

На правах рукописи
УДК 625.90.025

Шачнев Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
ОБОЛОЧКОВОГО ТИПА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И
МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

Специальности:

05.03.01- Технологии и оборудование механической и физико-технической
обработки

05.02.08- Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана на кафедре «Инструментальная техника и технологии»

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Сергей Витальевич Грубый

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Владимир Андреевич Гречишников

Кандидат технических наук, доцент
Георгий Николаевич Мельников

Ведущее предприятие – ОАО «Корпорация» «Тактическое ракетное вооружение».

Защита состоится _____ 2009 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на реферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.
Телефон для справок: 8-499-267-09-63.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2009г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д.т.н., доцент

Михайлов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Возрастающий объем выпуска и жесткие сроки на изготовление ракетно-космической техники (РКТ), составной частью которой являются баллоны высокого давления и другие детали оболочкового типа, требуют использования эффективных организационно-технических решений при механической обработке. Рассмотренные в работе детали оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей являются основой баллонов, предназначенных для транспортировки космическими объектами различных газов под высоким давлением.

Эффективность механической обработки деталей оболочкового типа в настоящее время недостаточна из-за высокой трудоемкости изготовления и существенной зависимости от квалификации исполнителя. Закономерности обработки деталей со специфическими конструктивными особенностями из указанных материалов мало исследованы как теоретически, так и экспериментально. Кроме того возможности современного оборудования и инструментальных материалов недостаточно эффективно используются из-за отсутствия практических рекомендаций.

Таким образом, возможности существующих организационно-технических решений по механической обработке не обеспечивают возрастающие объемы производства деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей. Это обуславливает необходимость модернизации технологии механической обработки деталей оболочкового типа на основе применения современного оборудования и режущего инструмента, проведения ряда исследований физических закономерностей обработки деталей указанного типа и разработки на их основе технологических процессов, используя рационально организованный обмен данными различных предметноориентированных САПР при конструкторско-технологической подготовке производства.

Поэтому работа, направленная на повышение эффективности механической обработки деталей оболочкового типа из труднообрабатываемых материалов, является актуальной.

Цель работы. Снижение трудоемкости и затрат изготовления деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей на основе оптимизации структуры и параметров технологического процесса механической обработки.

Задачи исследования:

1. Определить на основании анализа научно-исследовательских и опытных работ пути повышения эффективности механической обработки деталей оболочкового типа из мартенситностареющих сталей и титановых сплавов.
2. Выбрать и обосновать критерии, ограничения и методы оптимизации технологического процесса и параметров режима резания применительно

- к обработке деталей оболочкового типа из мартенситностареющих сталей и титановых сплавов.
3. Выполнить экспериментальное обеспечение оптимизации механической обработки титановых сплавов и мартенситностареющих сталей, включая: определение связей режимов резания и геометрических параметров со стойкостью инструмента, силой резания, шероховатостью поверхности; исследование ограничений на выбор СОЖ.
 4. Обосновать возможность обеспечения требований к качеству поверхности в условиях изменяющихся параметров процесса резания.
 5. Обосновать возможность и эффективность использования предметноориентированных САПР в параллельной схеме конструкторско-технологической подготовки механической обработки.
 6. Разработать практические рекомендации по использованию оптимальных режимов резания при точении оболочек из мартенситностареющих сталей и титановых сплавов.
 7. Провести структурно-параметрическую оптимизацию процесса механической обработки в условиях производства баллонов высокого давления для РКТ.

Научная новизна.

1. Разработана методика модернизации производства сложного технического объекта – оболочки для баллона высокого давления, включающая выбор оборудования и системы инструментального обеспечения, организацию параллельной конструкторско-технологической подготовки производства, получения недостающих данных об объекте обработки, оптимизацию построения технологического процесса и режимов резания.
2. Показана целесообразность использования штрафной функции, содержащей себестоимость обработки как целевую функцию, и ограничения на шероховатость поверхности, стойкость инструмента, силу резания, параметры оборудования – как индикаторную функцию для решения задачи оптимизации параметров режима резания механической обработки деталей оболочкового типа из мартенситностареющих сталей и титановых сплавов.
3. Получены новые зависимости в области резания труднообрабатываемых материалов: параметров шероховатости поверхности от режимов резания при точении, силы резания и стойкости инструмента от режимов резания и угла в плане; влияния СОЖ на коэффициент трения, шероховатость поверхности и силу резания.
4. Доказана возможность и эффективность использования предметноориентированных САПР в параллельной схеме решения задач конструкторско-технологической подготовки производства.

Практическая ценность работы.

1. Разработана методика определения параметров режима резания на основе предложенного критерия оптимальности.
2. Разработана методика использования в предметноориентированном САПР механообработки исходных данных, созданных в САПР конструктора.
3. Разработан и внедрен на основе результатов структурно-параметрической оптимизации технологический процесс изготовления деталей для баллонов высокого давления, позволивший сократить затраты, трудоемкость и цикл изготовления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика решения задачи структурно-параметрической оптимизации механической обработки деталей оболочного типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей с использованием комбинации критериев и методов оптимизации с доказательством ее эффективности при производстве шар-баллонов для космической техники.
2. Информационное обеспечение решения задачи оптимизации, включая:
 - зависимости параметров шероховатости поверхности от режимов резания;
 - зависимости стойкости инструмента и силы резания от режимов резания, главного угла в плане и износа инструмента;
 - влияние различных СОЖ на коэффициент трения пар, составленных из обрабатываемых и инструментальных материалов;
 - влияние различных СОЖ на шероховатость поверхности и силу резания.
3. Доказательство возможности построения эффективной структуры технологического процесса обработки шар-баллонов.

Методы исследования. Работа включает в себя теоретические и экспериментальные исследования и моделирование на ЭВМ. Используются основные положения технологии машиностроения, включая теорию технологического наследования, теории резания, методы математического моделирования, математического программирования, теории оптимальных процессов и математической статистики. Исследование возможностей предложенной модели оптимизации при ограничениях на параметры процесса резания и на показатели качества обработки проводилось на ЭВМ с использованием полученных экспериментальных данных. Экспериментальные исследования процесса резания и влияние его параметров на показатели качества обработанных поверхностей выполнялись как на экспериментальных установках, так и в реальных производственных условиях при обработке деталей оболочкового типа для баллонов высокого давления.

Реализация результатов работы. Результаты работы реализованы в разработанных и внедренных в производство технологических процессах механической обработки нескольких видов баллонов высокого давления из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей на Заводе экспериментального машиностроения Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П.Королева. Методика модернизации механической обработки деталей используется на ЗАО НПО «Авангард» и ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия». Полученные в работе рекомендации по применению современных инструментальных материалов и режимов резания использованы в выпущенной и внедренной в производство технологической инструкции.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на 6-й Международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (Брянск, 2008), Международной юбилейной научно-технической конференции «Инструментальные системы машиностроительных производств» (Тула, 2008), Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» (Москва, 2008), научных семинарах кафедры «Инструментальная техника и технология» МГТУ им. Баумана в 2006 – 2009 годах.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в семи печатных работах, из них четыре опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 178 страницах текста и содержит 57 рисунков, 41 таблицу, список литературы из 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность темы, сформулированы научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние технологий механической обработки при производстве изделий РКТ, сформулирована проблема повышения эффективности механической обработки при производстве деталей из титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей.

Выполнен обзор работ, внесших большой вклад в решение проблемных вопросов повышения производительности процессов резания труднообрабатываемых материалов, рационального использования режущего инструмента, оптимизации технологических процессов механической обработки. Это в том числе работы: В.Л.Аверченкова, Г.И.Грановского, В.А.Гречишникова, С.В.Грубого, Я.Л.Гуревича, А.М.Дальского, А.Е.Древаля, Ю.М.Ермакова, В.Н.Подураева, В.К.Старкова, А.Г.Суслова, В.М.Ярославцева.

Проведен обзор работ по автоматизации технологической подготовки производства, по теории оптимального управления, выполненных В.И.Аверченковым, В.Г.Болтянским, А.Ф.Колчиным, С.Н.Корчаком, М.В.Овсянниковым, Л.С.Понтрягиным, А.А.Ступаченко, Б.Е.Челищевым.

Выполнен анализ критериев, применяемых для оценки эффективности процесса механической обработки деталей, рассмотрены возможности методов оптимизации для решения проблем повышения эффективности. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе разработаны методы и средства повышения эффективности механической обработки деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей на основе оптимизации.

Выделено две группы задач – задачи структурной и задачи параметрической оптимизации. В диссертационной работе к структурной оптимизации относился поиск такой структуры технологического процесса, которая в соответствии с принятыми критериями включала автоматизацию разработки технологического процесса, выбор оборудования, инструмента и средств технологического оснащения. К параметрической оптимизации относился поиск таких режимов резания, которые обеспечивали экстремум критерия эффективности - целевой функции с учетом технологических ограничений.

Для получения комплексного решения отмечена необходимость обеспечения связи между решением задач структурной и параметрической оптимизации. Уже при выборе содержания структурной оптимизации предусмотрено обеспечение такой связи.

В условиях производства деталей РКТ было принято достаточным для обеспечения эффективности решение задачи минимизации себестоимости обработки детали при одновременном сокращении трудоемкости и длительности цикла изготовления. Таким образом, структурная и

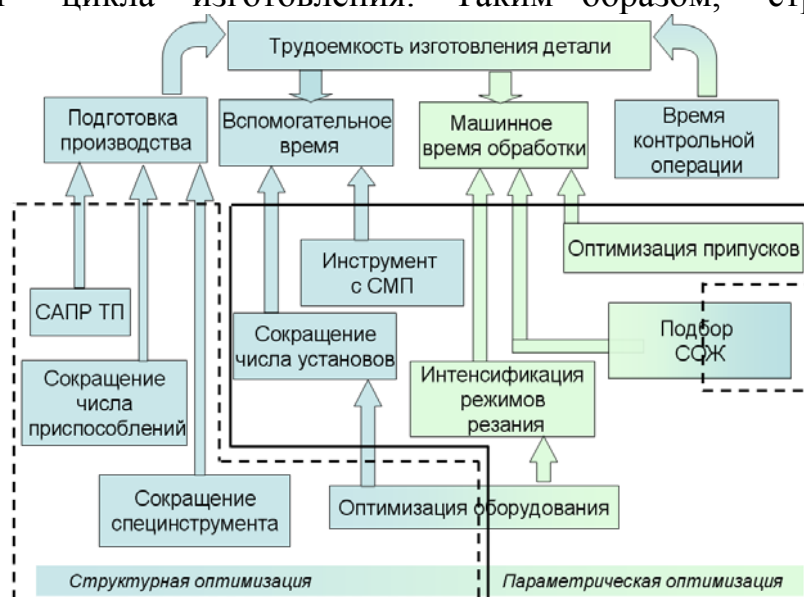


Рис.1. Структурная и параметрическая оптимизация механической обработки

параметрическая оптимизация рассматривались как общий метод решения этой задачи. Схема структурной и параметрической оптимизации приведена на рис. 1.

Одним из этапов постановки задачи оптимизации являлся выбор критерия оптимизации. Особенностью формализации решения этой задачи является то, что критерий оптимизации должен быть представлен в форме функционала. В связи с тем, что процесс выбора оптимальных элементов структуры дискретный, то функционал выбирается в виде суммы функций.

Тогда в общем виде критерий эффективности имеет вид:

$$J = \sum f^0(x(t-1); u(t)) \quad (1)$$

где $u(t)$ – управление, определяющее выбор на t -ом шаге из множества значений $U(t)$, в нашем случае это добавление элемента структуры в единицах затрат, отнесенных на единицу изделия;

$x(t-1)$ – состояние структуры на предыдущем шаге процесса.

Технологическая подготовка производства РКТ включает в себя определение вида заготовки и способа ее получения, выбор оборудования, системы режущего инструмента, средств технологического оснащения, метода и средств контроля, проектирование технологического процесса механической обработки, разработка управляющих программ для станков с ЧПУ, выбор СОЖ. Для деталей оболочкового типа, рассматриваемых в работе, заготовка определена конструкторской документацией. Таким образом, подготовка производства заключается в процессе выбора определенных элементов в определенной последовательности.

Показано, что применение любого из рассмотренных в главе 1 критериев оптимизации дает слабую зависимость выбора одного элемента структуры от выбора другого.

Например, если в качестве критерия принять минимум трудоемкости, то выбор станка по этому критерию не влияет на выбор системы режущего инструмента по тому же критерию, т.к. любая из выбранных систем режущего инструмента позиционируется на любом из выбранных станков. Более существенным оказывается влияние ограничений, накладываемых типом производства, требованиями конструкторской документации и др. на сами элементы системы. Кроме того, мощность множеств, из которых проводится выбор, так же не велика.

Формализация этих предположений позволяет в зависимости (1) отказаться от $f^0(x(t-1))$ и свести её к следующему виду:

$$J = \sum_{t=1}^i u(t), \quad i = 7. \quad (2)$$

Тогда задача выбора оптимальной последовательности сводится к сумме задач частичных оптимизаций, таких как:

$$\min J = \min \sum u(t) = \sum \min u(t). \quad (3)$$

Для оптимизации процесса механической обработки разработана и использована система критериев и ограничений, представленная на рис. 2.

Достижение отмеченных критериев структурной оптимизации обеспечено на основе изменения структуры технологического процесса (рис.3). Сокращено число операций, число установов с 11 до 7, число специального инструмента с 24 до 3. Повышение производительности, стабильности и надежности обработки достигнуто за счет применения стандартных сборных резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП) из современных твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями.

Показатели	Структурная оптимизация	Параметрическая оптимизация
<u>критерии эффективности</u>	<ul style="list-style-type: none"> - минимум затрат на подготовку производства -минимальное количество специальных СТО и установов -минимальное количество единиц оборудования -максимальная доля программной обработки 	-минимум переменной части себестоимости обработки детали на операции
<u>ограничения</u>	<ul style="list-style-type: none"> -заданные сроки подготовки производства -программа обработки деталей данной номенклатуры -длительность цикла обработки партии деталей -предельные инвестиции на модернизацию производства по данной номенклатуре деталей 	<ul style="list-style-type: none"> -заданная шероховатость обработки поверхности -стойкость инструмента, кратная времени обработки полусферы -силы резания, обеспечивающие точность обработки, жесткость и надежность закрепления заготовки в приспособлении
<u>оптимизируемые параметры</u>	-элементы структуры	-параметры режимов резания

Рис.2 Критерии эффективности и ограничения

Общее число стандартных инструментов увеличено с 4 до 16. Для концентрации операций предварительного и чистового точения приобретен и применен токарный станок с ЧПУ модели DUS 1110-i (фирма Boehringer, Германия). Достигнуто сокращение на 20 % общего времени конструкторско-технологической подготовки производства за счет параллельного проектирования технологического процесса с использованием САПР ТП АDEM. На схеме рис.4 показана общая структура и взаимные связи обмена данными между различными предметноориентированными САПР при подготовке производства, реализованные и отработанные в рамках диссертационной работы.

Повышение общей эффективности технологического процесса отражено сокращением времени обработки партии из 30 деталей с 904 до 570 часов.

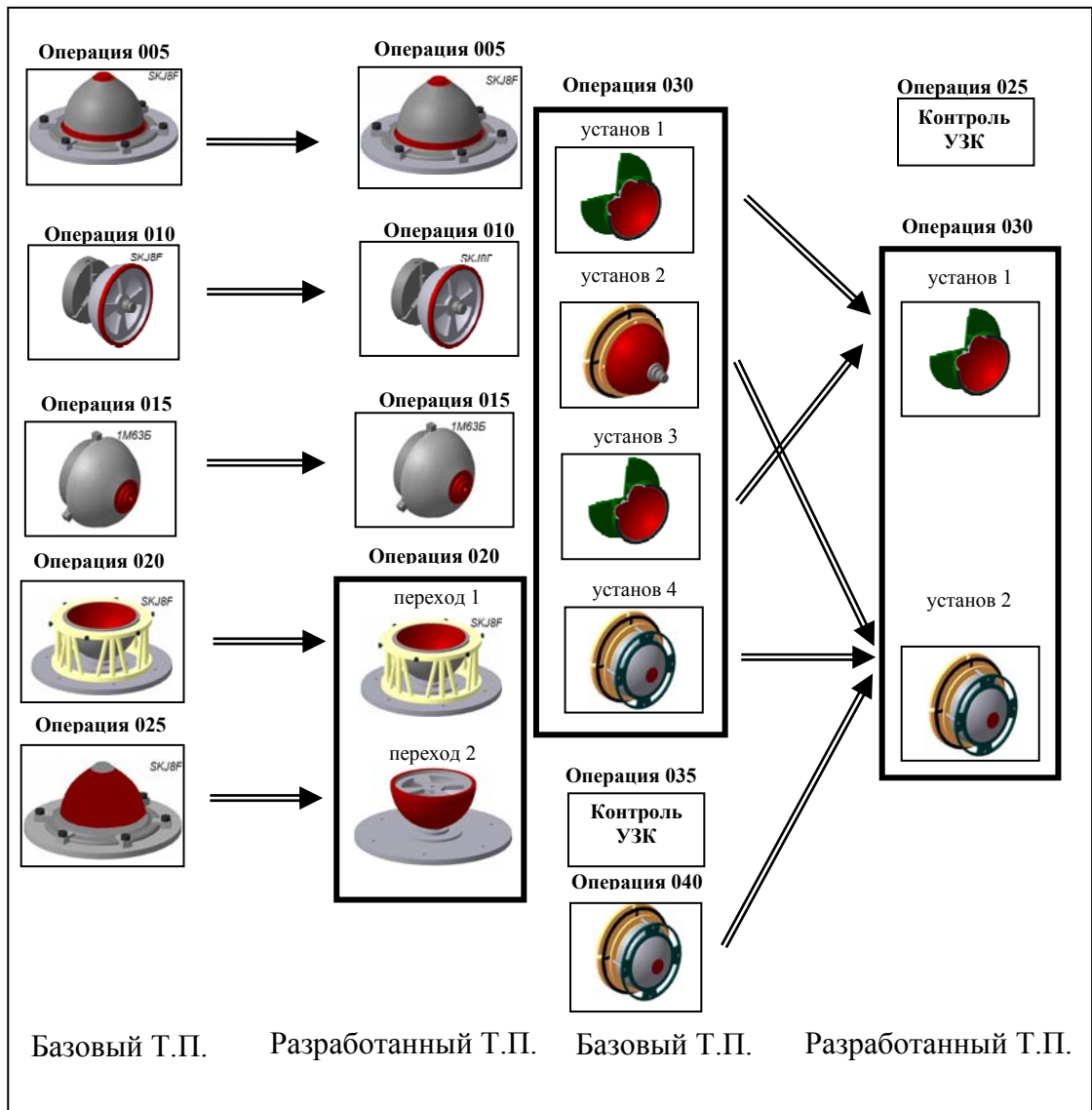


Рис.3. Изменение структуры технологического процесса

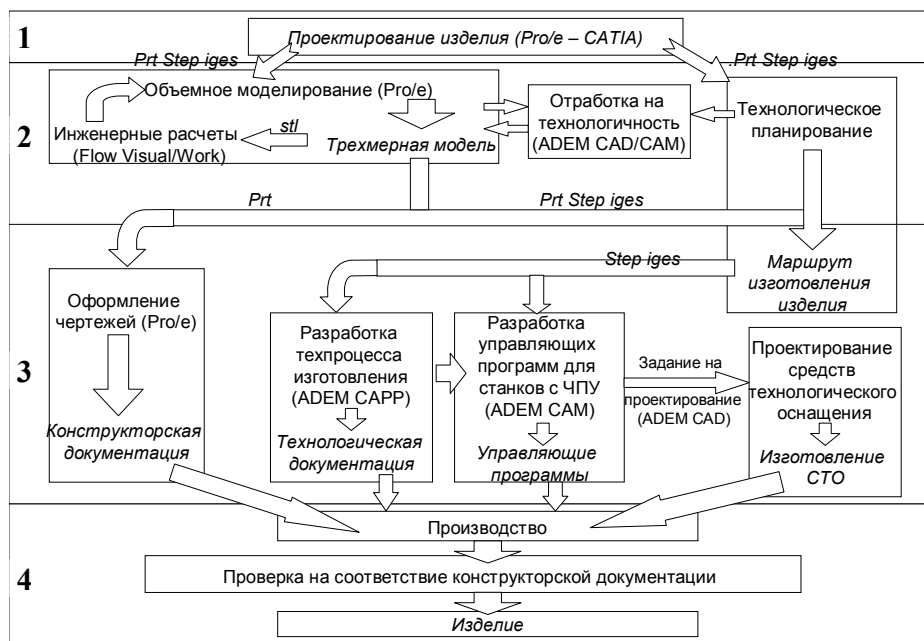


Рис.4. Сквозной параллельный цикл создания изделия

В третьей главе приведены результаты исследований, направленных на экспериментальное обеспечение решения задач оптимизации. При экспериментальных исследованиях изучалась шероховатость обработанной поверхности при точении титанового сплава и определялись зависимости параметров шероховатости от режимов резания, исследовалось влияние угла в плане резца при обработке сферической поверхности полусферы на составляющие силы резания, сравнивались экспериментальные значения силы резания с расчетными для подтверждения достоверности полиномиальных уравнений, используемых в процедурах оптимизации, выбиралась марка СОЖ на основании изучения влияния на параметры резания и трения.

Экспериментальные исследования по измерению составляющих силы резания проводились на экспериментальной установке кафедры МТ-2 МГТУ им. Н.Э.Баумана. Экспериментальная установка по исследованию динамических параметров силы резания состояла из динамометра модели УДМ 600, токарного станка модели 16К20, и регистрирующей аппаратуры на базе встроенного ЦАП\АЦП в ПЭВМ. Изменение главного угла в плане резца достигалось за счет разворота динамометра относительно обрабатываемой торцевой поверхности заготовки из титанового сплава ВТ6-С.

В методику экспериментальных исследований входило определение влияния СОЖ на параметры процесса резания мартенситностареющих сталей. Исследования производились с использованием четырех марок водорастворимых масляных СОЖ: ПАТАК 6210Р, ИВКАТ, BLASOCUT 4000 CF, MICROCOOL 387.

Для измерения коэффициента трения была использована методика и установка профессора Г.И.Грановского.

Экспериментально определялись значения параметров шероховатости на образцах из титанового сплава ВТ6-С при работе новой пластиной и при работе изношенной пластиной. В обоих случаях обработка велась при глубине резания $t=1$ мм, скорости резания для новой пластины $v=56,1$ м/мин, для изношенной пластины скорость резания составляла $v=59,2$ м/мин. В качестве параметров шероховатости поверхности кроме параметра Ra применялись параметры Rz , $Rmax$, RSm как более информативные для оценки концентраторов напряжений на обработанной поверхности. Для измерения шероховатости обработанной поверхности использовался профилометр модели HOMMEL TESTER W55.

Влияние подачи на параметр шероховатости отражено на графиках рис.5.

Полученные экспериментальные зависимости представлены в форме полиномов третьей степени:

$$\begin{aligned} R_{\max} &= 7,17 + 1,88S + 0,66S^2 + 0,3S^3, \\ R_z &= 6,26 + 1,59S + 0,55S^2 + 0,25S^3, \\ Ra &= 1,27 + 0,34S + 0,12S^2 + 5,4S^3. \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношение коэффициентов при S , S^2 и S^3 в формулах (5) показывает, что подача влияет на форму профиля микронеровностей.

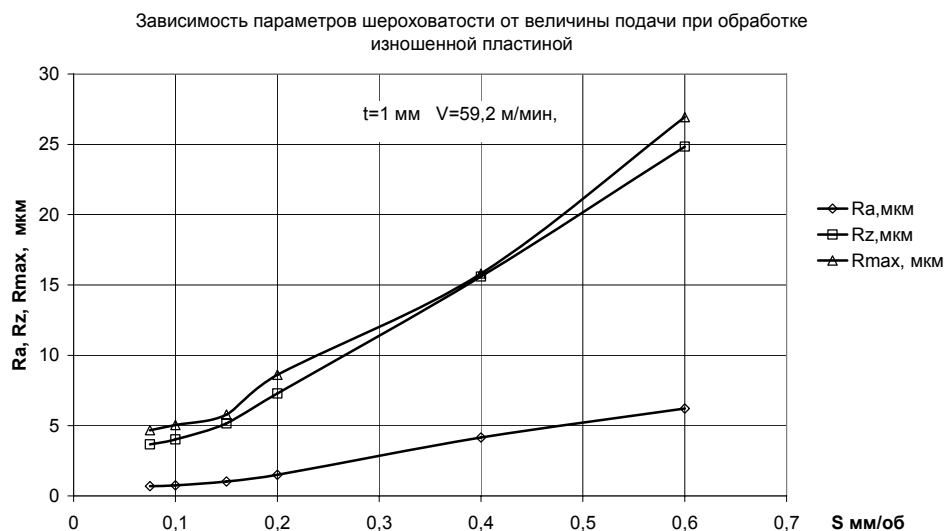


Рис.5. Зависимость параметров шероховатости поверхности от подачи при работе изношенной пластиной

Учитывая, то, что в чертеже полусферы регламентировано значение по параметру Ra , этот параметр для изношенного резца аппроксимирован степенной зависимостью:

$$Ra = 10,35 \times S^{1,076} \times V^{-0,15}. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо при обработке заготовки из титанового сплава ВТ6-С в диапазоне подач 0,07-0,6 мм/об и скорости резания 20-110 м/мин.

Эксперименты по силам резания при обработке заготовок из титанового сплава подтвердили закономерности влияния главного угла в плане резца. С уменьшением угла в плане значительно увеличивается тангенциальная и радиальная составляющая силы. Характер изменения сил резания и их значения учтены при анализе изменения деформации детали при ее закреплении на станке и проектировании приспособления.

Результаты экспериментальных исследований по измерению составляющих силы резания P_x , P_y , P_z при точении выбранных марок сталей с использованием различных марок СОЖ и без них в сочетании с экспериментальными исследованиями влияния СОЖ на трение между инструментальным и обрабатываемым материалами и шероховатость обработанной поверхности легли в основу решения о выборе марки СОЖ.

Сравнение результирующей силы резания показывает, что при использовании СОЖ результирующая сила резания для стали 45 составляет от 47 до 70% уровня силы резания без использования СОЖ, а для стали 05X12H5K14M5ТВ-ВД от 63 до 90% уровня силы резания без использования СОЖ. Следует отметить, что сила резания при обработке стали 05X12H5K14M5ТВ-ВД снижается в меньшей степени по сравнению со сталью 45, что совпадает с результатами, полученными при анализе коэффициента трения.

Значение параметра шероховатости обработанной поверхности на операции точения при использовании различных марок СОЖ для стали

05X12H5K14M5ТВ-ВД также снижается с Ra 2,56 (без использования СОЖ) до Ra 0,87 (при использовании СОЖ ИВКАТ). Результаты проведенных опытов обобщены в виде поправочных коэффициентов, учитывающих влияние СОЖ на силу резания и шероховатость обработанной поверхности.

В четвертой главе приведены результаты оптимизации параметров режима резания на операциях точения наружной и внутренней поверхностей полусфер из титанового сплава ВТ6-С и мартенситностареющей стали марки 05X12H5K14M5ТВ-ВД

Исходя из условий эксплуатации рассматриваемых в работе деталей оболочкового типа, одним из ограничений является ограничение по шероховатости поверхности. Математическая модель этого ограничения была получена при обработке экспериментальных данных в рамках главы 3.

Из технологических условий обработки рассматриваемых в работе оболочек дополнительными ограничениями являются ограничения по силе резания и ограничения на стойкость инструмента. Ограничение по силе резания связано с ограниченной жесткостью при обеспечении допуска на толщину оболочки и с необходимостью не превысить допустимый момент, удерживающий оболочку от прокручивания в приспособлении.

Ограничение по стойкости связано с тем, что и титановые сплавы, и мартенситностареющая сталь, из которых изготавливаются рассматриваемые в работе оболочки, являются труднообрабатываемыми материалами, а путь резания при обработке данных оболочковых конструкций относительно большой, причем замена инструмента в пределах обработки одной оболочки недопустима.

Давая математическое описание принятых ограничений, необходимо учесть особенность принятых в работе методов оптимизации. Поскольку для обеспечения необходимых условий поиска оптимума требуется обеспечить, чтобы область ограничений была выпуклым множеством, т.е. все функции, описывающие область ограничений в рамках области были выпуклыми, то представим ограничения в форме выпуклых функций. Одной из форм выпуклой функции является полином.

Исходя из вышеизложенного, применим для описания ограничений по силе резания и стойкости полиномиальную зависимость. Стойкость твердосплавных резцов T , мин представлена в виде полиномиальной модели, учитывающей влияние скорости резания, глубины резания, подачи и главного угла в плане:

$$y = \lg(T) = f(V, S, t, \varphi_0) = B' \times f(x) = b_1 + b_2V + b_3V^2 + b_4t + b_7tS + b_8V^2 + b_9S^2 + b_{10}t^2 + b_{11}\varphi_0 + b_{12}\varphi_0V + b_{13}\varphi_0S + b_{14}\varphi_0t + b_{15}\varphi_0^2V + b_{16}\varphi_0^2V^2 + b_{17}\varphi_0^2S + b_{18}\varphi_0^2S^2 + b_{19}\varphi_0^2t + b_{20}\varphi_0^2t^2 + b_{21}\varphi_0^2. \quad (7)$$

Аналогичное уравнение использовано для силы резания, переменные включены в кодированном (безразмерном) виде.

Критерий оптимизации представлен соответствующим математическим уравнением в виде *целевой функции*. Оптимальному решению соответствует минимум этой целевой функции

$$y = f_0(\mathbf{X}) \rightarrow \min, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad (8)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)' = (V, S)'$ - вектор переменных режима резания. Область Ω является областью допустимых значений переменных режима резания и задается системой рассмотренных выше технологических *ограничений*. В качестве метода решения задачи нелинейного программирования использован метод штрафных функций, который относится к методам поиска условного экстремума, когда решение задачи с ограничениями находится как последовательность решений вспомогательных задач безусловной минимизации составленных определенным образом функций. Общая схема построения расчетного алгоритма заключается в том, что выражение (8) эквивалентно задаче безусловной минимизации суммы.

$$f_0(X) + \delta(X) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $\delta(X)$ - так называемая *индикаторная функция*.

Для условий обработки деталей оболочкового типа для баллонов высокого давления на токарных операциях в качестве переменных приняты скорость резания и подача, а глубина резания определена в результате построения технологического процесса. Тогда уравнение (9) для принятых ограничений примет вид:

$$L(V, S, r_k) = C(V, S) + r_k \left[\frac{1}{Ra_z - Ra(V, S)} + \frac{1}{N_z - N(V, S)} + \frac{1}{T(V, S) - T_{min}} + \frac{1}{P_z - P(V, S)} + \frac{1}{V_{max} - V} + \frac{1}{V - V_{min}} + \frac{1}{S_{max} - S} + \frac{1}{S - S_{min}} \right] \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $C(v, s)$ - переменная часть себестоимости обработки деталей на операции; Ra_z - заданная шероховатость, N_z - мощность станка, T_{min} - минимальная стойкость инструмента, P_z - предельно допустимая сила резания, V_{max} , V_{min} , S_{max} , S_{min} - предельные значения переменных.

Основываясь на анализе, данном в первой главе, для нахождения минимума функции (10) использован *метод Ньютона*, основанный на итерационном процессе, который представлен в форме:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \mathbf{H}_k^{-1}(L) \cdot \Delta_k(L), \quad (11)$$

где X_k - это вектор переменных на k -ом шаге. Второй член этого выражения представляет собой приращения X_k на k -ом шаге. Это приращение

выражено через обратную матрицу Гессе $H_k^{-1}(L)$ и матрицу столбец $\Delta_k(L)$ содержащую соответствующие первые частные производные. Для получения численного решения осуществлен перевод для всех переменных к безразмерным величинам.

Процедура оптимизации наглядно видна на рис. 6. Для обработки внутренней поверхности детали оболочкового типа для баллона высокого давления из титанового сплава ВТ6-С резцом с СМП формы CNMG120408 с глубиной резания $t=3,5$ мм заданы ограничения по шероховатости $Ra=5$ мкм, по тангенциальной составляющей силы $P_z=2000$ Н и по стойкости инструмента $T=45$ мин. Специально разработанная программа осуществляет последовательный поиск оптимального режима резания как показано на рисунке стрелками, приближаясь к искомой точке, сначала двигаясь в направлении ограничения по стойкости инструмента, а затем вдоль него до ограничения по силе резания. В результате найденный оптимальный режим резания соответствует скорости резания $V=36,7$ м/мин, подаче $S=0,28$ мм/об. Время обработки внутренней поверхности детали для найденного режима составляет 26,1 мин, себестоимость $C=341,5$ руб.

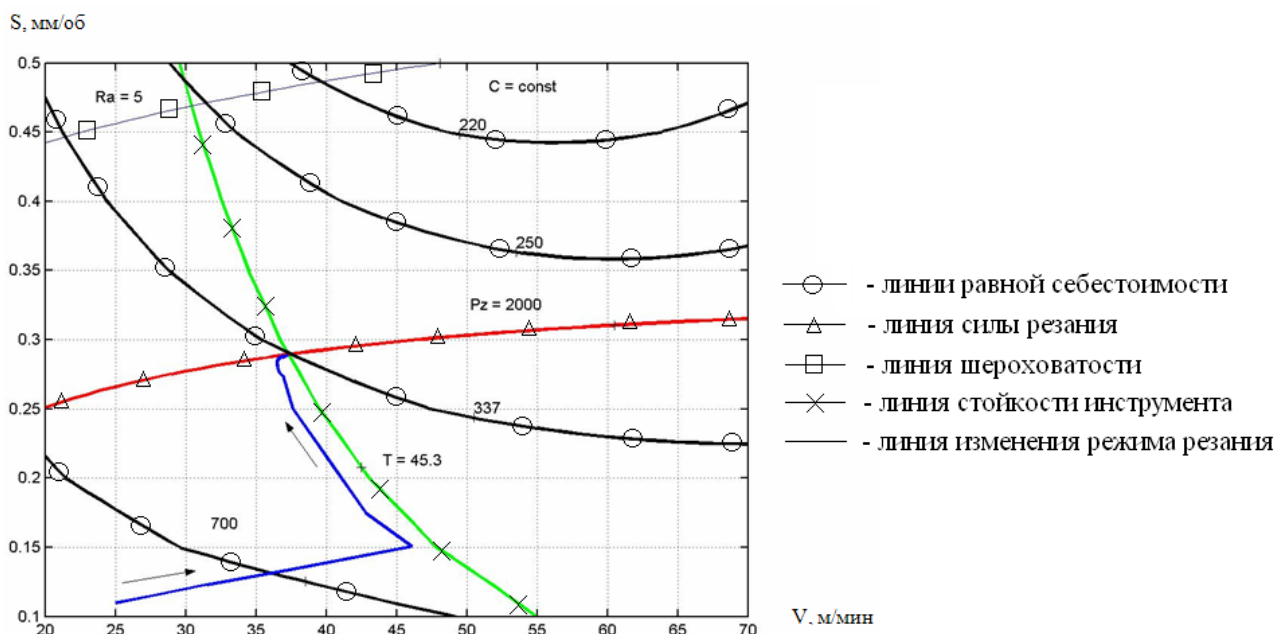


Рис. 6. График оптимизации режима резания для чернового точения внутренней поверхности полусферы

Аналогично приведенному расчету определены оптимальные параметры режима резания для чистовой обработки внутренней поверхности, черновой и чистовой обработки наружной поверхности (меняются только ограничения и значения исходных параметров, определяемых геометрией инструмента).

Из анализа графиков оптимизации точения внутренней и наружной поверхностей деталей оболочкового типа из титанового сплава ВТ6С сделан вывод, что оптимальные значения параметров режима резания лежат на пересечении линий соответствующих технологических ограничений.

Это положение соответствует общему решению задачи оптимизации при ограничениях выпуклыми функциями. Поэтому для обработки оболочек из мартенситностареющей стали 05X12H5K14M5TB-BD оптимальные значения скорости и подачи определялись в точках пересечений линий ограничений.

Пятая глава посвящена апробации результатов исследований и разработке практических рекомендаций. Производственно-экспериментальная проверка результатов оптимизации осуществлялась при изготовлении партии деталей оболочкового типа из титанового сплава BT6-C и мартенситностареющей стали 05X12H5K14M5TB-BD.

По результатам структурной оптимизации приобретен и внедрен в основное производство ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» токарный станок с ЧПУ DUS 1110-i «Boehringер», спроектирован и изготовлен комплект технологической оснастки для крепления полусфер шар-баллонов требуемых типоразмеров и номенклатуры. Испытаны на оптимальных режимах и внедрены сборные резцы и резцовые головки Sandvik, Iscar, Mitsubishi с СМП рекомендованных форм и геометрических параметров, обеспечивших программную обработку поверхностей полусферы и штуцерной части.

В целом рекомендации по повышению эффективности механической обработки деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей можно разделить на 3 группы. *Первая группа* рекомендаций - это рекомендации по использованию методики оптимизации механической обработки с применением разработанной системы критериев и ограничений.

Вторая группа рекомендаций - это рекомендации по обрабатываемости, назначению режимов резания при точении титановых сплавов и мартенситностареющих сталей с применением современных инструментальных материалов. К этой же группе рекомендаций относятся рекомендации по построению технологии обработки, применению средств технологического оснащения для обработки нежестких деталей сложной формы.

Третью группу представляют рекомендации по оптимизации технологической подготовки производства на базе сквозного параллельного цикла конструкторско-технологической подготовки производства и предметноориентированных САПР технологических процессов, и САПР конструктора.

Результаты диссертационной работы имеют обобщающий характер в части повышения эффективности механической обработки для деталей РКТ различной номенклатуры.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработанная и внедренная при производстве полусферы баллона высокого давления методика, включающая оптимизацию структуры технологического процесса, режимов резания и организацию параллельной конструкторско-технологической подготовки производства, позволяет

проводить модернизацию механической обработки сложного технологического объекта.

2. Доказана целесообразность использования в качестве критерия оптимизации при обработке деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей штрафной функции, где как целевая функция принята себестоимость обработки, а как индикаторная функция взяты ограничения по шероховатости обработанной поверхности, стойкости инструмента, значению силы резания, мощности станка, предельным значениям параметров режима резания. Предложен метод поиска минимума штрафной функции.

3. Экспериментальными исследованиями показано, что использование оптимальных режимов резания при обработке сложной криволинейной поверхности позволяет повысить эффективность процесса резания за счет улучшения условий работы режущего инструмента.

4. Проведенные экспериментальные и аналитические исследования позволили получить и использовать в расчетах и рекомендациях новые зависимости в области резания труднообрабатываемых материалов: параметров шероховатости поверхности от режимов резания при точении; силы резания и стойкости инструмента от режима резания и угла в плане; влияния различных марок СОЖ на коэффициент трения, шероховатость и силу резания.

5. Проведенные исследования показали, что критерием оптимальности модернизации структуры производства может являться сумма минимумов частных критериев оптимальности элементов структуры.

6. Разработанная методика параллельной конструкторско-технологической подготовки производства позволила использовать предметноориентированные САПР, оптимальные для конструктора и технолога соответственно. Практическая реализация методики сократила на 20% время на подготовку производства и обеспечила использование в автоматизированном виде данных технологического процесса в системе управления жизненным циклом изделия.

7. Реализация результатов исследований по сформулированной научной задаче позволила повысить эффективность механической обработки деталей оболочкового типа для баллонов высокого давления с уменьшением на 25% числа установов, заменой 80% специального инструмента на нормализованный сборный, снижением на 30% себестоимости обработки и на 32% трудоемкости.

8. Результаты диссертационной работы обеспечили возможность разработки технологических процессов и управляющих программ для обработки деталей баллонов высокого давления на токарном станке с ЧПУ, прошедших апробацию при изготовлении промышленной партии на ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия». Эти же результаты создали основу для разработки технологической инструкции и методики, внедренных на ЗАО ЗЭМ и принятых к применению на ЗАО НПО «Авангард».

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Шачнев С.Ю. Повышение эффективности технологической подготовки механической обработки деталей ракетно-космической техники // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. - №2. – С.28-31.
2. Шачнев С.Ю. Обеспечение параметров шероховатости поверхности при обработке деталей из титановых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - №5. – С.53-56.
3. Шачнев С.Ю. Васильев С.Г. Исследования эффективности влияния СОЖ различных марок на параметры процесса механической обработки // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. - №6. – С.54-58.
4. Грубый С.В., Шачнев С.Ю. Оптимизация режимных параметров обработки шар – баллонов на токарных операциях // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. - №1. – С.49-55.
5. Грубый С.В., Шачнев С.Ю. Повышение эффективности механической обработки шар – баллонов // Проблема качества машин и их конкурентоспособности: Сб. докл. 6-ой международной научно- технической конф. – Брянск. 2008. – С.174-175.
6. Грубый С.В., Шачнев С.Ю. Оптимизация технологических решений по выбору инструментов и режимов обработки шар – баллонов // Инструментальные системы машиностроительных производств: Вестник Тульского Государственного университета. Сер. инструментальные и технологические системы: материалы международной юбилейной научно- технической конф. – Тула. – 2008. – С.40-42.
7. Шачнев С.Ю., Грубый С.В. Результаты оптимизации механической обработки шар – баллонов // Машиностроительные технологии: Сб. матер. Всероссийской научно-технической конференции. – Москва – 2008. – С.78-80.