

На правах рукописи

УДК 621.91.01

Соколов Денис Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПО ВЫСОТНЫМ И ШАГОВЫМ ПАРАМЕТРАМ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2010

Работа выполнена на кафедре «Технология автоматизированного производства» Московского Государственного Открытого Университета.

Научный руководитель: к.т.н., доц. Скворцов Александр Владимирович

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Сгибнев Анатолий Васильевич
к.т.н., доц. Колчков Вячеслав Иванович

Ведущее предприятие: ОАО «КП (Красный пролетарий)», г.Москва

Защита состоится « 20 » октября 2010 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Телефон для справок: (499)267-09-63

Автореферат разослан « 3 » сентября 2010 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

д.т.н., доцент



Михайлов В.П.

Актуальность Повышение производительности токарной обработки заготовок деталей машин технологическими методами является одной из основных задач производства. Одним из способов решения данной задачи является назначение рациональных режимов обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхности. Решение этой проблемы является особенно актуальной для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД). При производстве дисков, секций, валов, колес и т.д. ГТД доля токарной обработки может составлять до 45% времени изготовления детали. Применение подобных деталей ГТД обуславливает использование жаростойких и жаропрочных сплавов, а работоспособность зависит от статической и усталостной прочности и коррозионной стойкости. Данные эксплуатационные свойства зависят от состояния параметров поверхностного слоя и в значительной степени от параметров шероховатости. Для оценки этих эксплуатационных свойств разработаны теоретические зависимости, где влияние микрогеометрии поверхности задано в виде отношения высотных и шаговых параметров шероховатости. На образование шероховатости при токарной обработке заготовок деталей ГТД влияют несколько причин, одной из которых является значительные по амплитуде автоколебания. Причиной возникновения автоколебаний является труднообрабатываемость применяемых сплавов, обусловленная их физико-механическими свойствами. Однако расчётные методики, позволяющие на стадии технологической подготовки производства (ТПП) определять параметры шероховатости поверхности при токарной обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов (ТОМ), близкие к заданным конструкторской документацией (КД), при назначенных режимах резания практически отсутствуют.

Таким образом, необходима разработка методики определения режимов токарной обработки заготовок деталей из ТОМ, позволяющей обеспечивать заданное отношение высотных и шаговых параметров поверхности на стадии ТПП. В свою очередь, определение режимов обработки должно основываться на влиянии кинематики и геометрии инструмента, вибраций технологической системы (ТС), упругих и пластических свойств ТОМ.

Цели исследования:

- повышение производительности токарной обработки заготовок из ТОМ и обеспечение заданного соотношения высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности,
- сокращение времени ТПП изготовления деталей ГТД с применением токарной обработки.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать уточненную динамическую модель автоколебаний ТС при токарной обработке заготовок из ТОМ, учитывающую режимы резания, геометрию инструмента и физико-механические характеристики ТС.
2. Создать математическую модель формирования микрогеометрии поверхности при токарной обработке заготовок из ТОМ.

3. Разработать программу компьютерного моделирования микрогеометрии поверхности заготовок из ТОМ, которая позволит рассчитывать геометрические параметры шероховатости в продольном и поперечном направлении, выводить результаты в графическом и цифровом виде.
4. Создать методику проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок деталей (типа колец, секций, дисков) из ТОМ, обеспечивающую заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности.

Научная новизна работы заключается:

- в уточнении нелинейной динамической модели, описывающей автоколебания ТС при токарной обработке заготовок из ТОМ, путём определения сил резания, с учётом геометрических характеристик инструмента, а также геометрических и физико-механических характеристик процесса косоугольного несвободного резания;
- в разработанных математических моделях формирования микрогеометрии поверхности токарной обработкой при различных схемах резания, в виде системы линейных уравнений, записанных в ортогональных координатах, определяющих положение режущей кромки в любой момент времени с учетом кинематики движения инструмента, а также относительных вибраций заготовки и инструмента;
- в созданном алгоритме, реализованном в виде программы компьютерного моделирования, которая позволяет рассчитывать полный комплекс параметров микрогеометрии поверхности и выводить результаты в графическом и цифровом виде и определяющей параметры шероховатости в произвольном направлении;
- в разработанной методике проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок из ТОМ, обеспечивающей повышение производительности токарной обработки и заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности, включающей в себя комплекс мероприятий, позволяющий оперативно выбрать условия обработки заготовки.

Практическая ценность и реализация работы

1. На основе разработанных математических моделей формирования микрогеометрии поверхности токарной обработкой, создан алгоритм, реализованный в виде программы компьютерного моделирования, позволяющей рассчитывать весь комплекс параметров шероховатости в любом направлении и выводить результаты в графическом и цифровом виде на стадии ТПП.
2. На основе проведенных исследований и программы компьютерного моделирования разработана методика проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок из ТОМ, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки и заданное, конструкторской документацией, соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности и включающая в себя выбор геометрии инструмента и режимов резания.

3. На ФГУП ММПП «Салют» в цехах №№ 28, 43 использование разработанной методики рекомендовано для изготовления деталей ГТД АИ222, АЛ31ФН. Результаты токарной обработки дисков, секций, колец и валов из сплавов ХН73МБТЮ, ХН62ВМЮТ, ХН60ВТ, полученные в ходе испытаний с использованием данной методики, позволили повысить производительность обработки на 8 – 20% и снизить себестоимость одного мотор-комплекта на 1.5%, что привело к экономии 35 – 40 тысяч рублей на каждый мотор-комплект.

Методы исследования базировались на основных положениях технологии машиностроения, науки о резании металлов, теории колебаний. При проведении экспериментальных исследований использовалось оборудование НИИД при ФГУП ММПП «Салют», которое включает в себя компьютерный вибродиагностический стенд на базе станке с ЧПУ и цифровое оборудование для измерения параметров микрогеометрии обработанной поверхности.

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждена сравнением расчётных данных, полученных с использованием математических моделей, с результатами экспериментальных исследований и данными, полученными в условиях производства, с применением оборудования, прошедшего метрологическую аттестацию.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, 2006 г.), семинаре «Повышение эффективности производства деталей авиадвигателей с применением программы QForm» (ММП им. Чернышева, г. Москва, 2009 г.), на научно-техническом совете ОАО «КП» (Красный пролетарий) (г. Москва, 2009 г.), на кафедре «Технология автоматизированного производства» Московского Государственного Открытого Университета (г. Москва, 2010 г.), на научно-техническом совете ОАО НИАТ (г. Москва, 2010 г.), на кафедре «Технология машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2010 г.).

Публикации автора

По теме диссертации опубликовано четыре статьи, из них по списку ВАК – 2, зарегистрирован патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, общих выводов и списка использованной литературы из 114 наименований. Содержит 153 страницы основного текста, 86 рисунков, 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В введении обосновывается актуальность диссертации и сформулирована основная задача работы.

Первая глава диссертации содержит характеристику объекта исследований, анализ существующих методик расчёта параметров шероховатости поверхности, определение целей и задач исследования.

Детали, применяющиеся в газотурбинных двигателях и установках (ГТД), должны обладать высоким качеством изготовления, термической прочностью и стойкостью. Такие детали, характеризуются сложной геометрической формой переменного поперечного сечения и, в ряде случаев, малой жесткостью. Согласно исследованиям Сулимы А.М., Маталина А.А. и др. параметры поверхностного слоя, особенно параметры шероховатости поверхности, оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. Работоспособность деталей ГТД в большей степени зависит от статической и усталостной прочности и коррозионной стойкости, и оценивается предложенными Суловым А.Г. универсальными теоретическими зависимостями, учитывающими влияние параметров поверхностного слоя - коэффициентом концентрации напряжений и скоростью коррозии. Анализ зависимостей показывает, что влияние параметров шероховатости представлено в виде отношения высотных и шаговых параметров.

Условия работы деталей ГТД обуславливают применение жаростойких и жаропрочных сплавов, содержащих никель и титан. В технологическом плане такие детали являются труднообрабатываемыми. Причинами низкой обрабатываемости являются возникающие при резании высокие температуры и напряжения. Исследования А.И. Каширина, А.П. Соколовского, Д.Н. Решетова, В.А. Кудинова, Жаркова И.Г., Кондратова А.С., Мурашкина Л.С. и др. показывают, что при механической обработке в результате действия различных явлений появляются вибрации, приводящие к снижению качества поверхности, точности обработки, стойкости инструмента. В производственных условиях установлено, что при токарной обработке заготовок из ТОМ сочетание малой жесткости инструмента или заготовки и возникновение значительных напряжений в зоне резания приводят к возникновению автоколебаний и увеличению шероховатости поверхности.

Характеристики микрогеометрии поверхности на стадии ТПП определяют, используя существующие методики расчёта параметров шероховатости поверхности.

По методикам, предложенным Суловым А.Г. и Жарковым И.Г., высотный параметр шероховатости поверхности зависит от геометрии инструмента, режимов резания и амплитуды автоколебаний. Сравнивая предложенные методики, следует отметить, что в методике Сулова А.Г. составляющая, обусловленная геометрией инструмента и его перемещением, находится из геометрических построений, а вибрационная составляющая описывается эмпирической зависимостью. В методике Жаркова И.Г. зависимость носит эмпирический характер, а при описании вибраций

применяется формализованное описание процесса колебаний в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающей нелинейную динамическую модель токарной обработки с учётом автоколебаний.

В настоящее время существуют различные нелинейные модели в виде СДУ, описывающие автоколебания при токарной обработке. Однако в большинстве из них не учитывается геометрия инструмента и физико-механические параметры резания. В тоже время, как показывают исследования Зорева Н.Н., Силина С.С., Кудинова В.А., Кушнера В.С., Горелова В.А., Алтинтаса Ю. и др. влияние геометрических характеристик инструмента и физико-механических характеристик материала заготовки на силу резания очень велико.

На основе анализа имеющихся публикаций установлено, что в настоящее время не разработаны адекватные способы расчёта параметров шероховатости поверхности, образованной токарной обработкой с учётом вибраций инструмента или заготовки. Рассмотренные выше методики не позволяют находить все микрогеометрические характеристики поверхности (не определяются параметры шероховатости в продольном направлении). Они зависят, в основном, от экспериментальных данных, не всегда корректно описывают физическую сущность явлений и поэтому имеют узкие границы применения. Данные зависимости не отражают динамической и кинематической сущности процесса формирования поверхности.

Исходя из выше сказанного, необходимо разработать новый подход к определению параметров шероховатости поверхности, получаемых токарной обработкой ТОМ, основанный на фундаментальных положениях теории колебаний, кинематики и динамики процесса резания.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию формообразования микрогеометрии поверхности токарной обработкой. Уточнена нелинейная динамическая модель колебаний технологической системы при токарной обработке и разработаны математические модели формирования микрогеометрии поверхности при различных схемах резания.

В работе рассматривалась токарная обработка заготовок из ТОМ при чистовом и получистовом продольном, торцевом точении и растачивании при скорости $V=10...50$ м/мин, подаче $s=0.05...0.5$ мм/об и глубине резания $b=0.8...1.5$ мм.

Обработка заготовок из ТОМ в промышленных условиях производится сменными многогранными пластинами (СМП) согласно нормам ISO 1862-1999, поэтому зададим режущую кромку СМП в виде системы уравнений, куда входят её параметры геометрии (Рис.1).

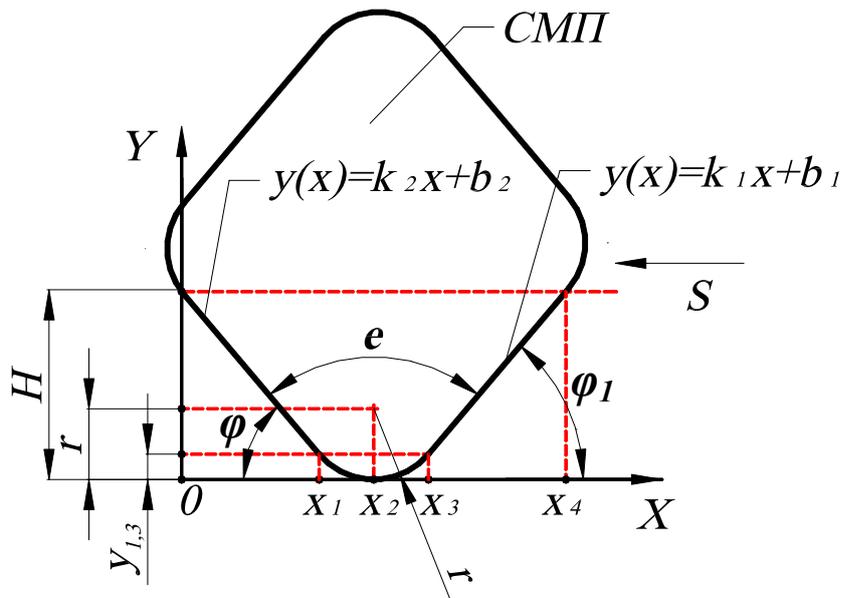


Рис. 1. Представление режущей кромки пластины в ортогональных координатах XOY

Представляем геометрию режущей кромки СМП, как кривую состоящую из участков, заданных в виде функции $f(x)$ в ортогональных координатах XOY:

$$\begin{cases} f_1(x) = k_2 \cdot x + b_2, x \in (0, x_1) \\ f_2(x) = r - \sqrt{r^2 - (x - x_2)^2}, x \in (x_1, x_3) \\ f_3(x) = k_1 \cdot x + b_1, x \in (x_3, x_4) \end{cases} \quad (1)$$

где $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ – координата по OX; k_1, k_2, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения прямых; r – радиус при вершине режущей кромки; $f(x)$ – координата по OY; e – угол при вершине; $\varphi = \varphi_1 = \pi/2 - e/2$ – главный угол и вспомогательный угол в плане.

Данная система уравнений описывает часть СМП с двумя режущими кромками и радиусом при вершине. Высоту максимального припуска H (Рис.1) зададим как $H=2 \cdot r$. Определим значения k_1, k_2, b_1, b_2 через параметры СМП r, e .

$$\begin{aligned} x_1 &= r \cdot (1 + \sin(e/2)) \cdot \operatorname{tg}(e/2); \\ x_2 &= r \cdot ((1 + \sin(e/2)) \cdot \operatorname{tg}(e/2) + \cos(e/2)); \\ x_3 &= r \cdot ((1 + \sin(e/2)) \cdot \operatorname{tg}(e/2) + 2 \cdot \cos(e/2)); \\ x_4 &= 2 \cdot r \cdot ((1 + \sin(e/2)) \cdot \operatorname{tg}(e/2) + \cos(e/2)); \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда

$$\begin{aligned} k_1 &= \operatorname{ctg}(e/2), \\ b_1 &= 2 \cdot r \cdot (1 - \operatorname{ctg}(e/2)) \cdot ((1 + \sin(e/2)) \cdot \operatorname{tg}(e/2) + \cos(e/2)); \\ k_2 &= - \operatorname{ctg}(e/2), \\ b_2 &= 2 \cdot r; \end{aligned} \quad (3)$$

При закреплении СМП в державке её геометрия в плоскости резания изменяется. Система координат XOY режущей пластины поворачивается на

угол w . Тогда в новой системе координат $X'O'Y'$ изменяются углы φ, φ_1 (Рис. 2):

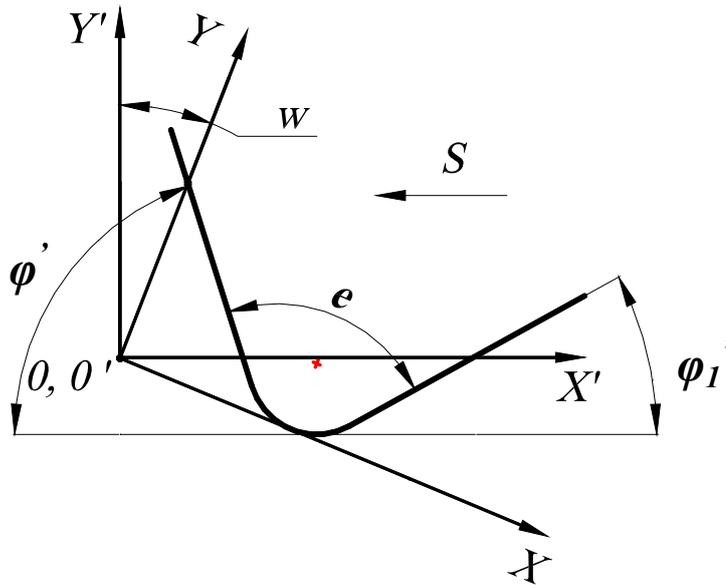


Рис. 2. Положение СМП при закреплении в державке

$\varphi' = (\pi/2 - e/2) + w$ – главный угол в плане; $\varphi_1' = (\pi/2 - e/2) - w$ – вспомогательный угол в плане.

Система уравнений, описывающая геометрические характеристики режущей кромки будет иметь вид:

$$\begin{cases} X_i = x_i \cdot \cos(w) + f(x_i) \cdot \sin(w) \\ Y_i = -x_i \cdot \sin(w) + f(x_i) \cdot \cos(w) \end{cases} \quad (4)$$

где w – угол поворота СМП в державке; $f(x_i), x_i$ – координаты режущей кромки СМП; X_i, Y_i – координаты режущей кромки инструмента.

Представим перемещение режущей кромки инструмента в виде системы уравнений в ортогональных координатах. Данные уравнения описывают положение режущей кромки инструмента относительно начала координат в любой момент времени (t) и зависят от подачи (S), скорости резания (V) и радиуса (R) обрабатываемой заготовки:

$$\begin{cases} X_i(T_i, t_j) = X_i + (S/To) \cdot t_j \\ Y_i(T_i, t_j) = Y_i \\ Z_i(t_j) = (2 \cdot \pi \cdot R/To) \cdot t_j \end{cases} \quad (5)$$

где S – подача инструмента, мм/об; i – номер оборота; X_i – координата точки режущей кромки по оси OX ; Y_i – координата точки режущей кромки по оси OY ; $Z_i(t_j)$ – координата режущей кромки по оси OZ ; R – радиус заготовки, мм; To – время, затрачиваемое заготовкой на один оборот, сек; t_j – текущее время обработки $t_j \in (0, kTo)$, сек., где k – любое целое число.

Автоколебания, возникающие при токарной обработке, опишем уточнённой динамической моделью ТС (маложёсткого инструмента или

заготовки), созданной на основе современных исследований и публикаций. Для большинства упругих систем, совершающих интенсивные колебания, при анализе можно пользоваться единой расчетной схемой, где инструмент (или заготовка) схематизируется как точечная масса с двумя степенями свободы, совершающая колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В каждой из направлений масса подкреплена с помощью упругих и демпфирующих элементов. На массу действуют также возмущающая сила являющаяся результатом взаимодействия режущих кромок инструмента с материалом заготовки (сила резания), которая может быть представлена через ее составляющие F_x , F_y и F_z (Рис.3).

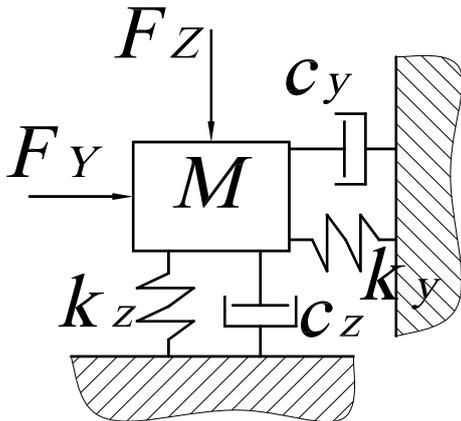


Рис.3. Расчетная схема при токарной обработке

Полученная уточнённая нелинейная динамическая модель автоколебаний технологической системы (ТС) учитывает регенеративный механизм возбуждения колебаний при движении инструмента по поверхности заготовки, образованной на предыдущем обороте, и нелинейную зависимость силы трения от относительной скорости между инструментом и заготовкой. В модели силы резания зависят от геометрических параметров инструмента и физико-механических характеристик косоугольного резания (6).

$$\begin{cases} M_y \ddot{y} - c_y \dot{y} [1 - B \cdot \dot{y}^2] + k_y y = -K_y \tau_s S(b + y(t) - y(t - T_0)) \\ M_z \ddot{z} - c_z \dot{z} [1 - B \cdot \dot{z}^2] + k_z z = -K_z \tau_s S(b + y(t) - y(t - T_0)) \end{cases}, \quad (6)$$

где M_y , M_z - обобщенные массы колебательной системы по осям OY и OZ; B – эмпирический фрикционный коэффициент; $c_{y,z}$ - коэффициенты демпфирования (трения) по осям OY и OZ; k_y , k_z – обобщенные коэффициенты жесткости системы по осям OY и OZ; K_y , K_z - удельные коэффициенты сил резания по осям OY и OZ (учитывают влияние геометрии инструмента физико-механические характеристики косоугольного резания); τ_s – среднее значение касательного напряжения заготовки в зоне резания;

Интегрируя СДУ (6) численными методами с использованием ЭВМ, находим амплитудно-частотные характеристики колебаний ТС при токарной обработке. Колебания (Y_K , X_K) инструмента или заготовки будут сильно влиять на параметры шероховатости только в одном направлении,

радиальном или осевом, поэтому запишем их в виде синусоидального тригонометрического уравнения (для растачивания и продольного точения):

$$Y_K(t) = A_y \cdot \sin(2\pi f t + \chi_0) \quad (7)$$

где Y_K - перемещение инструмента или заготовки; f - частота колебаний ТС; A_y – амплитуда колебаний ТС по оси OY; χ_0 – начальная фаза.

Подставим уравнения (1, 4, 7) в систему уравнений (5). Получим систему линейных уравнений в ортогональных координатах, описывающей положение режущей кромки в любой момент времени (8).

$$\begin{cases} X(T_i, t_j) = (i-1) \cdot (x \cdot \cos(w) + f(x) \cdot \sin(w)) + \left[\frac{S}{T_0} \right] \cdot t_j \\ Y(T_i, t_j) = (-x \cdot \sin(w) + f(x) \cdot \cos(w)) + A_y \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (t_j + T_i)) \\ Z(t_j) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T_0} \right) \cdot t_j \end{cases} \quad (8)$$

Эта система уравнений (8) описывает положение режущей кромки инструмента с учетом относительных колебаний инструмента или заготовки при токарной обработке заготовок из ТОМ в любой момент времени. Следовательно, область значений координат следа инструмента за время T будет представлять собой обработанную поверхность заготовки (Рис. 4).

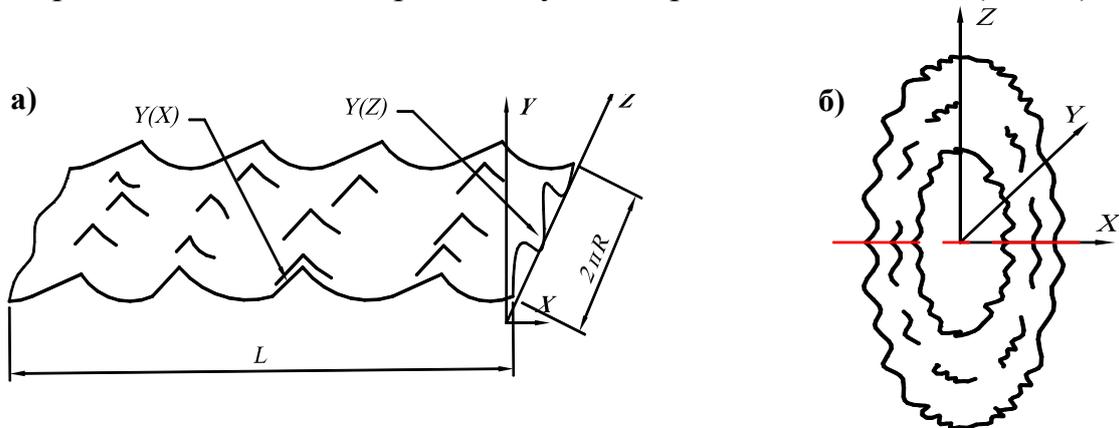


Рис. 4. Геометрическое представление математической модели формирования поверхности:

- а. при продольном точении и растачивании**
- б. при торцевом точении**

Третья глава диссертации посвящена разработке методов расчета и измерения параметров шероховатости поверхности заготовок из ТОМ при токарной обработке. Дано описание диагностического оборудования, применяемого для нахождения переменных экспериментальным путём.

На основе математической модели формирования микрогеометрии поверхности разработан алгоритм определения параметров шероховатости поверхности. Проведен анализ и классификация переменных, входящих в состав моделей (6) и (8). Разработаны экспериментальные и теоретические

методики для их определения. Дано описание оборудования для проведения исследований.

Проведение экспериментальных работ производилось на диагностическом стенде лаборатории технологической диагностики НИИД ФГУП ММП «Салют». В состав стенда входит станок с ЧПУ фирмы Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ системы Fagor 800TGI, трёхкоординатный динамометр-резцедержатель Kistler 9257 BA (на основе пьезодатчиков), трехканальный акселерометр ГлобалТест AP2043-50, многоканальный аналого-цифровой преобразователь USB3000, ПЭВМ (типа PC) и программное обеспечение приема и обработки данных. Для измерения шероховатости обработанной поверхности использовался цифровой профилометр – профилограф Mitutoyo SurfTest SJ – 301, работающий по методу ошупывания поверхности алмазной иглой.

Четвёртая глава посвящена определению экспериментальными методами переменных, входящих в состав моделей (6, 8), подтверждению адекватности разработанных моделей и методик, а также описание экспериментальных исследований влияния кинематики, динамики и геометрии инструмента на параметры шероховатости поверхности при токарной обработке.

Установлена связь между скоростью резания и амплитудой перемещений кромки инструмента через эмпирический фрикционный коэффициент B и проверена адекватность предложенной нелинейной динамической модели колебаний ТС. Для этого обрабатывался торец заготовки маложестким инструментом (с большим вылетом), с изменением скорости резания V при неизменной подаче s и глубине резания b . В осевом и тангенциальном направлениях измерялись амплитуды колебаний инструмента (A_x , A_z) и составляющие силы резания (P_x , P_z). Получены зависимости амплитуды колебаний инструмента A в осевом и тангенциальном направлениях от скорости резания V (Рис. 5).

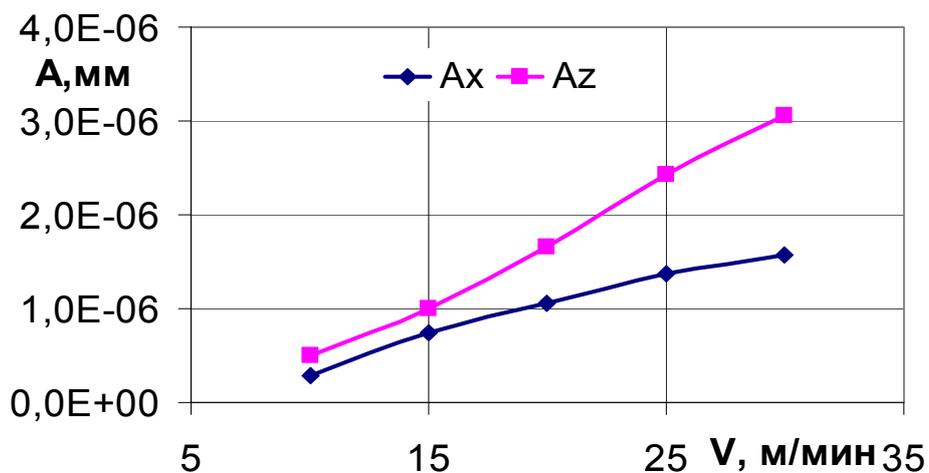


Рис. 5. Влияние скоростью резания на амплитуду перемещений кромки инструмента

Нахождение значений эмпирического коэффициента B осуществляли методом подстановки, интегрируя систему (6) последовательными

приближениями, до совпадения экспериментального значения амплитуды колебаний $A_{Хэксп}$ с расчетным $A_{Храс}$.

Аппроксимируем массив значений $B(V)$ степенной функцией, вида $B = A_I \cdot V^{A_2}$ как наиболее подходящую по виду и имеющую наименьшее среднеквадратичное отклонение $R^2=0,9658$ по сравнению с другими видами аппроксимирующих функций: экспоненциальной ($R^2=0,9462$) или полиномом второй степени ($R^2=0,9219$) (Рис.6):

$$B = 5 \cdot 10^6 \cdot V^{-2,5513} \quad (9)$$

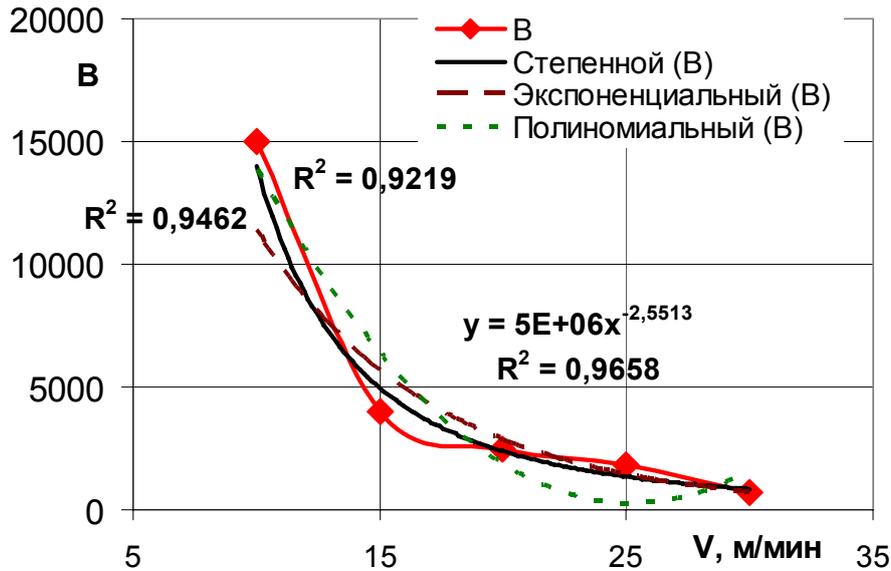


Рис. 6. Зависимость значения коэффициента B от скорости резания V

Адекватность разработанной динамической модели проверялась сравнением расчётных значений составляющих сил резания $P_{X,Y,Z}$ с измеренными величинами.

$$P = K \cdot \tau_{CP} \cdot F, \quad (10)$$

где P – сила резания (одна из составляющих), Н; K – коэффициент силы резания; τ_{CP} – касательное напряжение, МПа; F – площадь среза, m^2 .

Значения коэффициентов сил резания K_X, K_Y, K_Z определяли по методике Горелова В.А., используя данные экспериментов по прямоугольному свободному резанию исследуемого обрабатываемого материала при точении детали с постоянной глубиной резания. При проведении экспериментов использовались специальные образцы в форме трубы. В процессе точения измерялись значения составляющих сил резания $P_{X,Z}$ при различных значениях подачи s_θ , рассчитывалась усадка стружки (ζ). Из полученных результатов были найдены значения касательных напряжений (τ_{CP}). Применяя эти данные, рассчитывали составляющие силы резания $P_{X,Z}$ для диапазона скоростей $V=10...30$ м/мин при $s = 0.1$ мм/об, $b = 1$ мм и сравнивали с полученными экспериментальными значениями.

На Рис.7 видно, что экспериментальные и расчётные значения хорошо согласуются между собой. Следовательно, применяемая расчётная методика может быть использована в данной работе.

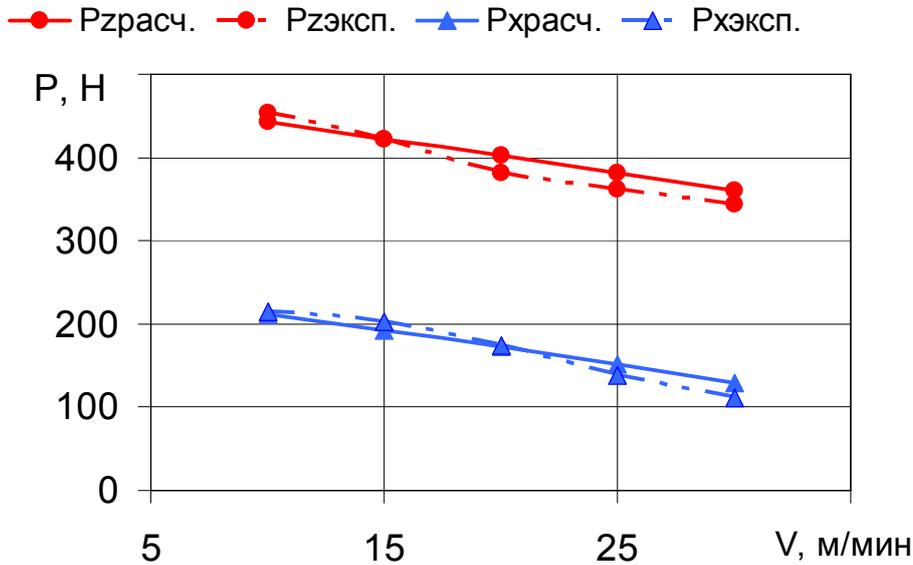


Рис. 7. Экспериментальные и расчётные зависимости сил резания $P_{x,z}$ от скорости резания V

Используя алгоритм определения параметров шероховатости поверхности заготовки и данные, полученные в результате экспериментальных исследований, в среде Matlab создана программа компьютерного моделирования, которая даёт возможность строить трехмерную обработанную поверхность, рассчитывать параметры шероховатости в произвольном направлении и выводить результаты в графическом и цифровом виде.

Следующая часть экспериментальных исследований посвящена влиянию геометрии инструмента, кинематики и динамики процесса резания на высотные (Ra, Rz) и шаговые (Sm, tm) параметры шероховатости поверхности при токарной обработке.

В исследовании использовались две схемы резания: растачивание и торцевое точение (см. Рис. 8).

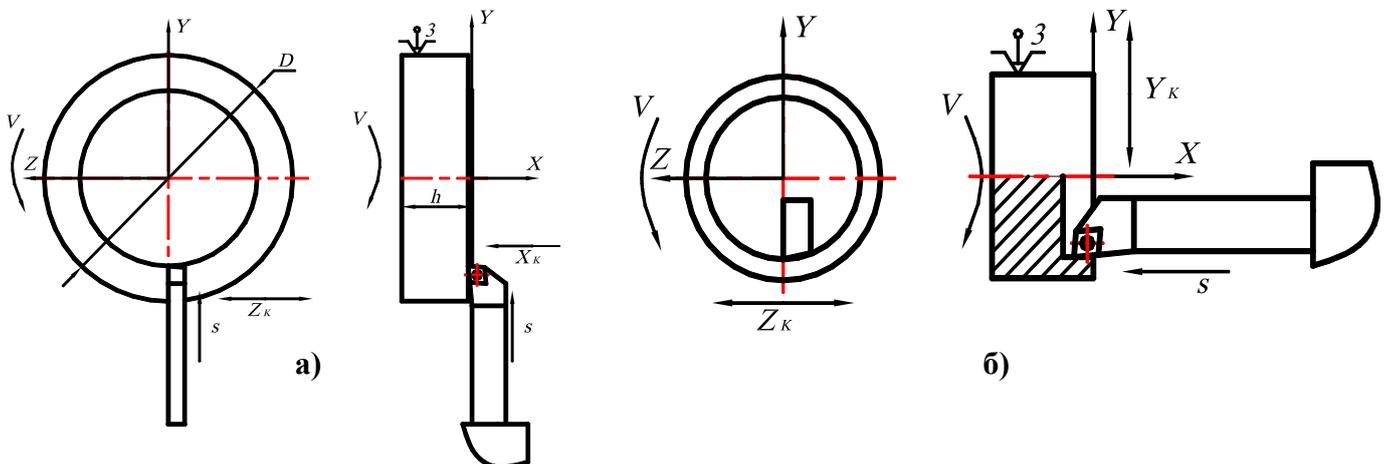
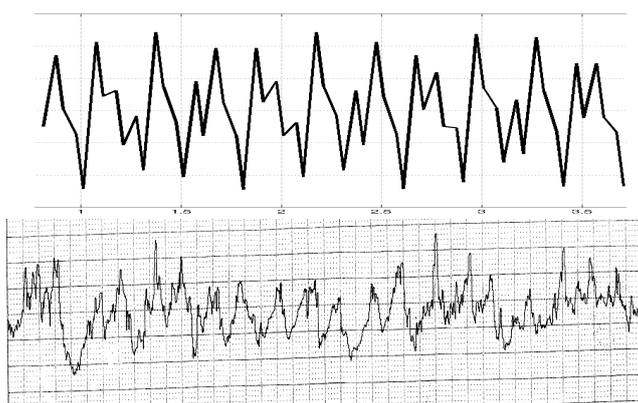


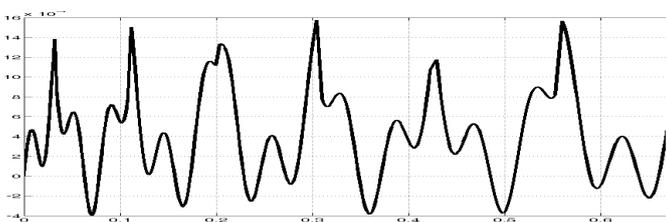
Рис.8. Схемы резания экспериментальных исследований:
 а. ТС№1. Z_k, X_k – амплитуды колебаний инструмента
 б. ТС№2. Z_k, Y_k – амплитуды колебаний инструмента

В ходе эксперимента изменялся вылет инструмента, и измерялись с помощью профилометра высотные и шаговые параметры шероховатости. Параллельно рассчитывали параметры шероховатости, используя программу компьютерного моделирования. Далее расчётные и измеренные значения высотных и шаговых параметров сравнивались.

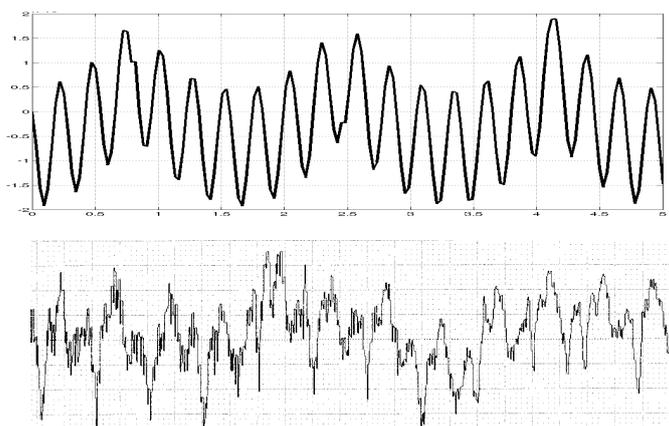
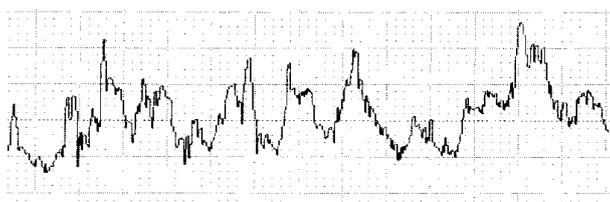
Внешний вид профилограмм (Рис. 9 – 12), а также анализ расчётных и экспериментальных данных (Рис. 13 – 16), проведенный с применением критериев согласия (по Колмогорову А.Н.) закона распределения случайных величин, позволяют сделать вывод о хорошей сходимости значений и адекватности разработанной программы.



а) **Рис.9. Внешний вид профилограммы поверхности в поперечном направлении после торцевого точения при вылете инструмента $L=65$ мм и скорости резания $V=20$ м/мин:**
 б) **а) расчётная,**
б) измеренная



а) **Рис.10. Внешний вид профилограммы поверхности в продольном направлении после торцевого точения при вылете инструмента $L=65$ мм и скорости резания $V=20$ м/мин:**
 б) **а) расчётная**
б) измеренная



а) **Рис.11. Внешний вид профилограммы поверхности в поперечном направлении после растачивания при вылете инструмента $L=90$ мм и скорости резания $V=30$ м/мин:**
 б) **а) расчётная**
б) измеренная

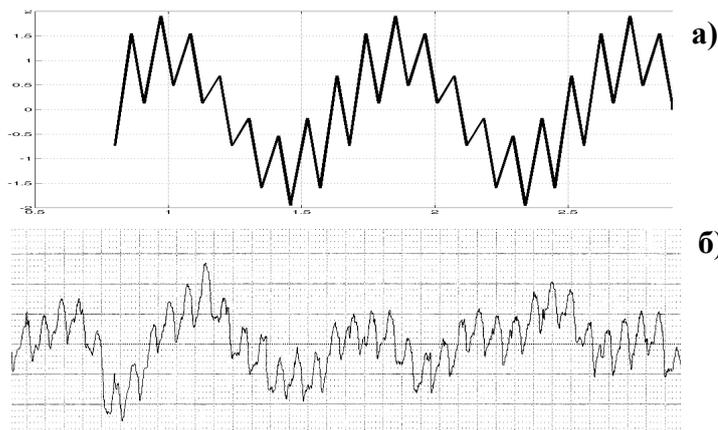


Рис.12. Внешний вид профилограммы поверхности в продольном направлении после растачивания при вылете инструмента $L=90$ мм и скорости резания $V=30$ м/мин:
 а) расчётная
 б) измеренная

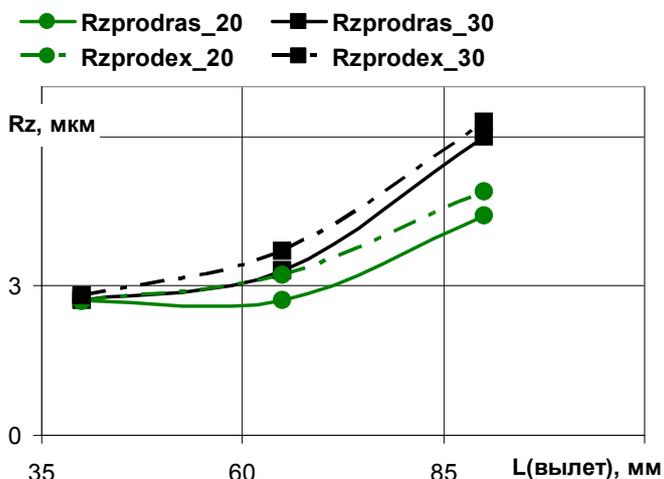


Рис.13. Сравнение экспериментальных ($Rzprodex$) и расчетных ($Rzprodras$) значений высотного параметра продольной шероховатости $Rzprod$

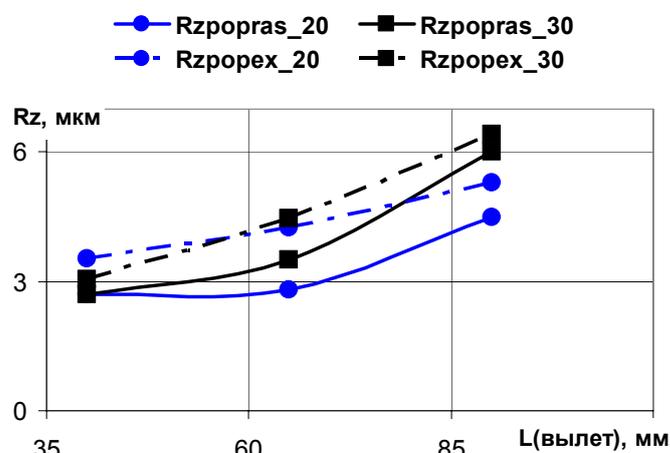


Рис.14. Сравнение экспериментальных ($Rzpropex$) и расчетных ($Rzporpras$) значений высотного параметра поперечной шероховатости $Rzpor$

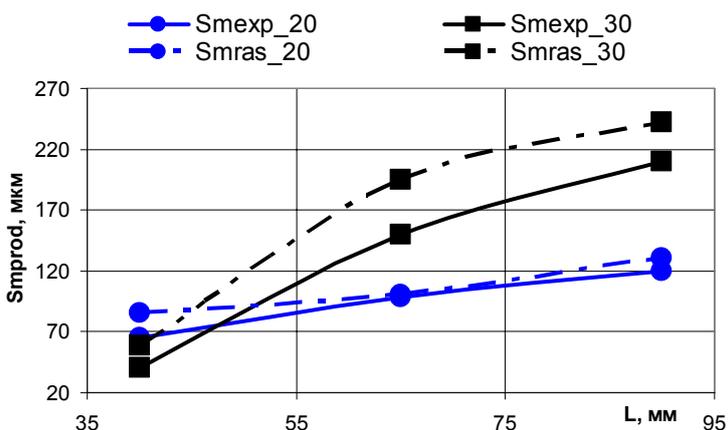


Рис.15. Сравнение экспериментальных ($Smexp$) и расчетных ($Smras$) значений шагового параметра в продольном направлении $Smprod$ при увеличении вылета инструмента

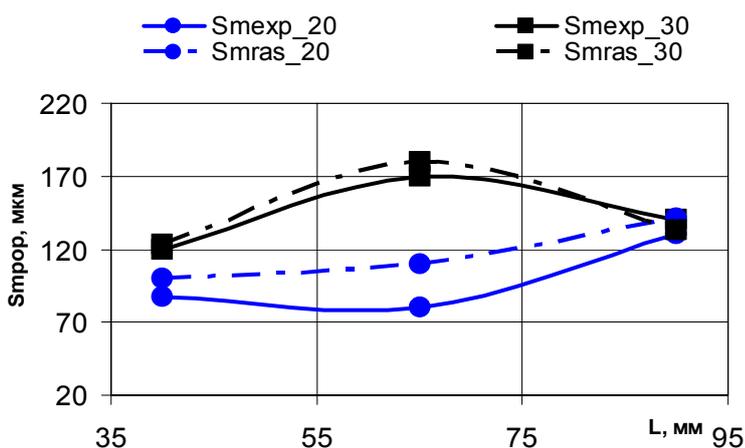


Рис.16. Сравнение экспериментальных ($Smexp$) и расчетных ($Smras$) значений шагового параметра в поперечном направлении $Smpor$ при увеличении вылета инструмента

В пятой главе приводится описание разработанной методики проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок из ТОМ, обеспечивающей повышение производительности токарной обработки и заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности.

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований, и программы компьютерного моделирования, разработана методика проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок деталей из ТОМ, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки и заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости. Методика включает в себя комплекс мероприятий, который позволяет оперативно выбрать условия обработки заготовки. В комплекс входит: технологическая часть (назначение переходов); исследовательская часть (выбор геометрии инструмента, определение области значений удельных коэффициентов резания и средних касательных напряжений, назначение режимов резания); расчётная часть (расчёт параметров шероховатости); проведение опытных работ (обработка опытного образца).

В шестой главе рассмотрен результат внедрения проведенных исследований на примере улучшения производственного ТП изготовления детали жаровой трубы «Секция» двигателя АЛЗ1.

Используя разработанную методику проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок из ТОМ были найдены рациональные режимы обработки, применение которых повысило производительность токарной обработки ТП изготовления детали «Секция» на 20%, уменьшило технологическую себестоимость на 4% и обеспечило заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости базового ТП.

В главе также рассмотрена возможность применения сменных твердосплавных пластин с нестандартной геометрией, запатентованных автором.

Общие выводы по работе:

1. Получена уточнённая нелинейная динамическая модель, описывающая автоколебания ТС при токарной обработке, учитывающая регенеративный механизм возбуждения колебаний при движении инструмента по поверхности, образованной на предыдущем обороте, и нелинейную зависимость силы трения от относительной скорости между инструментом и заготовкой, а также силу резания, которая зависит от геометрических параметров инструмента и физико-механических характеристик косоугольного резания.
2. Получены математические модели формирования микрогеометрии поверхности токарной обработкой для различных схем резания в виде системы линейных уравнений, записанных в ортогональных координатах, описывающих положение режущей кромки в любой момент времени с учетом кинематики движения инструмента и колебаний ТС.

3. Создан алгоритм, реализованный в виде программы компьютерного моделирования, которая даёт возможность рассчитывать полный комплекс параметров шероховатости и выводить результаты в графическом и цифровом виде, что позволяет определять высотные и шаговые параметры в произвольном направлении на стадии ТПП.
4. Выявлена закономерность и установлена совокупная взаимосвязь между динамическими характеристиками ТС, геометрией инструмента и параметрами шероховатости обработанной поверхности заготовки и осуществлена проверка адекватности разработанных математических моделей в сравнении с экспериментальными данными.
5. Разработана методика проектирования технологических переходов токарной обработки заготовок из ТОМ, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки и заданное соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности заготовки, которая включает в себя комплекс мероприятий, позволяющий оперативно выбирать условия обработки заготовки.

Публикации автора.

1. Соколов Д.М. Создание перспективного технологического процесса изготовления лопатки компрессора высокого и низкого давления с применением расчетного комплекса QForm 3Dx64//Повышение эффективности производства деталей авиадвигателей с применением программы QForm: Сборник трудов семинара на ММП им. Чернышева (Москва). 2009. С.26 – 31.
2. Скворцов А.В., Соколов Д.М. Технологическая подготовка производства с применением программных продуктов PLM. //Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 51 – 57.
3. Скворцов А.В., Соколов Д.М. Компьютерный анализ качества и точности производственных процессов в режиме реального времени с использованием программного комплекса VISUAL SPC.//Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 7. С. 25 – 30.
4. Соколов Д.М. Возможности систем 3D графики для технологической подготовки производства//Материалы и технологии XXI века: Сборник статей IV Международной научно-технической конференции (Пенза). 2006. С.306 – 308.
5. Режущее-выглаживающая зачистная пластина: пат. 79471 РФ/Д.М. Соколов, А.В. Скворцов заявл. 20.05.08; опубл. 10.01.09. Бюлл.№1