условия устойчивости движения технологической системы. Установлено, что при обработке стали 40ХН в диапазоне скоростей от 1 до 2 м/с в системе возможно жесткое возбуждение автоколебаний, а при $v > 2$ м/с в системе устанавливается устойчивый режим резания.

Границей устойчивости, отвечающей критическим параметрам режима резания, следует считать $h = |H_1|$, где h - крутизна положительной силы сопротивления, а $|H_1|$ - крутизна характеристики силы в пределах рассматриваемого линеаризованного участка.

При обработке поверхности вершин зубьев возникает периодическая сила, обусловленная прерывистой поверхностью выступов зубчатых колес.

При резании двумя резцами внешняя периодическая сила (рис. 4) выражается в следующем виде:

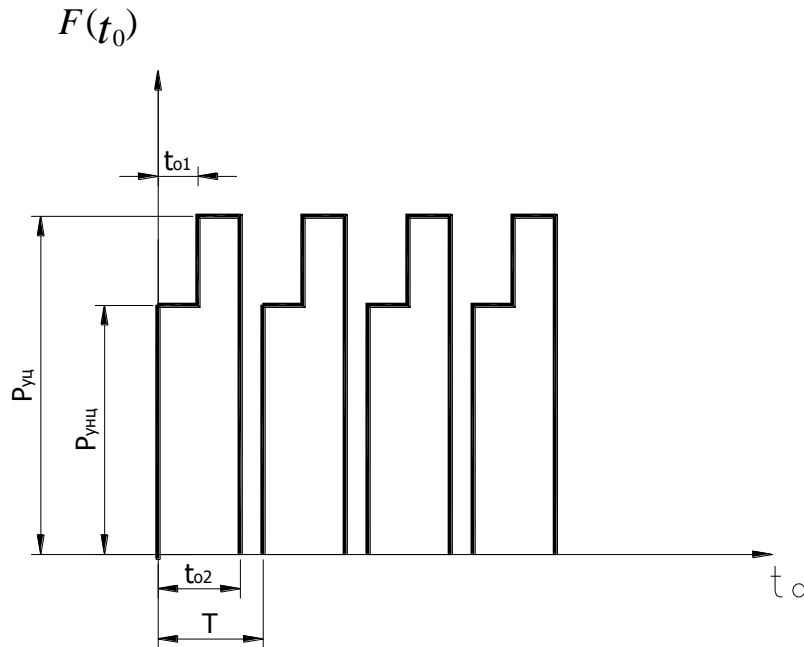


Рис.4

$$F(t_0) = \begin{cases} P_{yц} & 0 < t_0 < t_{01} \\ P_{yн.ц} & t_{01} < t_0 < t_{02} \\ 0, & t_{02} < t_0 < T \end{cases}$$

Здесь: t_{01} — время окончания резания резцом, находящимся по центру заготовки, в каждом цикле; t_{02} — время окончания резания резцом, находящимся ниже центра заготовки, в каждом цикле; T — период внешней периодической силы

Движение технологической системы с одной степенью свободы, находящейся под действием внешней периодической силы, описывается неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$my'' + hy' + jy = P_y + F(t_0)$$

Для аналитического решения в работе характеристика составляющей силы резания P_y аппроксимировалась линейной зависимостью.

$$P_y = P_{y_0} + H_1 y'$$

где P_{y_0} — сила резания при отсутствии колебательного движения, H_1 — крутизна характеристики составляющей силы резания.

С учетом мгновенной глубины резания $t_m = t - y$ известная степенная зависимость составляющей силы P_y от режимных параметров выглядит следующим образом:

$$P_y = C_p \cdot (t - y)^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} + H_1 y'$$

С учетом мгновенной глубины резания $t_m = t - y$ известная степенная зависимость составляющей силы P_y от режимных параметров выглядит следующим образом:

$$P_y = C_p \cdot (t - y)^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} + H_1 y'$$

После разложения $(t - y)^{x_p}$ по формуле Ньютона и подстановки результата в дифференциальное уравнение получим:

$$\begin{aligned} m y'' + h y' + j y = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} - C_p \cdot x_p \cdot t^{x_p-1} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} \cdot y + \\ \frac{1}{2} C_p \cdot x_p (x_p - 1) \cdot t^{x_p-2} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} \cdot y^2 - \\ \frac{1}{6} C_p \cdot x_p (x_p - 1)(x_p - 2) \cdot t^{x_p-3} \cdot S^{y_p} \cdot V^{-n_p} \cdot y^3 + \dots + H_1 y' + F(t_0) \end{aligned}$$

После ввода обозначений: $C_0 = (h - H_1)/m$

$$\begin{aligned} \omega_k^2 &= \frac{j_k}{m} = \frac{j + C_p x_p t^{x_p-1} S^{y_p} V^{-n_p}}{m} \\ \alpha &= \frac{-C_p x_p (x_p - 1) t^{x_p-2} S^{y_p} V^{-n_p}}{2m} \\ \gamma &= \frac{-C_p x_p (x_p - 1)(x_p - 2) t^{x_p-3} S^{y_p} V^{-n_p}}{6m} \\ B_0 &= \frac{C_p t^{x_p} S^{y_p} V^{-n_p}}{m} \end{aligned}$$

дифференциальное уравнение примет

$$y'' + C_0 y' + \omega_k^2 y + \alpha \cdot y^2 + \gamma \cdot y^3 - B_0 = \frac{F(t_0)}{m}$$

Пренебрегая квадратичными и кубическими степенями по перемещению, получим:

$$y'' + C_0 y' + \omega_k^2 y - B_0 = \frac{F(t_0)}{m}$$

После разложения периодической функции $F(t_0)$ в ряд Фурье уравнения примет вид:

$$y'' + C_0 y' + \omega_k y = \frac{1}{m} \left\{ \frac{1}{T} [P_{y_u} t_{0_1} + P_{y_{н.ч}} (t_{0_2} - t_{0_1})] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{T} \cdot \left[\frac{P_{y_u}}{k\omega_B} \sin k\omega_B t_{0_1} + \frac{P_{y_{н.ч}}}{k\omega_B} \sin k\omega_B (t_{0_2} - t_{0_1}) \right] \cos k\omega_B t + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{Tk\omega_B} [P_{y_u} (1 - \cos k\omega_B t_{0_1}) + P_{y_{н.ч}} (\cos k\omega_B t_{0_1} - \cos k\omega_B t_{0_2})] \sin k\omega_B t \right\}$$

Решением уравнения является следующее выражение:

$$y = \frac{a_0}{2J_k} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k \cos(k\omega_B t_0 - \varphi_k) + b_k \sin(k\omega_B t_0 - \varphi_k)}{m\sqrt{(\omega_k^2 - k^2\omega_B^2)^2 + (2C_0 k\omega_B)^2}}.$$

Амплитуда вынужденных колебаний подсистемы:

$$A = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{m\sqrt{(\omega_k^2 - k^2\omega_B^2)^2 + (2C_0 k\omega_B)^2}}$$

Сдвиг по фазе:

$$\varphi_k = \arctg \frac{2C_0 k\omega_B}{\omega_k^2 - k^2\omega_B^2}$$

Учитывая, что технологическая система токарной обработки характеризуется высокими диссипативными силами, расчет АЧХ производился с учетом только первой гармоники $k = 1$.

Формула амплитуд вынужденных колебаний в технологической системе примет следующий вид:

$$A = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{m\sqrt{(\omega_1^2 - \omega_B^2)^2 + (2C_0\omega_B)^2}}$$

Где коэффициенты a_1 и b_1 равны:

$$a_1 = \frac{2}{T\omega_B} [P_{y_u} \sin \omega_B t_0 + P_{y_{н.ч}} \sin \omega_B (t_{0_2} - t_{0_1})]$$

$$b_1 = \frac{2}{T\omega_B} [P_{y_u} (1 - \cos \omega_B t_{0_1}) + P_{y_{н.ч}} (\cos \omega_B t_{0_1} - \cos \omega_B t_{0_2})]$$

По полученным зависимостям были рассчитаны АЧХ технологической системы для двух вариантов обработки зубчатого колеса из стали 40ХН и стали 30. В первом

случае заготовка обрабатывалась одним резцом с глубиной резания 2 мм, а в другом - двумя резцами с глубиной резания 1 мм на каждом из них. При этом скорость резания изменялась от 0,48 до 3,06 м/с, а подача варьировалась от 0,11 до 0,34 мм/об.

В качестве примера на рис. 5,а приведены расчетные АЧХ технологической системы при точении двумя резцами наружной поверхности зубчатого колеса с глубиной резания 1 мм на каждом резце. На рис. 5,б приведена экспериментальная АЧХ для одного из условий (сталь 40ХН, обработка двумя резцами, $S = 0,34$ мм/об, $V = 0,48...3,03$ м/с)

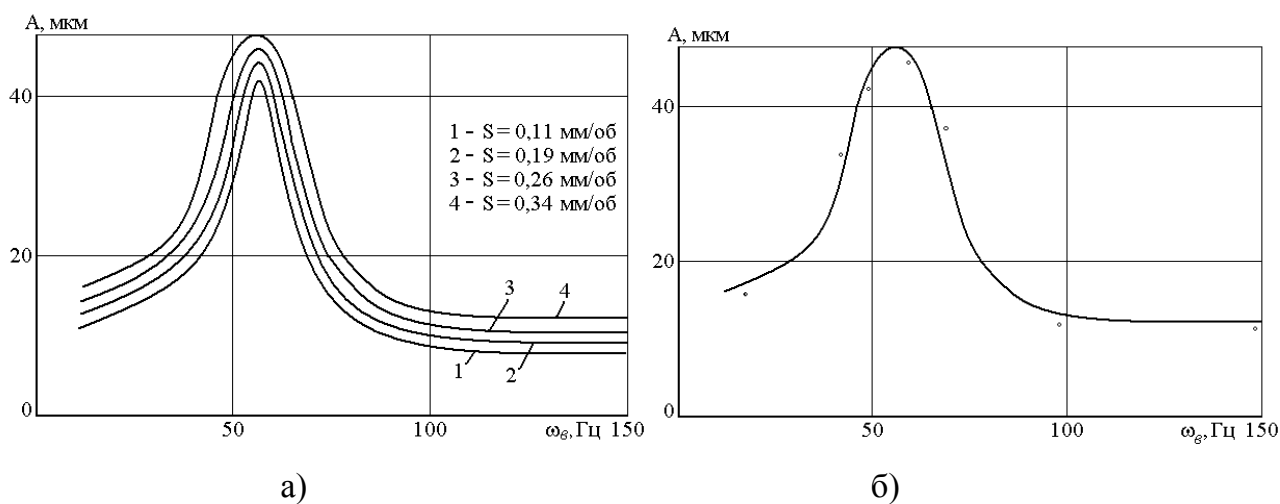


Рис. 5

Сравнение результатов обработки одним и двумя резцами показало, что амплитуда колебаний во втором случае примерно на 40% ниже, чем при обработке одним резцом.

В пятом разделе приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований работы обычного и двойного резцов. Для обоих резцов производилась оценка их стойкости, точности выполнения размеров и шероховатости поверхности. Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке модели 16К20 резцом с пластинками твердого сплава Т5К10.

В работе для оценки стойкости режущего инструмента принималась наиболее часто используемая ее степенная зависимость от скорости резания и подачи. Методом многофакторного планируемого эксперимента типа 2^2 были определены эти зависимости для одинарного резца и для каждой из двух пластин двойного резца. В работе приведены полученные степенные зависимости и построенные по ним графики. Анализ результатов экспериментов показал, что при обработке двойным резцом стойкость больше, чем при обработке одним резцом примерно в 1,5...2,0 раза. Это происходит

благодаря снижению средних сил резания на каждой вершине двойного резца за счет снижения припуска в два раза.

В реальных условиях достаточно часто поверхность вершин зубьев используется как в процессе настройки зуборезного оборудования так в процессе контроля зубчатого колеса. Поэтому точность диаметра поверхности вершин зубьев оказывает влияние и на точность обработки, и на точность аттестации продукции. В работе исследована сравнительная точность обработки поверхности вершин зубьев при использовании одинарного и двойного резцов. На рис. 6,а приведена кривая распределения размеров при обработке одинарным, а на рис. 6,б – двойным резцом. Сравнение результатов при обработке партии заготовок показывает, что при использовании одинарного резца эмпирическое среднее квадратичное отклонение $S = 72,1$ мкм, а поле рассеяния $\omega = 432,6$ мкм, что соответствует 12-му качеству точности.

При обработке двойным резцом эмпирическое среднее квадратичное отклонение $S = 43,2$ мкм, а поле рассеяния $\omega = 259,2$ мкм, что соответствует 11-му качеству точности.

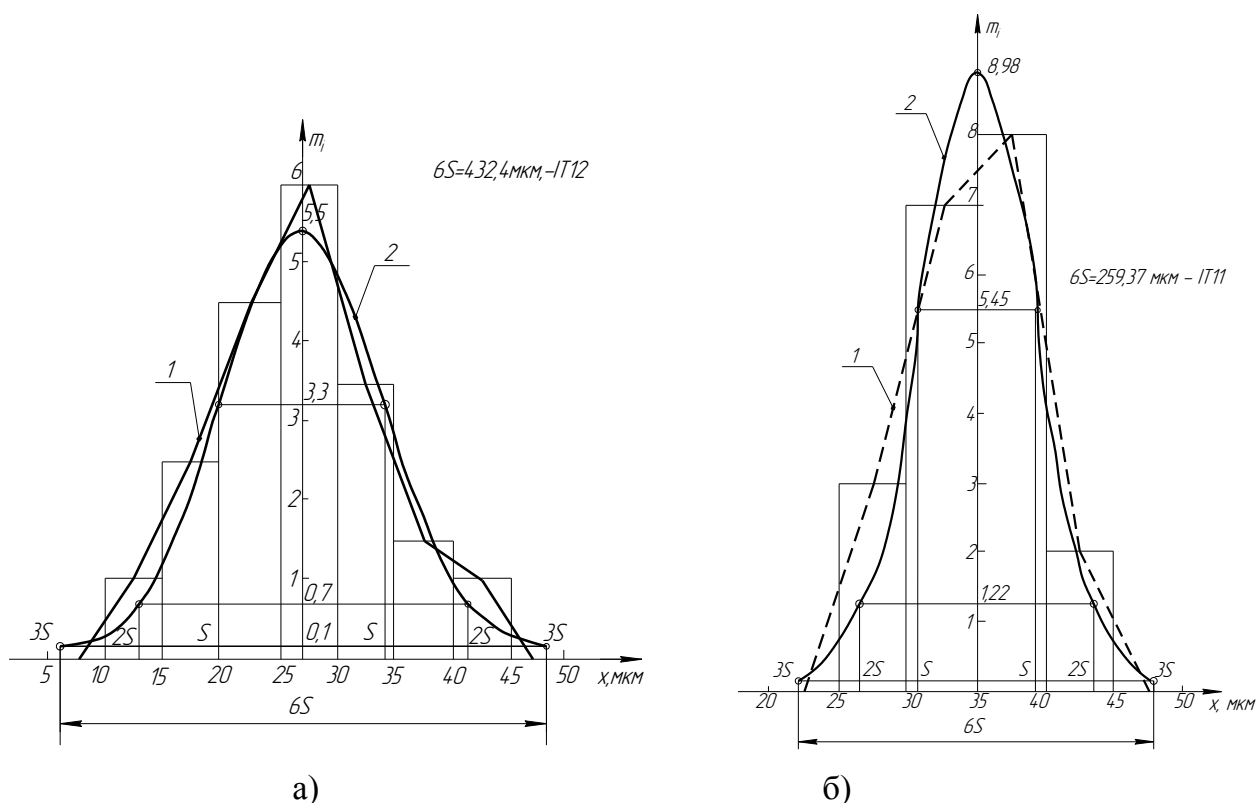


Рис.6

Величина шероховатости поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля R_a) при обработке заготовок одним резцом изменялась в диапазоне от 5,4 до

7,5 мкм. Величина шероховатости поверхности R_a при обработке заготовок двойным резцом изменялась в диапазоне от 2,5 до 4 мкм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований, проведенных в настоящей работе, можно сделать следующие основные выводы:

1. Создана новая конструкция резцов для обработки поверхности вершин зубьев зубчатых колес, обеспечивающая регулирование расстояния между вершинами резцов в направлении глубины резания и в вертикальном направлении. Экспериментально было установлено оптимальное вертикальное расстояние между вершинами резцов, при котором амплитуда вынужденных колебаний является наименьшей.

2. Разработана математическая модель технологической системы токарной обработки зубчатых колес в виде доминирующей подсистемы резец–резцедержатель–поперечная каретка в радиальном направлении.

3. По методу полного факторного эксперимента получены эмпирические зависимости составляющих силы резания от режимов резания для стали 40ХН и для стали 30, как для резца, находящегося по центру заготовки, так и для резца, находящегося ниже центра заготовки.

4. Методом фазовой плоскости исследованы условия возбуждения колебательных движений парциальных систем при работе на падающих и поднимающихся участках нелинейных характеристик сил. Выяснено, что на падающем участке возможно мягкое возбуждение автоколебательного процесса, на поднимающемся участке, вблизи от падающего – жесткое возбуждение. Участок с ярко выраженным положительным сопротивлением в системе характеризуется устойчивым резанием. Используя метод Льенара, определены параметры режима резания и технологической системы, при которых отсутствуют как мягкое, так и жесткое возбуждение автоколебаний. Было определено, что резец, находящийся ниже центра заготовки, характеризует условия устойчивости движения технологической системы.

5. Установлено, что при обработке стали 40ХН в диапазоне скоростей от 1 до 2 м/с в системе возможно жесткое возбуждение автоколебаний, а при $V > 2$ м/с в системе устанавливается устойчивый режим резания. При обработке стали 30 в диапазоне скоростей от 1,75 до 3,85 м/с в системе возможно жесткое возбуждение автоколебаний, а при $V > 3,85$ м/с в системе устанавливается устойчивый режим резания.

6. Разработана математическая модель в виде дифференциального уравнения для подсистемы резец–резцедержатель–поперечная каретка в направлении глубины резания. Аналитическим путем были получены амплитудно-частотные характеристики системы при обработке стали 40ХН и стали 30. Было определено влияние режима резания на амплитуду вынужденных колебаний.

7. Разработаны промышленные рекомендации по точению наружного диаметра зубчатых колес с учетом параметров технологической системы и режима резания.

8. Определено влияние параметров режима резания на стойкость инструмента и получена эмпирические зависимости для определения стойкости инструмента. Установлено, что при обработке двойным резцом стойкость больше, чем при обработке одним резцом примерно в 1,5...2,0 раза. Это происходит благодаря снижению средних сил резания на каждой вершине двойного резца за счет снижения припуска наполовину.

9. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что точность размера при обработке поверхности вершин зубьев двумя резцами выше, чем при обработке одним резцом как минимум на один квалитет.

10. Определено, что происходит уменьшение примерно в два раза средне арифметического отклонения профиля R_a при обработке зубчатых колес двойным резцом по сравнению с обработкой одинарным резцом.

11. В результате проведенных исследований, лабораторных и промышленных испытаний подтверждена эффективность применения двойного резца для обработки поверхности вершин зубьев на токарном станке.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Мурашкин С.Л., Жуков Э.Л., Колодяжный Д.Ю. Устойчивость и надежность процессов обработки материалов резанием. В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, СПбГПУ, 2005. с 249...250.

2. Колодяжный Д.Ю. и др. Обеспечение качества изделий при обработке материалов резанием. В кн.: "Управление качеством образования, продукции и окружающей среды". Материалы третьей межрегиональной научно-практической конференции. АлтГТУ, БТИ, Бийск, 2005, с 168-173.

3. Колодяжный Д.Ю. и др. Колебания и точность технологических систем при прерывистой обработке резанием. В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы X Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб, СПбГПУ, 2006. С. 317-318.

4. Колодяжный Д.Ю. и др. Устойчивость движения технологических систем при прерывистой обработке резанием В кн.: Научно-технические ведомости СПбГТУ № 2, 2006. с. 91-97.

5. Колодяжный Д. Ю. Функциональный анализ периодических возмущений при прерывистом резании.- Двигатель. 2011, № 6 (78), с. 20-21.

6. Д.Ю. Колодяжный и С.Л. Мурашкин. Технологические характеристики прерывистого точения зубчатых колес.- Вестник СГАУ (Самарский государственный аэрокосмический университет). 2011, № 5 (29), с. 150-156.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано к печати

Формат 60 84/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Санкт-Петербургский государственный технический университет

Издательство СПбГТУ

Адрес университета и издательства:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29