

4572651

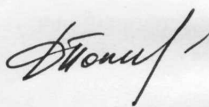
УДК 621.9

На правах рукописи

Попов Дмитрий Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.03.01. Технологии
и оборудование механической и
физико-технической обработки



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2001г.

КФ МГТУ

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор А.И. Созинов

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор П.М. Чернянский
кандидат технических наук В.И. Баранчиков

Ведущая организация – ОАО «Турбинный завод»

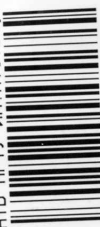
Защита состоится «23» мая 2001г. на заседании диссертационного
совета П.Э.Б. в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бау-

манская набережная, д. 15, в здании библиотеки МГТУ
в библиотеке МГТУ

«23» 2001г.

А.С. Васильев

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1572651

Исследование и
попов Д.В.

1572651

Общая характеристика работы

Актуальность.

Одной из основных проблем изготовления крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов в условиях металлургического производства и их размерной обработки после операций металлургического цикла на машиностроительных предприятиях является низкая производительность процесса черновой обработки резанием, выполняемой традиционно методом точения на токарно-карусельных станках.

Для решения этой проблемы необходим выбор и использование оптимальной кинематической схемы обработки и применение максимальных режимов резания. Обзор литературных источников, изучение отечественного и зарубежного опыта крупнейших предприятий позволили выделить фрезерование внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок торцово-цилиндрической фрезой как наиболее эффективный метод по критерию производительности.

Однако определение предельных режимов резания неразрывно связано с выявлением ограничений, накладываемых величиной и характером срезаемого припуска, возможностями инструмента и технологического оборудования. Это в свою очередь определяет необходимость исследования силовых и температурных параметров процесса резания, износа и стойкости режущего инструмента. Объем имеющихся сведений в данной области недостаточен для практической реализации процесса в условиях производства.

Таким образом, исследование энергосиловых параметров и изыскание возможности повышения производительности черновой обработки методом фрезерования внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов торцово-цилиндрической фрезой является актуальной задачей.

Цель работы.

Повышение производительности черновой обработки на основании теоретических и экспериментальных исследований процесса фрезерования внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов торцово-цилиндрической фрезой с использованием максимальных режимов резания.

Задачи исследования.

- 1) Теоретическое и экспериментальное исследование силовых и температурных параметров процесса фрезерования;
- 2) Выбор оптимального инструментального материала, изучение особенностей износа трущейся пары «инструмент-заготовка»;
- 3) Получение стойкостных зависимостей;
- 4) Разработка конструкции специальной фрезы;
- 5) Разработка предложений по модернизации существующего оборудо-

вания для реализации фрезерования внутренних поверхностей торцовых и кольцевых заготовок из титановых сплавов торцово-цилиндрической фрезой.

Данная работа посвящена методике исследования

В работе использовались методы исследования, базирующиеся на положениях теории резания металлов. В процессе работы применялись стандартные методики установления взаимосвязи силовых, температурных и стойкостных параметров, коэффициента усадки стружки с режимами резания и геометрией режущей части инструмента, исследования особенностей износа трущейся пары «инструмент-заготовка», определения при этом коэффициента трения и выбора марки инструментального материала. Наряду с этим, была разработана методика назначения величины продольной подачи инструмента при обработке внутренних поверхностей кольцевых заготовок торцово-цилиндрической фрезой.

Результаты экспериментов обрабатывались вероятностно – статистическим методом. При обработке результатов использовалась ЭВМ.

Экспериментальные исследования осуществлялись как на универсальном токарном станке мод.16K20, так и на специальной установке для фрезерования кольцевых заготовок, созданной в КФ МГТУ. При этом использовались специально разработанные приспособления (для исследования истирания твердого сплава, получения данных по силовым и температурным параметрам), режущий инструмент, а также измерительная аппаратура.

Научная новизна.

1. Установлена взаимосвязь величины и физико-механических свойств срезаемого припуска, геометрических параметров фрезы, предельных значений скорости резания и толщины срезаемого слоя на основании которой разработана методика назначения величины продольной подачи инструмента, обеспечивающая максимальные значения съема металла при допустимом уровне нагрузок, действующих на станок.

2. Получены теоретические зависимости мгновенных максимальных составляющих силы резания от режимов обработки (скорости резания, подачи на зуб и глубины резания) при фрезеровании внутренних поверхностей вращения торцово-цилиндрической фрезой.

3. Найдены экспериментальные зависимости силы и температуры резания от геометрии режущей части инструмента и режимов резания.

4. Установлены зависимости интенсивности износа и коэффициента трения от величины нагрузки, скорости скольжения, марки твердого сплава для трущейся пары « твердый сплав – титановый сплав» при истирании, как по корке, так и по основному материалу.

5. Получены зависимости стойкости режущего инструмента от режимов резания и геометрии режущей части.

Практическая ценность работы

Показана целесообразность замены растачивания внутренних поверхностей вращения крупных коловых заготовок из титановых сплавов фрезерованием торцовой торцово-цилиндрической фрезой, которая позволит увеличить производительность в 2-3 раза, обеспечив образование короткой транспортабельной стружки, даст возможность получения экономического эффекта.

Полученные экспериментальные и теоретические данные позволили рассчитать необходимые для модернизации существующего оборудования энергосиловые параметры и разработать специальный режущий инструмент.

Реализация работы.

Выполнен комплекс работ по подготовке и промышленному внедрению исследованного метода, включающий в себя:

- разработку конструкции специальной торцово-цилиндрической фрезы для черновой обработки;
- разработку технических требований с целью модернизации существующего оборудования для фрезерования внутренних поверхностей вращения;
- результаты работы приняты к использованию и внедрению на ОАО «Калужский турбинный завод».

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на Российской научно-технической конференции – «Социально – экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологий конструкций в условиях рынка» (г. Калуга, 1997г.), на юбилейной Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборостроении и машиностроении» (г. Калуга, 1999г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Создание прогрессивных технологий конструкций систем и социально-экономические проблемы производства». (г. Калуга, 1998г.), на 1 – ой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию (г.Калуга, 2000г.), на Международной специализированной выставке Intertool (г. Москва, 1998г.), на заседаниях кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, 2000-2001г.)

Публикации.

По материалам исследований опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Содержит 142 страницы текста, 57 рисунков, 16 таблиц и библиографию из 97 наименований литературных источников.

Во введении отмечены основные проблемы, возникающие при черновой обработке титановых поковок в условиях заготовительного производства. Определена необходимость развития существующих технологий черновой лезвийной обработки, в частности, замены метода растачивания фрезерованием и создания для этой цели современного оборудования и инструмента.

В первой главе определен объект исследования, дана классификация крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов по геометрическим параметрам, физико - механическим свойствам и методам изготовления (литье, ковка, раскатка, гибка с последующей сваркой), а также рассмотрено влияние этих методов на величину и структуру поверхностного дефектного слоя.

В обзоре проанализирован ряд альтернативных растачиванию методов, повышающих производительность обработки внутренних поверхностей вращения. Среди них тангенциальное растачивание, осевое протягивание с круговой подачей заготовки и фрезерование торцово-цилиндрической фрезой. По результатам анализа трудов Этин А.О., Грановского Г.И., Мархасина Э.Л., Петросянца А.А. был сделан вывод, что процесс фрезерования внутренних поверхностей вращения в условиях черновой обработки является наиболее предпочтительным с точки зрения производительности. При этом обеспечивается гарантированное стружколомание, что важно при черновой обработке со значительными сечениями срезаемого слоя. Однако данные по силовым, температурным и стойкостным параметрам процесса в изученной литературе отсутствуют.

В работах Кривоухова А.А., Чубарова А.Д., Созинова А.И., Бобрика П.И., Иванова Ю.В. проводятся данные по черновому торцовому фрезерованию наружных поверхностей вращения при обработке титановых сплавов. Тем не менее результаты этих исследований в полной мере не могут быть использованы, поскольку фрезерование внутренних поверхностей вращения торцово-цилиндрическими фрезами имеет свои особенности, связанные со спецификой срезаемого слоя, его параметрами, которые влияют на основные характеристики процесса резания.

Методики теоретического расчета составляющих силы резания при фрезеровании, разработанные Костюковым Я.Х., Душинским В.В., Бобровым В.Ф., Розенбергом А.М., Розенбергом Ю.А., Куфаревым Г.Л. и др. применялись к фрезерованию плоскостей, относились к обработке чугунов и сталей и не учитывали особенности снимаемого припуска при торцово - цилиндрическом фрезеровании с осевой подачей фрезы и круговой подачей заготовки при обработке титановых сплавов. Отсутствовали формулы для расчета максимальных мгновенных составляющих силы резания при фрезеровании внутренних поверхностей вращения, которые

необходимы для расчета силовых параметров оборудования, реализующего данный процесс.

В работах Лоландер Т.Н., Полетики М.Ф., Чандрасекорана Н., Нордрена А. и др. рассматривались проблемы износа и стойкости режущего инструмента при фрезеровании титановых сплавов. Однако данных по коэффициентам трения на контактных поверхностях при работе как по корке, так и по основному материалу, необходимых для теоретического расчета составляющих силы резания недостаточно. В рассмотренной литературе отсутствуют стойкостные зависимости при фрезеровании внутренних поверхностей вращения крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов торцово-цилиндрической фрезой.

В работах Липилова А.С., Чернышова В.А., Бауэра В., в проспектах фирмы INGERSOLL отмечается положительный опыт использования метода фрезерования торцово-цилиндрической фрезой. Широкое распространение этого метода, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов, сдерживается рядом причин, в том числе:

- отсутствие оборудования необходимой жесткости и мощности;
- недостаток данных об особенностях конструкции и работы инструмента, его износа и стойкости в условиях черновой обработки титановых сплавов.

На основании литературного обзора были сделаны выводы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе описаны методики и средства проведения экспериментальных исследований.

Основная часть исследований проводилась с использованием экспериментальной установки для фрезерования тел вращения, созданной в КФ МГТУ. В качестве объекта исследования использовались кованые кольцевые заготовки с внутренним диаметром обработки 670 мм и высотой 250 мм из титановых сплавов.

В качестве режущего инструмента использовалась однозубая фреза $\varnothing 250$ мм, с механическим креплением как специальных, так и стандартных режущих пластин из ВК8.

Для исследования влияния режимов резания и геометрических параметров на силовые и температурные параметры фрезерования было спроектировано и изготовлено специальное приспособление, которое монтировалось на рабочем шпинделе вертикальной бабки установки для фрезерования. Электрический сигнал от динамометра при резании передавался через компенсационные провода на токосъемник со скользящими контактами, позволяющими одновременно передавать электрические сигналы составляющих силы резания на осциллограф и температуры резания на милливольтметр. Варьируемыми факторами являлись значения главного угла в плане φ режущей кромки, расположенной на торцовой части фрезы, глубина резания t , скорость резания V и подача на зуб S_z . При проведении

исследований был составлен план проведения экспериментов $N=2^3$. Температура резания измерялась методом естественной термопары. Значения электрических напряжений, соответствующие определенной температуре фиксировались милливольтметром.

Естественную термопару тарировали на специальной установке, при этом разогрев места контакта твердосплавного стержня с электродами, выполненными из материала обрабатываемой заготовки, осуществлялся электрическим током. Тарирование осуществлялось на режиме охлаждения.

Для стойкостных испытаний применялась фреза специальной конструкции. Испытания проводились по схеме однофакторного эксперимента. Варьируемыми факторами являлись величина круговой подачи на зуб и скорость резания. Стойкость определялась по износу режущих кромок, расположенных как на цилиндрической части фрезы, так и на торцевой при значениях угла в плане $\varphi = 15^\circ, \varphi = 45^\circ, \varphi = 90^\circ$. Критерий затупления устанавливался опытным путем и соответствовал началу периода катастрофического износа на задней поверхности режущих пластин. Значения показателей степеней и коэффициентов в формулах определялись графоаналитическим путем.

Значения коэффициентов усадки, необходимых для теоретического расчета силовых параметров, определялись на участках Г-образной стружки (рис.1), полученные при фрезеровании как цилиндрической, так и торцевой частями фрезы при варьировании значений угла φ и режимов обработки. Для измерения параметров стружки применялся микроскоп с электронным датчиком.

Исследование изнашиваемости твердых сплавов при обработке титанового сплава проводилась с использованием метода моделирования. Выбор метода моделирования процессов трения и износа в условиях обработки крупных кольцевых заготовок обоснован трудоемкостью полномасштабных испытаний. Правомерность применения этого метода по схеме, использующей способ непрерывного контакта инструментального и обрабатываемого материалов, подтверждается исследованиями Грановского Г.И., Андреева Г.С., Рыжкина А.А. и др. Целью эксперимента было получение сравнительных данных по интенсивности износа твердых сплавов группы ВК в зависимости от удельного давления и скорости истирания, а также выбора оптимальной марки инструментального материала. Задачей эксперимента являлось также получение коэффициентов трения в паре твердый сплав – титановый сплав, значения которых, при определенных условиях ($p=30-60 \text{ Н/мм}^2$ для $\sigma_B = 600 - 800 \text{ МПа}$ при $h_3 = 0,1 \text{ мм}$ и $t = 1,5-5 \text{ мм}$) согласно исследованиям Виноградова А.А., Зорева Н.Н., можно считать адекватными коэффициентам трения на задней поверхности инструмента. Они использовались для теоретического расчета составляю-

щих силы резания в главе 3. Опыты проводились на специальной моделирующей установке по схеме однофакторного эксперимента. Истираемые образцы - инденторы в виде усеченной призмы выполнялись из твердых сплавов ВК4, ВК6М, ВК8 и контактировали с поверхностями горячекатаных валов из титановых сплавов $\sigma_B = (600 - 800 \text{ МПа})$ диаметром 140 мм. Эксперимент проводился при истирании как по корке, так и по основному материалу.

За меру износа был принят весовой износ, величина которого определялась при помощи аналитических весов.

В третьей главе изложены результаты теоретического анализа особенностей фрезерования внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок.

Исследованы характер и параметры срезаемого слоя. Кинематическая схема срезания припуска фрезерованием внутренней поверхности кольцевой заготовки (рис.1.) предусматривала обработку специальной торцово - цилиндрической фрезой. Цилиндрическая часть фрезы имела режущие кромки, параллельные оси, а торцовая часть - расположенные под углом φ к оси фрезы. Вращение заготовки ($n_{\text{дет}}$) определяло величину круговой подачи, вращение фрезы ($n_{\text{фр}}$) определяло скорость резания.

Фрезу сообщалась также вертикальная осевая подача S_0 .

В общем выражении расчетные зависимости для определения мгновенных максимальных составляющих силы резания, возникающей при резании одним зубом как на цилиндрической, так и на торцовой частях фрезы получили вид:

$$P_{Zij} = C_{nj} \cdot F_{XYij} + C_{3nj} \cdot \ell_{XYij},$$

$$P_{Xij} = U_{nj} \cdot F_{YZij} + U_{3nj} \cdot \ell_{YZij},$$

$$P_{Yij} = U_{nj} \cdot F_{XZij} + U_{3nj} \cdot \ell_{XZij},$$

где i - номер зуба фрезы, участвующего в резании, на цилиндрической и торцовой частях фрезы;

j - обозначение части фрезы (цилиндрическая - "ц" или торцовая - "т"), для которой рассчитывалась составляющая силы резания;

C_{nj} , U_{nj} - проекции удельной силы, действующей на передней поверхности инструмента, на плоскость резания в направлении вектора скорости резания и на основную плоскость, перпендикулярную плоскости резания соответственно. Их значения зависят от величины касательных напряжений в плоскости сдвига, степени деформации и от характеристик обрабатываемого материала.

C_{3nj} , U_{3nj} - проекции удельной силы, действующей на задней поверхности инструмента на плоскость резания в направлении вектора скорости резания и на основную плоскость, перпендикулярную плоскости резания соответственно. Их значения зависят от состояния режущего инстру-

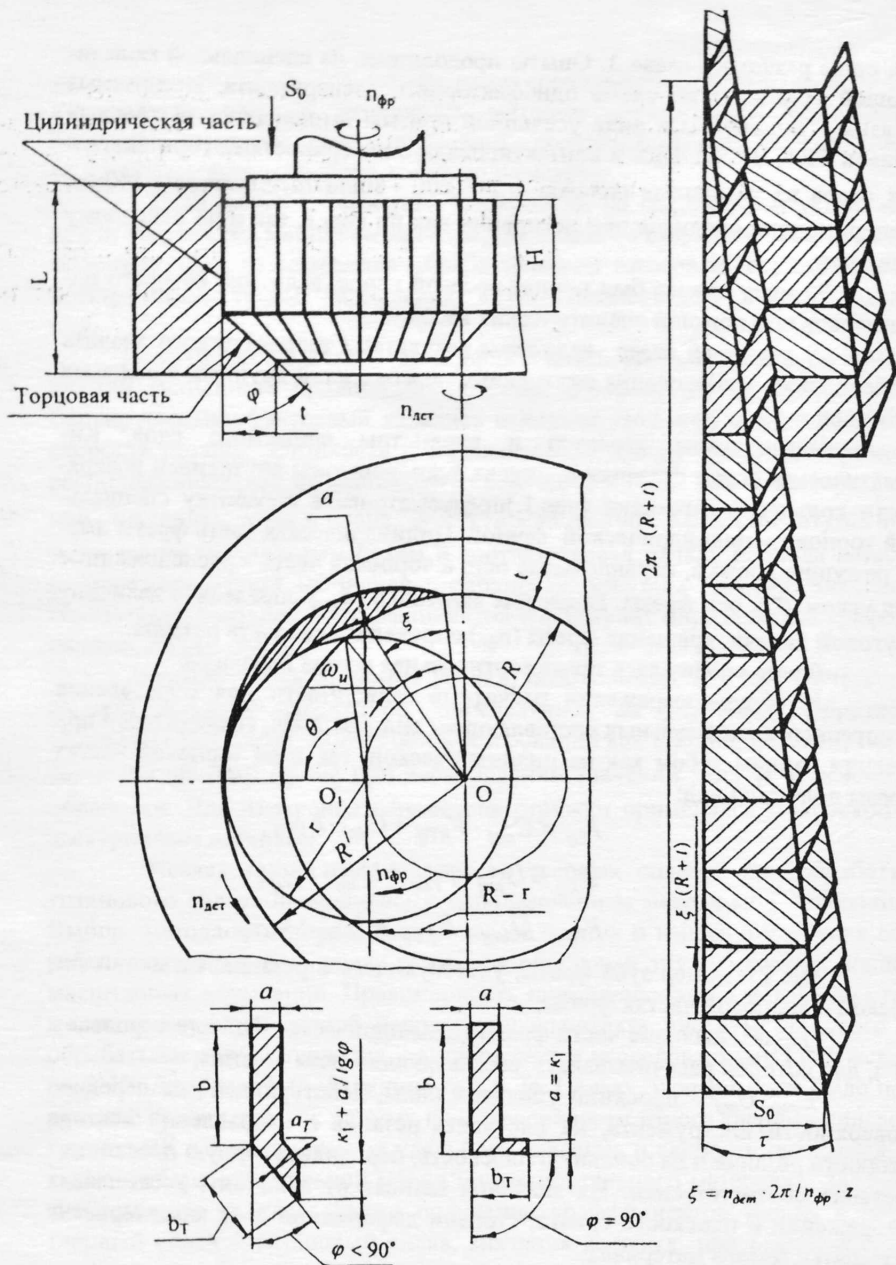


Рис.1. Схема обработки внутренней поверхности крупной кольцевой заготовки фрезерованием.

мента (скругления режущих кромок, величины фаски износа), степени деформации, коэффициента трения и предела текучести обрабатываемого материала. Расчет значений удельных сил на передней и задней поверхностях проводился с использованием данных, полученных в работах Розенберга Ю.А., Розенберга А.М., Полетики М.Ф., Зорева Н.Н. и др.

$F_{XYij}, F_{YZij}, F_{XZij}$ - проекции площадей срезаемого слоя обрабатываемого материала одним зубом на цилиндрической и торцевой частях фрезы на плоскости, образованные соответствующими осями X, Y, Z .

- для цилиндрической части фрезы :

$$F_{XYi4} = a_i \cdot b_i,$$

$$F_{YZi4} = a_i \cdot b_i,$$

где a_i, b_i - значения максимальных мгновенных толщины и ширины срезаемого слоя каждым зубом цилиндрической части фрезы.

$$a_i = S_z \cdot \sin \psi_i,$$

$$b_i = H \geq S_0,$$

где ψ_i - значение максимального угла контакта для i -ого зуба фрезы, т.е. угла, при повороте на который образуется максимальная толщина срезаемого слоя.

$$\psi_i = \psi_1 + (i-1) \cdot \frac{2\pi}{z},$$

где ψ_1 - значение максимального угла контакта для 1-ого зуба фрезы.

z - число зубьев фрезы по периметру.

$$\psi_1 = \arcsin\left(\frac{R' - r}{R' - t} \cdot \sin \theta\right),$$

θ - угол контакта фрезы с заготовкой

- для торцевой части фрезы:

$$F_{XYiT} = a_{Ti} \cdot b_{Ti},$$

$$F_{YZiT} = a_{Ti} \cdot b_{Ti} \cdot \cos \varphi,$$

$$F_{XZiT} = a_{Ti} \cdot b_{Ti} \cdot \sin \varphi,$$

где a_{Ti}, b_{Ti} - значения максимальных мгновенных толщины и ширины слоя, срезаемого каждым зубом торцевой части фрезы.

$$a_{Ti} = k_1 \cdot \sin \psi_i + a \cdot \cos \psi_i,$$

где $k_1 = \frac{S_0 \cdot n_{\text{дет}}}{z \cdot n_{\text{фр}}}$ - величина вертикальной подачи на один оборот фрезы.

$$b_{Ti} = t / \sin \varphi.$$

$l_{XYij}, l_{YZij}, l_{XZij}$ - проекции активной длины режущей кромки на цилиндрической и торцевой частях фрезы на плоскости, образованные соответствующими осями X, Y, Z

- для цилиндрической части фрезы:

$$l_{XYij} = b_i,$$

$$l_{YZij} = b_i,$$

- для торцевой части фрезы:

$$l_{XYiT} = b_{Ti},$$

$$l_{YZiT} = b_{Ti} \cdot \cos \varphi,$$

$$l_{XZiT} = b_{Ti} \cdot \sin \varphi.$$

Общие выражения формул для расчета суммарных мгновенных составляющих силы резания, возникающей при обработке торцово-цилиндрической фрезой получили вид:

$$\begin{aligned} P_{Z_{\text{сум}}} &= C_{nnT} \cdot t / \sin \varphi \cdot (k_1 \cdot \sin \varphi + S_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \psi_i \cdot \cos \varphi) + \\ &+ z' \cdot C_{znT} \cdot t / \sin \varphi + C_{nn\text{Ц}} \cdot H \cdot S_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \psi_i + z' \cdot C_{zn\text{Ц}} \cdot H \\ P_{X_{\text{сум}}} &= U_{nnT} \cdot t \cdot (k_1 \cdot \cos \varphi + S_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \psi_i \cdot \cos \varphi \cdot \text{ctg} \varphi) + \\ &+ z' \cdot U_{znT} \cdot t \cdot \text{ctg} \varphi + U_{nn\text{Ц}} \cdot H \cdot S_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \psi_i + z' \cdot U_{zn\text{Ц}} \cdot H, \\ P_{Y_{\text{сум}}} &= U_{nnT} \cdot t \cdot (k_1 \cdot \sin \varphi + S_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \psi_i \cdot \cos \varphi) + z' \cdot U_{zn} \cdot t \end{aligned}$$

z^I - число зубьев, одновременно участвующих в работе.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. По результатам исследований влияния режимов резания на составляющие силы и температуру резания при фрезеровании торцово-цилиндрической фрезой внутренней поверхности вращения для условий $t=1,5-5\text{ мм}$, $S_z=0,15-1\text{ мм/зуб}$, $V=25-50\text{ м/мин}$, $S_0=60\text{ мм/об}$ были выведены формулы для определения максимальных мгновенных значений составляющих силы резания и температуры резания:

$$P_z = 1652,8 \cdot t^{0,49} \cdot S_z^{0,66} \cdot V^{-0,12}, (H)$$

$$P_x = 1008,4 \cdot t^{0,29} \cdot S_z^{0,36} \cdot V^{-0,15}, (H),$$

$$P_y = 194,2 \cdot t^{0,82} \cdot S_z^{0,06} \cdot V^{-0,15}, (H),$$

$$Q = 127,2 \cdot t^{0,167} \cdot S_z^{0,09} \cdot V^{0,46}, (град).$$

По результатам однофакторного эксперимента построены графики зависимости составляющих силы резания от скорости и подачи на зуб для различных значений главного угла в плане торцовой части фрезы. Эти данные подтвердили теоретические расчеты, выполненные в главе 3, при этом сходимость результатов была более 80%. Наибольшие значения мгновенных максимальных составляющих силы резания были получены при резании с углом $\varphi = 15^\circ$ и наименьшие (в 2,5-3 раза) при $\varphi = 90^\circ$, что позволило принять угол $\varphi = 90^\circ$ как оптимальный в дальнейшем при проектировании специальной фрезы.

По результатам стойкостных испытаний в логарифмических координатах были построены графики $T=f(S_z)$ при различных значениях V и φ .

1) при $V=25\text{ м/мин}$ а) для торцовой части фрезы:

$$\varphi=15^\circ \quad T = \frac{42,2}{S_z^{0,72}},$$

$$\varphi=45^\circ \quad T = \frac{61,3}{S_z^{0,66}},$$

$$\varphi=90^{\circ} \quad T = \frac{82,2}{S_Z^{0,6}},$$

б) для цилиндрической части фрезы:

$$T = \frac{17,1}{S_Z^{0,6}},$$

2) при $V=50\text{м/мин}$ а) для торцевой части фрезы:

$$\varphi=15^{\circ} \quad T = \frac{34,8}{S_Z^{0,75}},$$

$$\varphi=45^{\circ} \quad T = \frac{53,4}{S_Z^{0,7}},$$

$$\varphi=90^{\circ} \quad T = \frac{70,2}{S_Z^{0,64}},$$

б) для цилиндрической части фрезы:

$$T = \frac{10,6}{S_Z^{0,42}}.$$

Диапазон варьирования круговой подачи заготовки $S_z=0,1-1\text{мм/зуб}$, глубина резания $t=12\text{мм}$.

Наибольшую стойкость показала фреза с $\varphi=90^{\circ}$, что определялось меньшей толщиной слоя, срезаемого режущей кромкой, расположенной на торцевой части фрезы по сравнению с толщиной слоя, срезаемого фрезой с $\varphi = 15^{\circ}$ и $\varphi = 45^{\circ}$ при одинаковых значениях осевой подачи.

Стойкость фрезы, оснащенной всеми режущими зубьями определялась по формуле Г.И.Грановского:

$$T_{фр} = T \cdot \frac{2\pi}{\theta},$$

где T -стойкость однозубой фрезы;

θ - угол контакта фрезы с заготовкой.

При рассмотрении фотографий износа режущих пластин было замечено, что наибольшая интенсивность износа в виде «проточин» имела место на расстоянии от вершины 3-3,5мм, т.е. там, где была корка.

По результатам исследований усадки стружки при фрезеровании были получены зависимости коэффициента продольной усадки стружки от скорости резания и подачи на зуб, возникающие при резании как цилиндрической, так и торцевой частями фрезы при различных значениях угла φ .

Величина коэффициента продольной усадки находилась в пределах $K_L=0,8-1,4$. Наибольшее значение коэффициента продольной усадки имело место при фрезеровании режущей кромкой, расположенной на торцевой части с углом $\varphi = 90^\circ$, которая срезала более тонкую стружку.

В результате экспериментальных исследований по истиранию твердого сплава получены величины коэффициента трения контактирующей пары «заготовка-инструмент» как по корке, так и по основному материалу. При истирании по корке коэффициент трения при скоростях 11-28м/мин достигал значений 0,87-0,93.

При дальнейшем увеличении скорости до 44м/мин коэффициент трения уменьшался до 0,35-0,45. Величина коэффициента трения по корке была в 2-2,3раза выше, чем по основному материалу, что связано с повышенной истирающей способностью корки.

Также получены зависимости интенсивности износа от скорости истирания и прилагаемой удельной нагрузки.

Для всех испытуемых твердых сплавов перегиб кривой интенсивности износа в сторону более резкого увеличения находился выше скорости 28м/мин, что связано с повышением температуры резания и переходом абразивного износа в адгезионный.

При работе по корке происходило выкрашивание блоков твердого сплава и интенсивность износа с увеличением скорости и нагрузки увеличилась в 3-3,5раза по сравнению с истиранием по основному материалу. Наибольшую стойкость при истирании по корке имел сплав ВК8.

Пятая глава посвящена решению проблемы реализации метода фрезерования внутренних поверхностей кольцевых заготовок из титановых сплавов. Выбор режимов резания проводился на основании результатов, полученных в выполненной работе, а также из опыта отечественных и зарубежных источников.

Для заготовок с диаметром обработки $D=600-2500$ мм глубина резания t выбиралась исходя из величины максимального припуска, удаляемого за один проход, и составляла 5-21мм ($t/D=0,008$). При этом применялись специальные твердосплавные пластины 25х25х8мм из ВК8 конструкции Краматорского индустриального института.

Максимальное значение круговой подачи S_z принималась в диапазоне 0,6-1мм/зуб и ограничивалось прочностью материала режущей пластины,

которая определялась критической толщиной срезаемого слоя ($a \leq a_{кр} = 0,5 \text{ мм}$). Это условие реализовалось при значении угла контакта фрезы с заготовкой $\theta \leq 40^\circ$. Величина угла контакта определялась соотношением диаметров фрезы и заготовки, а также глубиной резания. Поэтому для выбранной режущей пластины при расчете размеров стружечных канавок и при числе зубьев по периметру $z=6-10$ диаметр фрезы выбирался в диапазоне 320-500 мм.

Скорость резания выбиралась в интервале 20-50 м/мин, что соответствовало средней стойкости $T_{фр}=140-220 \text{ мин}$ при $h_3=2,5 \text{ мм}$.

Максимальное значение осевой подачи ограничивалось условиями $S_0 \leq H$, $a_T \leq a_{кр}$, $\tau < \alpha$, а также величиной радиальной изгибающей составляющей силы резания, определяющей жесткость шпиндельного узла. В результате расчета получено значение максимальной осевой подачи в диапазоне 80-100 мм/об.

Для реализации процесса обработки внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок специальной торцово-цилиндрической фрезой разработаны предложения по модернизации карусельно-фрезерных станков и токарно-карусельных станков, содержащие необходимые энергетические параметры. Разработана конструкция специальной торцово-цилиндрической фрезы для черновой обработки, имеющая тангенциальное расположение сменных многогранных режущих пластин с механическим креплением в корпусе фрезы.

При выборе конструкции фрезы с $\varphi = 90^\circ$ решающим фактором являлась возможность значительно увеличить длину цилиндрической части, соответственно, осевую подачу инструмента и производительности обработки в отличие от фрез с $\varphi < 90^\circ$, у которых длина цилиндрической части ограничивается длиной торцевой части фрезы.

Основные геометрические параметры фрезы:

$$\varphi = 90^\circ, \gamma = -10^\circ - 0^\circ, \alpha = 10^\circ, \lambda = 0^\circ - 15^\circ.$$

Выполнена сравнительная оценка эффективности методов фрезерования и растачивания, которая проводилась по отношению основного времени обработки этих методов, определяющим производительность, а также по себестоимостям операций.

Результаты сравнительного анализа показали, что метод фрезерования внутренних поверхностей вращения может быть успешно применен при черновой обработке крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов, поскольку обеспечивает повышение производительности труда в 2-4 раза, снижение затрат на обработку. Метод дает возможность комплексной механизации и автоматизации процесса черновой обработки заготовок.

Заключение

В диссертационной работе изложен комплекс теоретических и экспериментальных исследований основных параметров процесса фрезерования внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов торцово-цилиндрической фрезой, являющийся основанием для разработки технологии, модернизации оборудования и изготовления инструмента, что позволяет реализовать данный процесс:

1. Исследованы характер и параметры срезаемого слоя. Выведены теоретические формулы для определения мгновенных максимальных составляющих силы резания и моментов, действующих на технологическую систему.

Разработаны необходимые программы расчеты.

2. Получены зависимости влияния режимов резания и геометрических параметров фрезы на составляющие силы и температуру резания при фрезеровании внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок из титанового сплава с $\sigma_B = 600-800 \text{ МПа}$ при работе по корке.

3. Получены зависимости коэффициентов трения и интенсивности износа от скорости скольжения и удельной нагрузки при истирании. Выбрана оптимальная марка инструментального материала для работы как по корке, так и по основному материалу.

4. Получены данные по коэффициенту усадки стружки при фрезеровании в зависимости от режимов резания и геометрии режущей части фрезы, которые были необходимы для теоретического расчета силовых параметров процесса.

5. В результате испытаний получены зависимости стойкости фрезы от режимов резания и геометрии фрезы, на основании которых выбраны оптимальные режимы обработки.

6. Разработаны предложения по модернизации существующего оборудования для реализации метода фрезерования внутренних поверхностей кольцевых заготовок. Проведены необходимые расчеты по определению жесткости шпиндельного узла и механизма круговой подачи карусельного стола, а также мощностей и крутящих моментов основных приводов станка.

7. Разработана конструкция специальной торцово-цилиндрической фрезы, для черновой обработки внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов.

8. Выполнен сравнительный расчет основного времени обработки фрезерованием с базовым методом - растачиванием и сделан вывод о повышении производительности при фрезеровании торцово-цилиндрической фрезой в 2-4 раза.

9. При сравнительном расчете экономической эффективности метода фрезерования и растачивания получено снижение себестоимости при использовании метода фрезерования на одном станке в 1,5-2,8 раза.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1). Попов Д.В. Фрезерование внутренних поверхностей вращения крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов // Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка.: Тез. докл. ВНТК. – Калуга, 1997. – С. 44.

2). Попов Д.В., Зенкин Н.В. Моделирование процесса изнашивания режущего инструмента при обработке титанового сплава // Создание прогрессивных технологий, конструкций, систем и социально-экономические проблемы производства: Тез. докл. ВНТК. – Калуга, 1998. С. 96.

3). Созинов А.И., Иванов Ю.В., Попов Д.В. Методы повышения производительности обработки труднообрабатываемых материалов // Создание прогрессивных технологий, конструкций, систем и социально-экономические проблемы производства: Тез. докл. ВНТК. – Калуга, 1998. – С.85.

4). Попов Д.В. Повышение эффективности обработки внутренней по верхности крупных кольцевых заготовок из титановых сплавов // Создание прогрессивных технологий, конструкций, систем и социально-экономические проблемы производства: Тез. докл. ВНТК. – Калуга, 1998. – С.87.

5). Попов Д.В. Исследование силовых и температурных параметров фрезерования внутренней поверхности крупных кольцевых заготовок // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборе, машиностроении: Тез. докл. юбилейной ВНТК. – Калуга, 1999. – С. 10.

6). Попов Д.В. Расчет максимального угла контакта при фрезерования внутренней поверхности крупной кольцевой заготовки // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборе, машиностроении.: Тез. докл. юбилейной ВНТК. – Калуга, 1999. – С. 11.

7). Попов Д.В. Силы резания при фрезеровании внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок // Тез. докл. 1-ой Рос. конф. молодых ученых по матем. моделированию. – М., – 2000. – С. 201 - 202.

8). Попов Д.В. Основные особенности конструкции фрез, используемых для обработки внутренних поверхностей вращения // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборе и машиностроении: Тез. докл. ВНТК. – Калуга, 2000. – С. 11.

9). Попов Д.В. Исследование изнашиваемости твердого сплава на моделирующей установке // Технология металлов. – 2000. - №12. – С.12-14.

10). Созинов А.И., Попов Д.В. Силы резания при фрезеровании внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок // Труды МГТУ. - 2000.- №578. – С.86-94.