



**М. Г. Галкин**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И РАЗМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ ПРУТКОВЫХ ЗАГОТОВОК**

### **Электронный образовательный текстовый ресурс**

Квалификация (степень) «Магистр»

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Методология исследований в технологии машиностроения» по направлению 15.04.05.

Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств для образовательной программы «Технология машиностроения»

Работа знакомит слушателей с моделированием технологического процесса обработки прутковой заготовки из чёрного металла. В процессе выполнения работы исследуется точность спроектированного технологического процесса. При разработке операционного описания определяются оптимальные режимы резания на всех технологических переходах с использованием графического и аналитического методов решения оптимизационных задач с использованием среды программирования Visual Basic.

**Подготовлено кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты»  
Института новых материалов и технологий**

Екатеринбург

2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ПЕРВАЯ ЧАСТЬ.....	6
2. ВТОРАЯ ЧАСТЬ.....	12
3. ТРЕТЬЯ ЧАСТЬ.....	15
3.1. Операция 05 для переходов первого этапа .....	15
3.2. Обработка торца № 4.....	16
4. ЧЕТВЁРТАЯ ЧАСТЬ.....	19
4.1. Операция 05 для переходов второго этапа.....	19
4.2. Обработка торца № 2.....	20
4.3. Обработка отверстия № 5 для сверла.....	21
4.4. Обработка отверстия № 5 для растачивания.....	21
4.5. Обработка поверхности № 6 для точения.....	22
5. ПЯТАЯ ЧАСТЬ .....	23
5.1. Маршрутное описание процесса обработки.....	23
5.2. Описание оформления 05 операции.....	24
5.2.1. Электронная карта эскизов.....	24
5.2.2. Электронная операционная карта.....	25
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	27
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	35

## ВВЕДЕНИЕ

Работа включает в себя выполнение пяти частей индивидуального задания по проектированию и выполнению параметрического анализа в процессе обработки заготовки из пруткового материала.

Первая часть работы посвящена моделированию маршрутно-операционного описания технологического процесса обработки прутковой заготовки. Данная часть выполняется по следующему алгоритму:

- 1) нумерация обрабатываемых поверхностей;
- 2) формирование планов обработки этих поверхностей;
- 3) формирование маршрутного описания техпроцесса;
- 4) выбор технологического оборудования;
- 4) оформление строки *A* маршрутной карты;
- 5) оформление строки *B* маршрутной карты;
- 6) формирование структуры операции;
- 7) расчёт диаметральных технологических размеров.

Для автоматизированного проектирования маршрута обработки прутковой заготовки, определения структуры операции и расчёта диаметральных технологических размеров в условиях многопереходной обработки реализован расчётный модуль **АТПП\_ТВ.xls** (*Автоматизация технологической подготовки производства тел вращения*) на платформе *Ms Excel*. Заставка интерфейса этого модуля представлена на рис. 1.

The screenshot displays the main interface of the ATPP\_TV.xls software. It features a technical drawing of a shaft with various diameters and features. The drawing includes dimensions such as 77.6h11, 4h12, 3h11, and 2h11. The software interface is divided into several sections:

- Top Section:** Contains fields for drawing name, material, and other parameters. The drawing name is "УрФУ" and the material is "1510.000000.000".
- Left Section:** A table with columns for operation number, code, and description. It lists various operations like "Токарно-револьверная" and "Горизонтально-фрезерная".
- Right Section:** A detailed table for operation parameters, including material, hardness, and tooling. It lists operations like "Установить и снять" and "Зенкеровать однократно".
- Bottom Section:** A navigation bar with buttons for "Маршрутная карта", "Карта эскизов", and "Операционная карта".

Рис. 1. Заставка оконного интерфейса АТПП\_ТВ.xls

*Вторая часть работы* посвящена решению задачи линейного размерного анализа процесса обработки заготовки. В процессе реализации этого алгоритма определяются линейные размеры заготовки и глубина резания в виде максимального припуска по ходу выполнения всего технологического процесса в соответствии с элементарными маршрутами обработки поверхностей. Последовательность выполнения этой части должна быть следующей:

- 1) построение размерной схемы;
- 2) создание исходного и производного графов;
- 3) формирование матрицы передаточных отношений;
- 4) проверка выполнения точности конструкторских размеров;
- 5) определение максимальных припусков;
- 6) определение технологических размеров;
- 7) построение операционных эскизов.

На завершающей стадии второй части работы строятся операционные эскизы на каждую разработанную операцию. Исходной информацией для их построения является рабочий чертёж детали и рассчитанные в первой и второй частях работы технологические размеры.

Для построения эскизов используются графические системы *AutoCAD* или *Компас 3D*. Результат работы графического алгоритма необходимо фиксировать в бланке технологического документа, имеющем название “*Карта эскизов*”.

*Третья часть работы* посвящена выбору оптимальных параметров режимов резания для стадии предварительной обработки с использованием графического алгоритма, где в качестве оптимизируемых параметров при обработке рассматривается частота вращения шпинделя и рабочая подача режущего инструмента. Следовательно, в качестве целевой функции принимается максимальная минутная подача режущего инструмента, которая определяет минимальное основное время обработки на рассматриваемом технологическом переходе. При этом при моделировании обработки чёрных металлов рационально использовать твёрдосплавные пластины, а при обработке цветных металлов желательно применять инструментальную оснастку из быстрорежущей стали.

В математической модели режима обработки любым инструментом рекомендуется использовать не менее шести ограничений. При этом последнее ограничение должно учитывать влияние силового фактора на режим резания.

*Четвёртая часть работы* посвящена выбору оптимальных параметров режимов резания для стадии окончательной обработки с использованием аналитического алгоритма. При выполнении токарной обработки в качестве оптимизируемых параметров необходимо рассматривать глубину резания и рабочую подачу инструмента, которые определяют максимальную площадь удаляемой стружки за оборот заготовки. При реализации других методов обработки нужно рассматривать частоту вращения шпинделя и рабочую подачу режущего инструмента, как и в третьей части работы. При этом последовательность реализации этого расчётного алгоритма осуществляется в автоматизированном режиме с использованием оконных интерфейсов на платформе *Ms Excel* в среде программирования *Visual Basic*. Следовательно, для реализации процесса оптимизации необходимо запустить нужную модель окна диалога, произвести её параметрическую настройку и выполнить оптимизационную процедуру режима обработки соответствующей поверхности.

На завершающей стадии оптимизации очередного перехода необходимо каждый раз фиксировать полученный результат в бланке операционной карты, используя алгоритм оконного интерфейса “*Режимы резания*” (рис. 1).

*Пятая часть работы* посвящена оформлению технологической документации, состоящей из совокупности маршрутной карты, карт эскизов и операционных карт, которые описывают процесс обработки заданной детали. Каждый режим резания, описывающий процесс обработки, должен содержать оптимальные значения. При этом на всех основных переходах должно быть вычислено оперативное время их выполнения. Карты должны быть ранжированы в комплекте исходя из требований к их оформлению.

При этом весь комплект технологической документации создаётся в автоматическом режиме после реализации вычислительных алгоритмов в соответствующих оконных интерфейсах.

Визуализация конкретных документов в электронном виде осуществляется по вкладкам “*МК*”, “*ОК1*”, “*ОК2*” и т. д., расположенным в нижней части рабочего листа платформы *Ms Excel*.

## 1. ПЕРВАЯ ЧАСТЬ

**Цель задания:** Выполнение нумерации обрабатываемых поверхностей. Формирование элементарных маршрутов обработки пронумерованных поверхностей. Создание последовательности технологических операций. Выбор универсального оборудования. Заполнение строк *A* и *B* маршрутной карты.

В качестве исходных данных рассматривается чертёж детали с пронумерованными поверхностями для последующей оптимизации, который представлен на рис. 2.

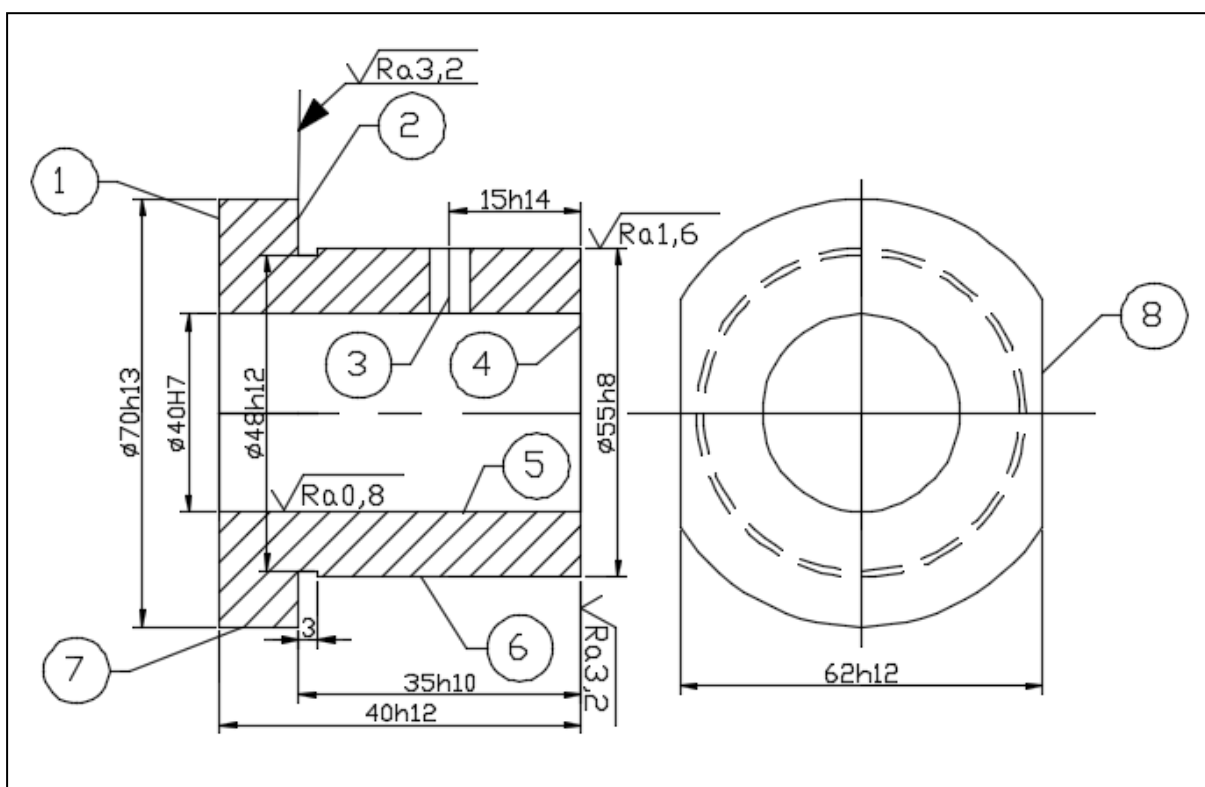


Рис. 2. Эскиз рабочего чертежа

Из анализа рис. 2 следует, что оптимизировать необходимо режимы обработки для восьми обозначенных поверхностей.

На следующем шаге необходимо сформировать элементарные маршруты обработки поверхностей, руководствуясь моделью принципиальной схемы процесса обработки.

В данном случае общий план обработки детали (рис. 2) будет иметь вид, который представлен на рис. 3.

№	ПЕРВЫЙ ЭТАП	ВТОРОЙ ЭТАП
1	Отрезать	<input type="checkbox"/>
2	Подрезать предварительно	<input type="checkbox"/> Подрезать окончательно
3	Сверлить_рассверлить	<input type="checkbox"/>
4	Подрезать напуск	<input type="checkbox"/>
5	Сверлить_рассверлить	<input type="checkbox"/> Расточить однократно
6	Точить предварительно	<input type="checkbox"/> Точить окончательно
7	Точить однократно	<input type="checkbox"/>
8	Фрезеровать лыску од.	<input type="checkbox"/>

Рис. 3. Общий план обработки детали

Далее необходимо сформировать маршрут обработки данной детали в виде совокупности упорядоченных операций.

В рассматриваемом варианте будут сформированы три операции по ходу обработки детали, которые представлены на рис. 4.

№

УСТАНОВ А	УСТАНОВ Б
Подрезать предварительно2	Отрезать1.
Подрезать напуск4	
Сверлить_рассверлить5	
Точить предварительно6	
Точить однократно7	
Подрезать окончательно2	
Расточить однократно5	
Точить окончательно6	

№

УСТАНОВ А

Фрезеровать лыску од.8

№

УСТАНОВ А

Сверлить\_рассверлить3

Рис. 4. Маршрутное описание процесса обработки

Для сформированных трёх операций далее необходимо создать маршрутную карту, состоящую из строки А и строки Б. Данные информационные объекты представлены на рис. 5 и на рис. 6.

Маршрут обработки						
№ оп	Наименование	№ ИТБ	Цех	Уч	РМ	Станок
5	4111,Токарно-револьверная	ИОТ-1	1	1	01	1Е340П
10	4261,Вертикально-фрезерная	ИОТ-2	1	1	02	6Р10
15	4121,Вертикально-сверлильная	ИОТ-1	1	2	01	2Н118

Рис. 5. Информация для строки А маршрутной карты

Обозначения документов			Данные о материале								
Наименование детали	Конструкторский код	Технологический код	Сортамент								
Втулка	1510 00000 000	10141	Сталь45 ГОСТ1050-2013								
Нормы расхода материала											
Код единицы массы	Масса детали по черт.	Единица	Норма расхода	КИ	Код заготовки						
166	2	1	xxx	0,6	Прокат						
Профиль и		Кол-во дет.из загот.	Масса заготовки								
40x70		10	xxx								
Информация о трудозатратах по операциям											
	СМ	Проф.	Разр.	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	К шт	Т пз	Т шт
xxxxxx,1Е340П	3	18217	410	1X	1	1	1	100	1	xx	xx
xxxxxx,6Р10	2	18632	510	1X	1	1	1	100	1	xx	xx
xxxxxx,2Н118	3	17335	310	1Р	1	1	1	100	1	xx	xx

Рис. 6. Информация для строки Б маршрутной карты

На заключительном этапе создания документа необходимо получить фрагмент маршрутной карты на листе “МК”. Его вид представлен на рис. 7.

ГОСТ 3.1118-82 форма 1																		
Дубл.	Взам.	Подл.										1	1					
Разраб.			Урфу			1510 00000 000			10141									
Н.контр.			Втулка															
И01			Сталь45 ГОСТ1050-2013															
И02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н.рвск.	КИМ	Код загот.	Профиль и размеры		КД	МЗ							
	166	кг	2	1	xxx	0,6	Прокат	40x70		10	XXX							
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код наименования операции			Обозначение документа										
Б	Код наименования оборудования							СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.
А03	1	1	01	5	4111,Токарно-револьверная			ИОТ-1										
Б04	xxxxxx,1Е340П				3	18217	410	1X	1	1	1	1	100	1				
А05	1	1	02	10	4261,Вертикально-фрезерная			ИОТ-2										
Б06	xxxxxx,6Р10				2	18632	510	1X	1	1	1	1	100	1				
А07	1	2	01	15	4121,Вертикально-сверлильная			ИОТ-1										
Б08	xxxxxx,2Н118				3	17335	310	1Р	1	1	1	1	100	1				
А09																		
Б10																		
А11																		
Б12																		
А13																		
Б14																		
МК Маршрутная карта																	2	

Рис. 7. Маршрутная карта технологического процесса

На следующем шаге необходимо рассчитать технологические размеры пронумерованных на детали диаметральных поверхностей, которые содержат

многопереходную обработку (два и более перехода, включая поверхность на исходной заготовке). Это будут поверхности №5, №6 и №7 (рис. 2). Данная процедура будет выполняться в оконном интерфейсе “Окно диалога для расчёта диаметральных поверхностей на заготовке”

Для пятой поверхности результат расчёта размеров показан на рис. 8.

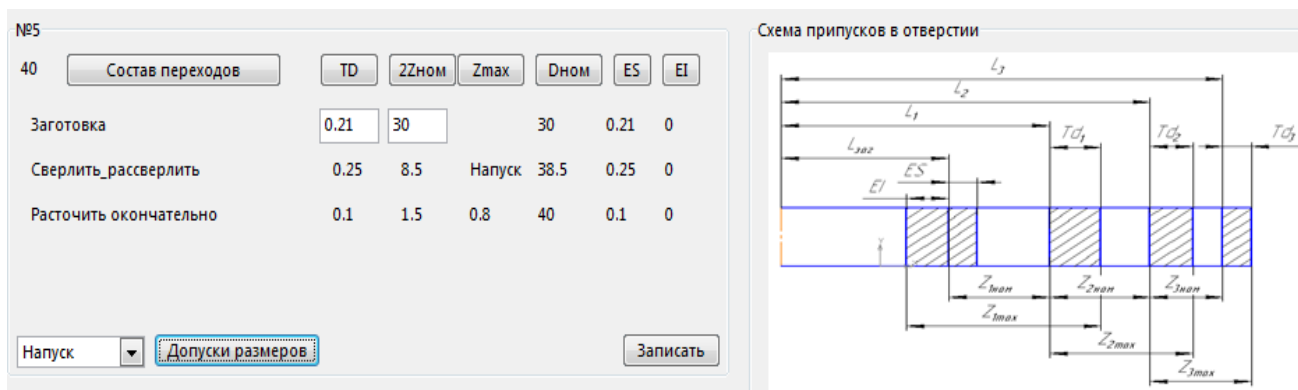


Рис. 8. Алгоритм расчёта размеров отверстия в сплошном материале

В данном случае выполняются три перехода (сверлить, рассверлить и расточить окончательно) с тремя диаметральными размерами.

Для шестой наружной поверхности результат расчёта диаметральных размерных связей показан на рис. 9.

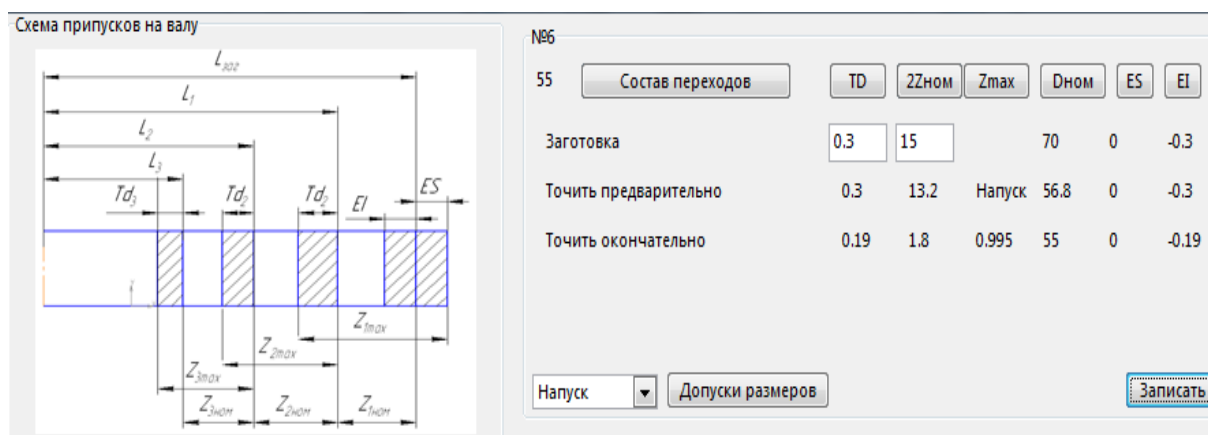


Рис. 9. Алгоритм расчёта диаметральных размеров (пов. №6)

В данном случае на первом переходе удаляется напуск, т. к. заготовка представляет из себя прутки. Следовательно, номинальная величина напуска в результате автоматизированного расчёта получилась 6,6 мм.

Для седьмой наружной поверхности результат расчёта технологических диаметральных размеров показан на рис. 10.

№7	TD	Zном	Zmax	Дном	ES	EI
70	Состав переходов					
Заготовка	0.75	5		75	0	-0.75
Точить однократно	0.3	5	2.65	70	0	-0.3

Рис. 10. Алгоритм расчёта наружных диаметральных размеров (пов. №7)

В рассматриваемом варианте производится однопереходная обработка седьмой поверхности, и на первом переходе удаляется припуск с наружной поверхности прутка. Исходя из заданной величины припуска на данную поверхность, равную по справочнику 5 мм, был автоматически получен размер прутка, равный 75 мм.

После выполнения этого расчётного алгоритма для всех диаметральных размеров, формируется в автоматизированном режиме банк данных, содержащий все расчётные параметры по всем этапам обработки каждой цилиндрической поверхности. Вид этого документа представлен на рис. 11.

БАНК ДАННЫХ С ПАРАМЕТРАМИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ																ПАРАМЕТРЫ ЗАГОТОВКИ					
N пов	Первый этап					Второй этап					Третий этап					Четвёртый этап			D ном	ES	EI
	D ном	ES	EI	IT	ZZ max	D ном	ES	EI	IT	ZZ max	D ном	ES	EI	IT	ZZ max	D ном	ES	EI			
№5	38.5	0.25	0	12	Напуск	40	0.1	0	10	0.8						30	0.21	0			
№6	56.8	0	-0.3	12	Напуск	55	0	-0.19	11	0.995						70	0	-0.3			
№7	70	0	-0.3	12	2.65											75	0	-0.75			

Рис. 11. Банк данных с результатами расчёта диаметральных размеров

На следующем шаге необходимо начинать проектирование операционного описания процесса обработки заданной прутковой заготовки.

Для начала реализации этого алгоритма нужно сформировать структуру каждой операции, которая заключается в упорядочении переходов внутри созданных операций. Эта процедура реализуется в окне “Формирование структуры операции”. Данный интерфейс представляет две зоны с текстовыми полями для моделирования расположения переходов в установках А и Б проектируемой операции. Каждый установ на начальной стадии состоит из стартового и структурированного вариантов. Следовательно, задача структурирования операции заключается в последовательном переносе переходов установка из стартового списка в структурированный в соответствии с технологическими правилами, используя кнопку “Переместить” до полного упорядочения. Вид оконного интерфейса этой процедуры для 05 операции представлен на рис. 12.

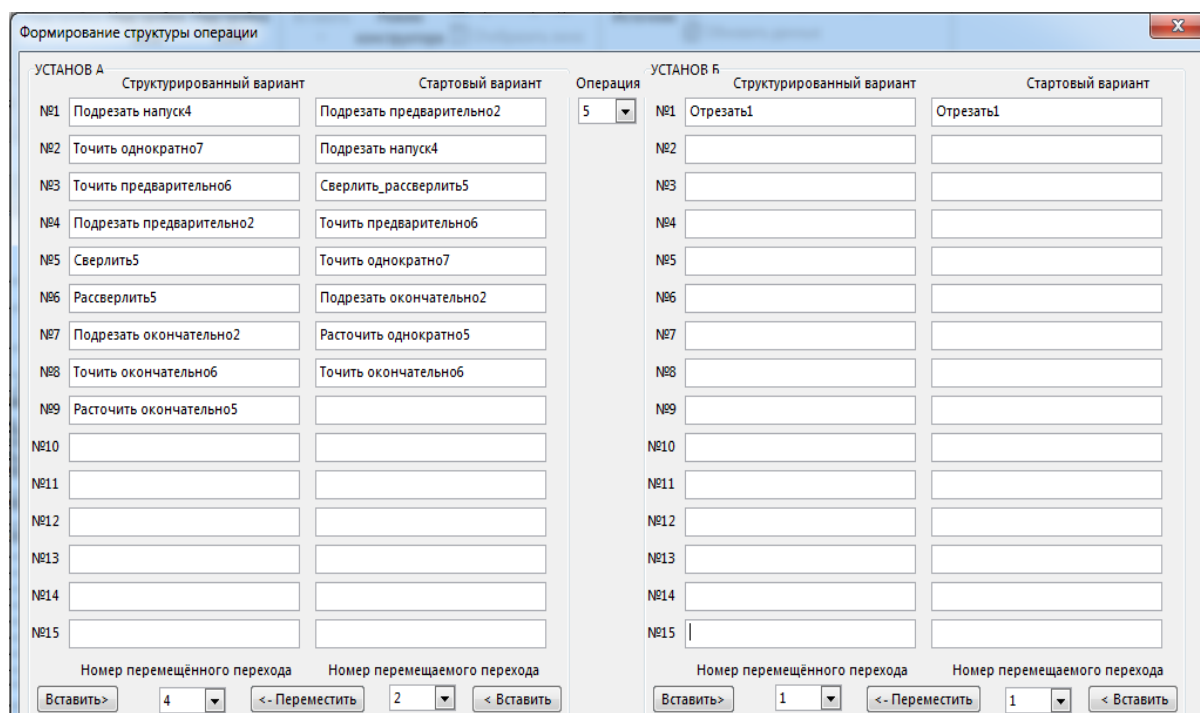


Рис. 12. Оконный интерфейс структурирования операции

## 2. ВТОРАЯ ЧАСТЬ

**Цель задания:** Проведение линейного размерного анализа с целью определения точности спроектированного технологического процесса и расчёта линейных технологических размеров при обработке от состояния прутка до готовой детали.

Необходимо рассчитать технологические размеры, определяющие положения всех торцовых поверхностей на детали, осей поперечных отверстий и канавок, не примыкающих к торцам. В данном случае это будут конструктивные элементы с номерами №1, №2, №3 и №4.

Расчётный алгоритм нужно начинать с создания размерной схемы вдоль оси детали. Для её графической интерпретации используется графическая система *AutoCAD*, а в качестве резервной версии *Компас 3D*. Вид размерной схемы для рассматриваемой детали представлен на рис. 13.

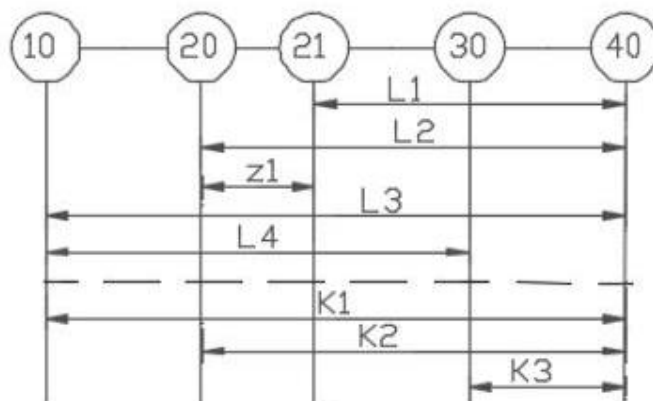


Рис. 13. Линейная размерная схема вдоль оси детали

На следующем шаге данной части работы нужно построить матрицу передаточных отношений размерных связей выявляя последовательно все размерные цепи в размерной схеме (рис. 13). На схеме этих цепей будет четыре в соответствии с количеством замыкающих звеньев.

Матрица будет иметь вид, представленный на рис. 14.

	L1	L2	L3	L4
K1			1	
K2		1		
K3			1	-1
z1	-1	1		

Рис. 14. Матрица передаточных отношений размерных связей

Далее, в соответствии с параметрами информационной модели на рис. 14 необходимо записать уравнения размерных цепей, которые формируются вдоль оси детали.

Уравнения размерных связей будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 K1 &= L3 \\
 K2 &= L2 \\
 K3 &= L3 - L4 \\
 Z1 &= L2 - L1
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Для решения системы (1) нужно подготовить исходные данные следующего вида:

- 1) точность конструкторских размеров с чертежа детали  
 $T(K1) = 0,25 \text{ мм}; T(K2) = 0,1 \text{ мм}; T(K3) = 0,48 \text{ мм};$
- 2) точность выполнения линейных технологических размеров  
 $T(L1) = 0,25 \text{ мм}; T(L2) = 0,1 \text{ мм}; T(L3) = 0,25 \text{ мм}; T(L4) = 0,21 \text{ мм};$
- 3) номинальные значения замыкающих звеньев  
 $K1 = 40 \text{ мм}; K2 = 35 \text{ мм}; K3 = 15 \text{ мм}; z1 = 0,45 \text{ мм}.$

На следующем шаге необходимо приступить к реализации расчётных процедур, в процессе выполнения которых осуществляется оценка точности спроектированного процесса обработки, определение колебаний припусков при обработке торцовых поверхностей и расчёт технологических размеров, формируемых в процессе механообработки. Для выполнения этих действий используется программный модуль *Расчёт размеров\_МО.xls*.

Все подготовленные данные нужно ввести в окно диалога этого программного продукта. Вид оконного интерфейса с введённой информацией представлен на рис. 15.

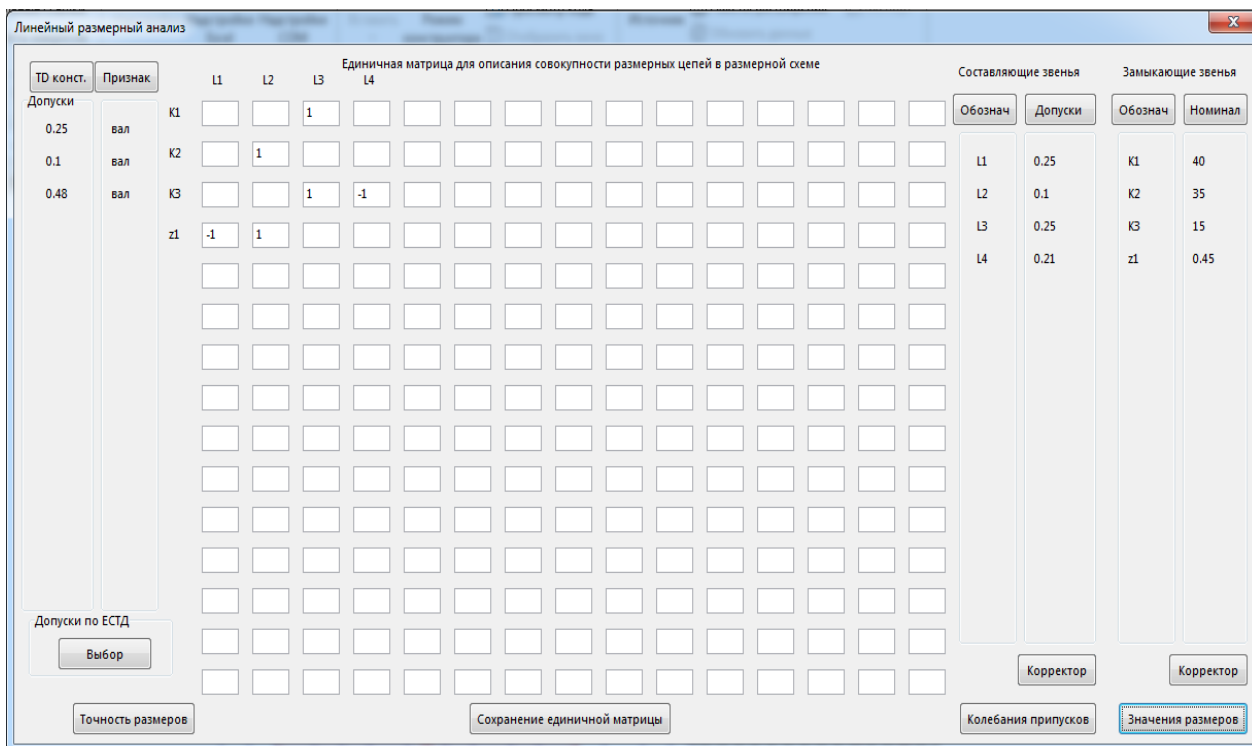


Рис. 15. Оконный интерфейс линейного размерного анализа

Далее необходимо приступить к решению сформированной системы уравнений размерных связей. В результате последовательного выполнения трёх автоматизированных процедур в программном модуле *PM\_MO.xls* определяются все параметры, которые зафиксированы в размерной схеме. Результаты работы этого алгоритма представлены на рис. 16.

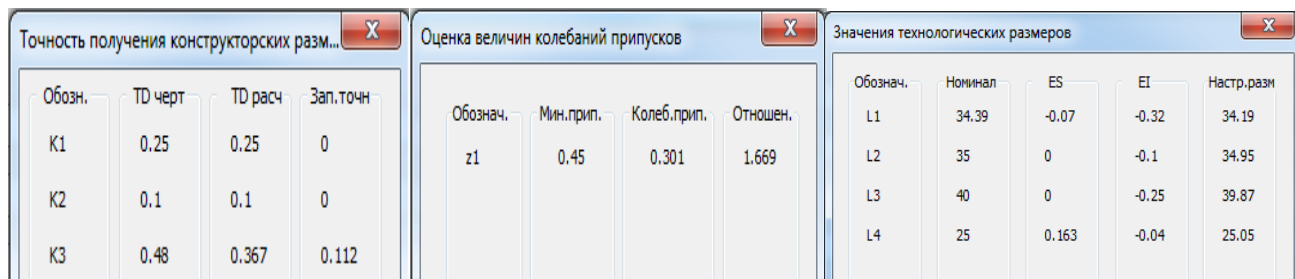


Рис. 16. Результаты автоматизированного расчёта

### 3. ТРЕТЬЯ ЧАСТЬ

**Цель задания:** Определение оптимальных режимов резания в виде частоты вращения шпинделя и рабочей подачи режущего инструмента для пронумерованных поверхностей с использованием графического алгоритма решения задачи.

При выполнении данной части работы нужно рассматривать только те переходы, которые попали в первый этап обработки (рис. 4). К этим технологическим элементам нужно применить графический алгоритм решения задачи.

#### 3.1. Операция 05 для переходов первого этапа

На этой операции необходимо определить оптимальные режимы обработки в соответствии с информацией на рис. 9 для переходов: *подрезать напуск\_4, точить однократно\_7, точить предварительно\_6, сверлить\_5, рассверлить\_5, отрезать\_1*.

Математическая модель для этих переходов должна содержать следующие шесть ограничений:

- 1) по минимальной частоте вращения шпинделя;
- 2) по максимальной частоте вращения шпинделя;
- 3) по минимальной подаче режущего инструмента;
- 4) по качеству обрабатываемой поверхности;
- 5) по стойкости режущего инструмента;
- 6) по мощности механизма главного привода.

Параметры, которые описывают каждое из ограничений должны быть представлены в логарифмических координатах для перевода математической модели в линейный вид для возможности реализации графического алгоритма при оптимизации частоты вращения шпинделя и рабочей подачи инструмента. Математическая модель, которая моделирует ограничения в процессе резания при обработке различными видами резцов для всех переходов будет одинаковой.

Следовательно, для переходов данной операции *подрезать напуск\_4, точить однократно\_7, точить предварительно\_6, отрезать\_1* она будет общей. Вид этой модели представлен под цифрой (2).

$$\begin{aligned}
& \ln(n) \geq \ln(n_{\min}) \\
& \ln(n) \leq \ln(n_{\max}) \\
& \ln(100s) \geq \ln(100s_{\min}) \\
& \ln(100s) \leq \ln(100s_{\text{табл}}) \\
& \ln(n) + y_v \cdot \ln(100 \cdot s) \leq \ln\left(\frac{100^{y_v} \cdot 318 \cdot C_v \cdot K_v}{T_H^m \cdot t^{x_v} \cdot d}\right) \\
& (n_z + 1) \cdot \ln(n) + y_z \ln(100 \cdot s) \leq \ln\left(\frac{6120 \cdot 1000^{(n_z+1)} \cdot 100^{y_z} \cdot N_{\text{дв}} \cdot \eta}{C_{p_z} \cdot t^{x_z} \cdot \pi^{(n_z+1)} \cdot d^{(n_z+1)} \cdot K_{p_z}}\right)
\end{aligned} \tag{2}$$

Далее формируется целевая функция, которая в преобразованном виде будет записана следующим образом:

$$\ln(n) + \ln(100 \cdot s) \Rightarrow \max . \tag{3}$$

Зависимость (3) в логарифмических координатах предполагает обеспечение максимальной производительности процесса обработки, посредством максимальной минутной подачи режущего инструмента.

Для вычисления оптимизируемых параметров, на начальной стадии вычислительного процесса нужно определить значения базисных переменных, которые образуют правые части неравенств в системе (2). При этом значения переменных под логарифмами необходимо принимать из технологического справочника и также использовать результаты расчётов в предыдущих частях работы.

### 3.2. Обработка торца № 4

Руководствуясь данными из справочника технолога-машиностроителя параметры, образующие значения базисных переменных в рассматриваемом примере при обработке торца №4, принимают следующие значения:

- 1) по кинематике оборудования  
 $n_{\min} = 12,5$  об/мин;  $n_{\max} = 2500$  об/мин;  $s_{\min} = 0,05$  мм/об;
- 2) по качеству формируемой поверхности  
 $s_{\text{табл}} = 0,70$  мм/об;
- 3) по стойкости режущего инструмента  
 $C_v = 350$ ;  $K_v = 0,9$ ;  $T_H = 30$  мин;  $t = 0,75$  мм;  $d = 70$  мм;  $x_v = 0,15$ ;  
 $y_v = 0,45$ ;  $m = 0,2$ ;

4) по мощности главного привода

$$C_{pz} = 350; K_{pz} = 1,6; N_{об} = 4 \text{ кВт}; t = 0,75 \text{ мм}; d = 70 \text{ мм}; x_z = 1,0;$$
$$y_z = 0,85; n_z = - 0,15; \eta = 0,75.$$

После вычислительных процедур базисные переменные будут иметь следующие значения:

$$\text{Ln}(C_1) = 2,5; \text{Ln}(C_2) = 7,8; \text{Ln}(C_3) = 1,6; \text{Ln}(C_4) = 4,2; \text{Ln}(C_5) = 8,7;$$
$$\text{Ln}(C_6) = 9,2.$$

Откуда зависимости (2) для построения ограничений при обработке рассматриваемой торцевой поверхности будут иметь следующий вид:

- 1)  $\text{Ln}(n) \geq 2,5;$
- 2)  $\text{Ln}(n) \leq 7,8;$
- 3)  $\text{Ln}(100s) \geq 1,6;$
- 4)  $\text{Ln}(100s) \leq 4,2;$
- 5)  $\text{Ln}(n) + y_v \text{Ln}(100s) \leq 8,7;$
- 6)  $(n_z + 1) \text{Ln}(n) + y_z \text{Ln}(100s) \leq 9,2.$

Графическая интерпретация области допустимых значений и положения целевой функции в оптимальной вершине для поверхности №4 будет иметь вид, который представлен на рис. 17.

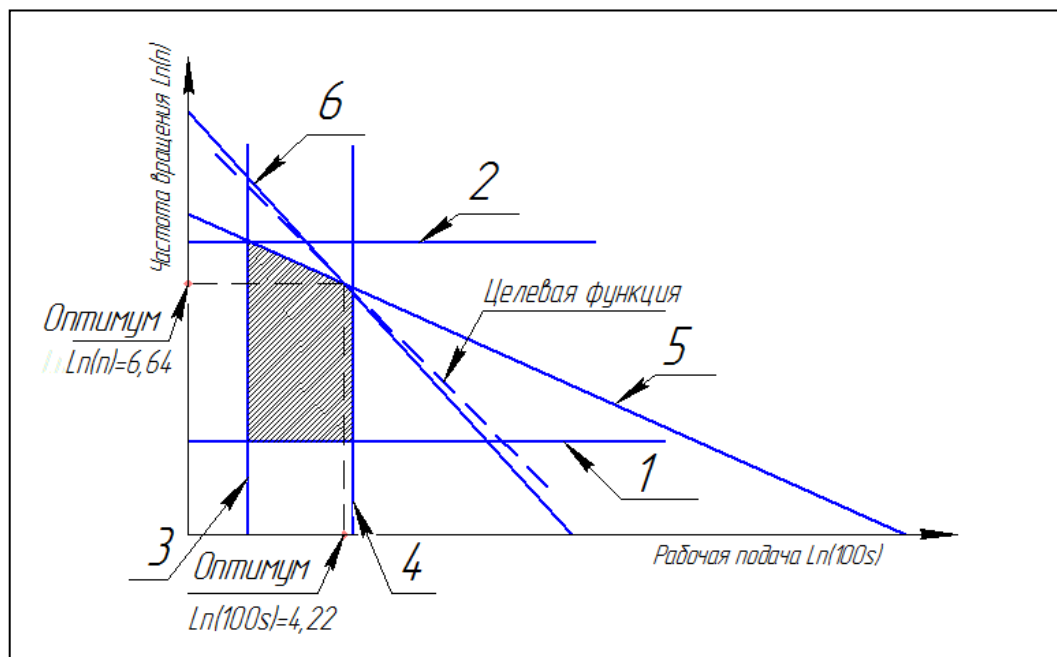


Рис. 17. Определение оптимальных параметров для торца №4

Далее нужно вычислить оптимальные параметры в вершине, которую зафиксировала целевая функция. Для этого нужно выполнить операцию потенцирования со значениями, описывающими координаты оптимальной вершины на осях координат  $L_n(n)$  и  $L_n(100s)$ . После осуществления данного математического преобразования оптимальные параметры  $n_{opt}$  и  $s_{opt}$  примут для торца №4 следующие значения (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальные значения для рассматриваемого торца № 4

Поверхность №4	
$n_{opt}$ (об/мин)	$s_{opt}$ (мм/об)
765	0,68

Аналогичным образом определяются оптимальные параметры режима резания для каждого перехода этой операции, который зафиксирован в первом этапе обработки.

Если справочные данные, соответствующие разным поверхностям, совпадают, то они объединяются в одну расчётную модель и будут иметь общий график и одинаковую оптимальную вершину (рис. 17).

Глубина резания, входящая в базисные переменные и не участвующая в вычислительном процессе в качестве оптимизируемого параметра, должна быть определена на этапе размерного моделирования в первой или второй частях работы. Это значение должно соответствовать максимальному припуску при обработке рассматриваемой поверхности.

Все рассчитанные оптимальные параметры далее необходимо внести в соответствующие ячейки операционных карт при их оформлении.

По аналогичному алгоритму в данной части работы необходимо рассмотреть все операции в порядке их расположения в маршруте обработки.

## 4. ЧЕТВЁРТАЯ ЧАСТЬ

**Цель задания:** Определение оптимальных режимов резания в виде рабочей подачи режущего инструмента, частоты вращения шпинделя или глубины резания для пронумерованных поверхностей на втором этапе обработки с использованием аналитического алгоритма нелинейной оптимизации.

При выполнении данной части работы нужно рассматривать только те переходы, которые попали во второй этап обработки (рис. 3). К этим технологическим элементам нужно применить аналитический алгоритм решения задачи.

### 4.1. Операция 05 для переходов второго этапа

На этой операции необходимо определить оптимальные режимы обработки в соответствии с информацией на рис. 8 для переходов: *подрезать окончательно\_2, расточить окончательно\_5, точить окончательно\_6, рассверлить\_5.*

При окончательной обработке поверхностей на заготовке при помощи различных видов резцов рационально для обеспечения максимальной производительности этого процесса при заданном периоде стойкости режущего инструмента, выбирать оптимизируемые параметры, позволяющие удалять, как можно большую площадь сечения срезаемого слоя, определяемую глубиной резания  $t$  (мм) и подачей инструмента за оборот заготовки  $s$  (мм/об). В этой постановке задачи целевая функция с данными параметрами будет иметь следующий вид:

$$F = t \times s \rightarrow \max \quad (4)$$

В этом варианте решения задачи скорость резания  $v_r$  для увеличения объема снимаемого металла в единицу времени, будет определяться исходя из регламентированной стойкости режущего инструмента.

В математической модели предлагается использовать пять факторов, влияющих на процесс резания и обеспечивающих качественные показатели обрабатываемой поверхности. Ограничения в формализованном виде будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} t &\geq C_1 = t_{min} \\ t &\leq C_2 = t_{max} \\ s &\geq C_3 = s_{min} \\ s &\leq C_4 = s_p \\ t^{x_v} \cdot s^{y_v} &\leq C_5 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для токарной обработки в расчётной модели (5) подача  $s_p$  определяется на основании экспериментального исследования линейным полиномом, исходя из шероховатости поверхности  $Ra$  и радиуса при вершине резца  $r_{\psi}$ . Это выражение имеет следующий вид:

$$s_p = (0,05 \cdot Ra) + (0,08 \cdot r_{\psi}) + 0,007 \quad (6)$$

#### 4.2. Обработка торца № 2

Для обработки торца № 2 необходимо выбрать соответствующий оконный интерфейс в программном модуле **Оптимизация\_PO.xls**, заполнить текстовые поля требуемыми данными и произвести выбор оптимальных параметров при окончательной обработке торца № 2. Вид окна диалога приведён на рис. 18.

Геометрические параметры		Кинематические параметры	
Шероховатость поверхности	3.2	Максимальная глубина	0.75
Радиус вершины резца	0.4	Минимальная глубина	0.45
Стойкость инструмента	30	Минимальная подача	0.05
Обрабатываемый материал	Сталь40	Диаметр обработки	70
Базовая скорость резания	350	Рекомендуемая скорость	295.554
Ограничение по качеству	0.199	Ограничение по стойкости	0.6854

Расчёт системы ограничений

**ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РЕЗАНИЯ**

Глубина резания	Подача инструмента	Частота вращения
0.75	0.18780	1344.00

Оптимизировать

Рис. 18. Окно диалога нелинейной оптимизации при подрезке торца

### 4.3. Обработка отверстия № 5 для сверла

Для обработки отверстия после сверления в сплошном материале расчётные параметры в виде глубины резания, обрабатываемого материала и геометрии поверхности принимаются из ранее полученных информационных моделей на рис. 2 и рис. 11. Оконный интерфейс с заполненными текстовыми полями и оптимальными параметрами представлен на рис. 19.

ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ РАССВЕРЛИВАНИЯ	
Min. частота вращения C1	48
Max. частота вращения C2	2000
Min. подача инструмента C3	0.05
Табличная подача сверла C4	1.16

Кинематические параметры	
Стойкость	30
Глубина	4, 0.2
Кэфф. Cv	16.2
Кэфф. qv	0.4
Кэфф. Yv	0.5
Кэфф. m	0.2
Кэфф. Kv	1.2
ОГРАНИЧЕНИЕ C5	267.55

Силовые параметры	
Мощность	6
Kz	1.15
Доп. сила Ps	8000
КПД	0.7
Сила	67
Кэфф. Cm - Cr	0.09
Кэфф. qm	1
Кэфф. Ym - Yr	0.8, 0.65
Кэфф. Xm	0.9, 1.2
ОГРАНИЧЕНИЕ C6	199.3
ОГРАНИЧЕНИЕ C7	1.9671

ОКНО РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ			
Частота вращения шпинделя	358.3	Минутная подача сверла	172.1
Подача сверла за оборот	0.480	Основное время	0.232
Длина обработки	40		

Рис. 19. Окно диалога нелинейной оптимизации при рассверливании

### 4.4. Обработка отверстия № 5 для растачивания

Для выбора оптимальных параметров при растачивании отверстия № 5 после его предварительной обработки сверлом, расчётные параметры в виде максимальной и минимальной глубины резания, качества обработанной поверхности и её геометрии принимаются из ранее полученных информационных моделей на рис. 2 и рис. 10. Оконный интерфейс с заполненными текстовыми полями и оптимальными параметрами представлен на рис. 20.

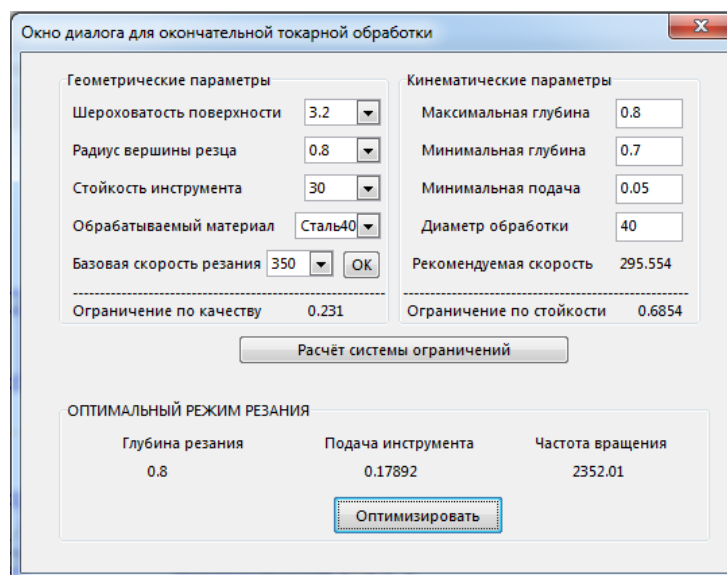


Рис. 20. Окно диалога нелинейной оптимизации при растачивании

#### 4.5. Обработка поверхности №6 для точения

Для выбора оптимальных параметров при точении поверхности № 6, расчётные параметры в виде максимальной и минимальной глубины резания, качества обработанной поверхности и её геометрии принимаются из ранее полученных информационных моделей на рис. 2 и рис. 11. Оконный интерфейс с заполненными текстовыми полями и оптимальными параметрами представлен на рис. 21.

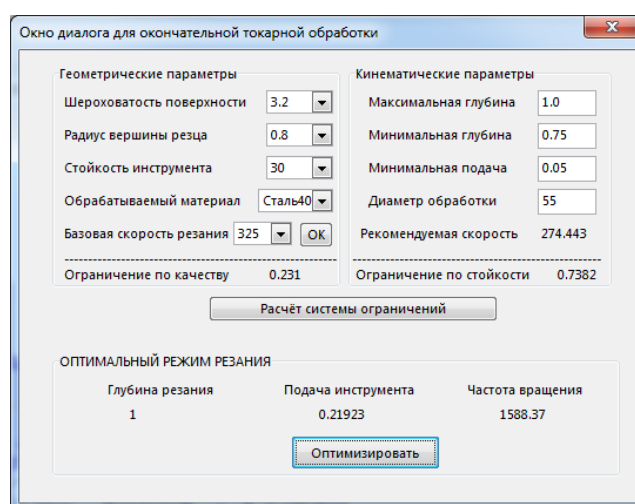


Рис. 21. Окно диалога нелинейной оптимизации при точении





## 5.2.2. Электронная операционная карта

Операционная карта на 05 операцию создаётся после построения карты эскизов, оптимизации режимов резания, нормирования и выбора средств технологического обеспечения операции в виде вспомогательного и контрольного инструмента. Алгоритм заполнения карты реализован в программном продукте *АТПП\_ТВ.xls*. Первый лист имеет форму 3, а все последующие, используемые для полного описания операции форму 3а. Первый лист карты для 05 операции представлен на рис. 24. На листе вспомогательное время на переход “Установить и снять” зафиксировано в первом основном переходе “Подрезать напуск4”.

Второй и третий листы карты представлены на рис. 25.

ГОСТ 3.1404-86 форма 3											
Дубл.											
Взам.											
Подл.											
								3	1		
Разраб.				Урфу	1510 000000 000			60141.xxxx			
Н.контр.										05	
Наименование операции		Материал			Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры		МЗ	КОИД
						К2					1
Оборудование, устройство ЧПУ		Обозначение программы			То	Тв	Тпс	Тшт.	СОЖ		
					4,03	2	53	6,78			
Р		ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V		
001	Установить и снять										
T02	396110 Патрон токарный;										
003	Подрезать напуск4										
								0,10	0,54		
T04	XXXXXX Передний резцедержатель;										
T05	РезецТ5К10ГОСТ9795-84 393311 Штангенциркуль										
P06					75,0	38	3,00	0,56	760	165,00	
007	Точить однократно7										
								0,23	0,15		
T08	XXXXXX Державка однорезцовая наружная;										
T09	РезецТ5К10ГОСТ9795-84 393311 Штангенциркуль										
P10					70,0	44	2,50	1	0,40	530 116,0	
011	Точить предварительно6										
								0,13	0,17		
T12	XXXXXX Патрон;										
T13	РезецТ5К10ГОСТ9795-84 393311 Штангенциркуль										
<b>OK</b>	Операционная карта										

Рис. 24. Первый лист операционной карты

													ГОСТ 3.1404-86 форма За						
Дубл.																			
Взам.																			
Подл.				Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата						
												2							
												05							
												1510 000000 000							
Р	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V	
01													56,8	34,25	6,60	1	0,56	530	94,00
02	Сверлить5																	1,61	0,17
03	XXXXXX Патрон;																		
04	СверлоР6М5ГОСТ12121-77																	393311 Штангенциркуль	
05													30,0	44	15,00	1	0,10	380	35,00
06	Рассверлить5																	0,51	0,17
07	XXXXXX Передний резцедержатель;																		
08	СверлоР6М5ГОСТ12121-77																	393311 Штангенциркуль	
09													38,0	44	4,00	1	0,50	260	31,00
10	Подрезать окончательно2																	0,03	0,23
11	XXXXXX Державка однорезцовая внутренняя;																		
12	PCLNR 16-16-H 09																	393311 Штангенциркуль	
13													70,0	7,3	0,75	1	0,20	1500	330,00
14	Точить окончательно6																	0,13	0,17
15	XXXXXX Державка однорезцовая внутренняя;																		
16	PCLNR 16-16-H 09																	393120 Калибр-пробка	
17													55,0	35,95	1,00	1	0,20	1500	230,00
18	Расточить однократно5																	0,16	0,17
19	XXXXXX Державка внутренняя с микробором;																		
<b>OK</b>												Операционная карта							

													ГОСТ 3.1404-86 форма За						
Дубл.																			
Взам.																			
Подл.				Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата						
												3							
												05							
												1510 000000 000							
Р	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ПИ	Д или В	L	t	i	S	n	V	
01	S25T SCLCR 09																	393120 Калибр-пробка	
02													40,0	39,9	0,80	1	0,14	2000	250,00
03	Отрезать1																	1,14	0,23
04																			
05	РезецТ5К10ГОСТ9795-84																		
06													70,0	39,9	2,00	1	0,10	190	42,00
07																			
08																			
09																			
10																		1	
11																			
12																			
13																			
14																		1	
15																			
16																			
17																			
18																		1	
19																			
<b>OK</b>												Операционная карта							

Рис. 25. Последующие листы операционной карты для 05 операции

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы оптимизации для инженеров: монография / А. М. Цирлин. – М. – Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 214 с.
2. Гузеев В.И., Батуев В. А., Бурков И. В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / Под ред. В. И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2005. 368 с.
3. Практика технологического размерного анализа: учебно – методическое пособие / М. Г. Галкин, А. С. Смагин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 107 с.
4. Размерный анализ при технологическом проектировании; учебное пособие/ В. Н. Ашихмин, В. В. Закураев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2005. 93 с.
5. Комягин В. Б. Программирование в Excel 5 и Excel 7 на языке Visual Basic. – М.: Радио и связь, 1996. – 320 с.: ил.
6. Курицкий Б. Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 – СПб.: BHV – Санкт-Петербург, 1997. – 384 с., ил.

### ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЁТА

Текстовая часть отчета оформляется в соответствии с ГОСТ 7.32.

Отчет по курсовой работе включает:

- титульный лист (приложение Б);
- задание на работу (приложение В);
- рецензию на работу (приложение Г)
- оглавление;
- введение;
- алгоритм выполнения расчётной части работы в соответствии с методическими материалами;
- заключение;
- библиографический список по ГОСТ 7.0.5-2008;
- приложение с оформленными по стандарту графическими материалами.

Отчет выполняется на листах формата А4 в компьютерном варианте.

Все иллюстративные материалы работы выполняются в компьютерном варианте.

Ссылки на литературу в тексте отчета необходимо указывать в квадратных скобках. В частности, указывается номер источника и страница.

Эскиз рабочего чертежа детали, соответствующий номеру выданного варианта, необходимо расположить в приложении А отчёта.

Комплект технологической документации необходимо расположить в приложении Б отчёта.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Итоговая оценка за работу определяется по табл. 1 в зависимости от набранного общего балла.

Таблица 1

Итоговая оценка за работу		
Общий балл за работу, $V_p$	Итоговая оценка за работу	
100 – 80	Отлично	Зачтено
79 – 60	Хорошо	
59 – 40	Удовлетворительно	
менее 40	Неудовлетворительно	Не зачтено

Общий балл за работу рассчитывается по следующей формуле:

$$V_p = 100 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

где  $V_p$  – общий балл за работу;

100 – максимальный балл за выполненную работу;

$K_{1i}$  – понижающий коэффициент, учитывающий правильность выполнения работы;

$K_{2i}$  – понижающий коэффициент, учитывающий качество оформления выполненной работы;

$K_{3i}$  – понижающий коэффициент, учитывающий своевременность сдачи выполненной работы.

Выполненные задания оцениваются по трем критериям:

1. Правильность выполнения заданий (см. табл. 2).
2. Качество оформления задания (см. табл. 3).
  - полнота описания последовательности выполнения задания;
3. Своевременность сдачи оформленных заданий (см. табл. 4).

Таблица 2

## Оценивание правильности выполнения заданий

№	Количество ошибок в работе	Понижающий коэффициент, $K_1$
1	без ошибок	1
2	от 1 до 2 ошибки	0,9
3	от 3 до 4 ошибки	0,7
3	от 5 до 6 ошибок	0,5
4	от 7 и более ошибок	0,2
5	работа не сдана	0

Таблица 3

## Оценивание качества оформления заданий

№	Количество замечаний в работе	Понижающий коэффициент, $K_2$
1	без замечаний	1
2	от 1 до 2 замечания	0,9
3	от 3 до 4 замечания	0,7
3	от 5 до 6 замечаний	0,5
4	от 7 и более замечаний	0,2
5	работа не сдана	0

Таблица 4

## Оценивание своевременности сдачи оформленных заданий

№	Срок сдачи заданий	Понижающий коэффициент, $K_3$
1	до рекомендуемой даты сдачи заданий	1
2	после рекомендуемой даты сдачи заданий	0,5
3	работа не сдана	0



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (УрФУ)  
Институт новых материалов и технологий  
Кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты»  
Департамент машиностроения

Оценка \_\_\_\_\_

Руководитель курсовой работы \_\_\_\_\_

Члены комиссии \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Дата защиты \_\_\_\_\_

### ОТЧЁТ по курсовой работе

Тема: Оптимизация режимов резания и размерное моделирование при механообработке детали “ \_\_\_\_\_ ” из прутковой заготовки

Студент: \_\_\_\_\_  
(ФИО)

\_\_\_\_\_ (Подпись)

Группа: \_\_\_\_\_

Екатеринбург  
20 \_\_\_\_\_

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

### Рецензия на курсовую работу

Студента \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Тема курсовой работы:

\_\_\_\_\_

Модуль/дисциплина Теория сборочных цепей и методы достижения точности сборки

5. Соответствие результатов выполнения работы целям и задачам Выполненная работа соответствует целям и задачам изучаемой дисциплины.
6. Оригинальность и самостоятельность выполнения работы Работа выполнялась в самостоятельном режиме с использованием существующих расчётных методик.
7. Полнота и глубина проработки разделов Разделы работы проработаны в полном объеме, в соответствии с целью изучаемой дисциплины.
8. Общая грамотность и качество оформления текстового документа и графических материалов Качество оформления текстового документа и иллюстраций на должном уровне.
9. Вопросы и замечания \_\_\_\_\_
10. Общая оценка работы \_\_\_\_\_

Сведения о руководителе:

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Место работы \_\_\_\_\_

Уч. звание \_\_\_\_\_ Уч. степень \_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина»  
Институт новых материалов и технологий  
Кафедра Технология машиностроения, станки и инструменты  
Департамент машиностроения

**Задание  
на курсовую работу**

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Специальность / направление подготовки Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств

1. Тема курсовой работы

« \_\_\_\_\_ ».

2. Содержание работы и состав графических работ и расчетов

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. Дополнительные сведения

\_\_\_\_\_

4. План выполнения курсовой работы

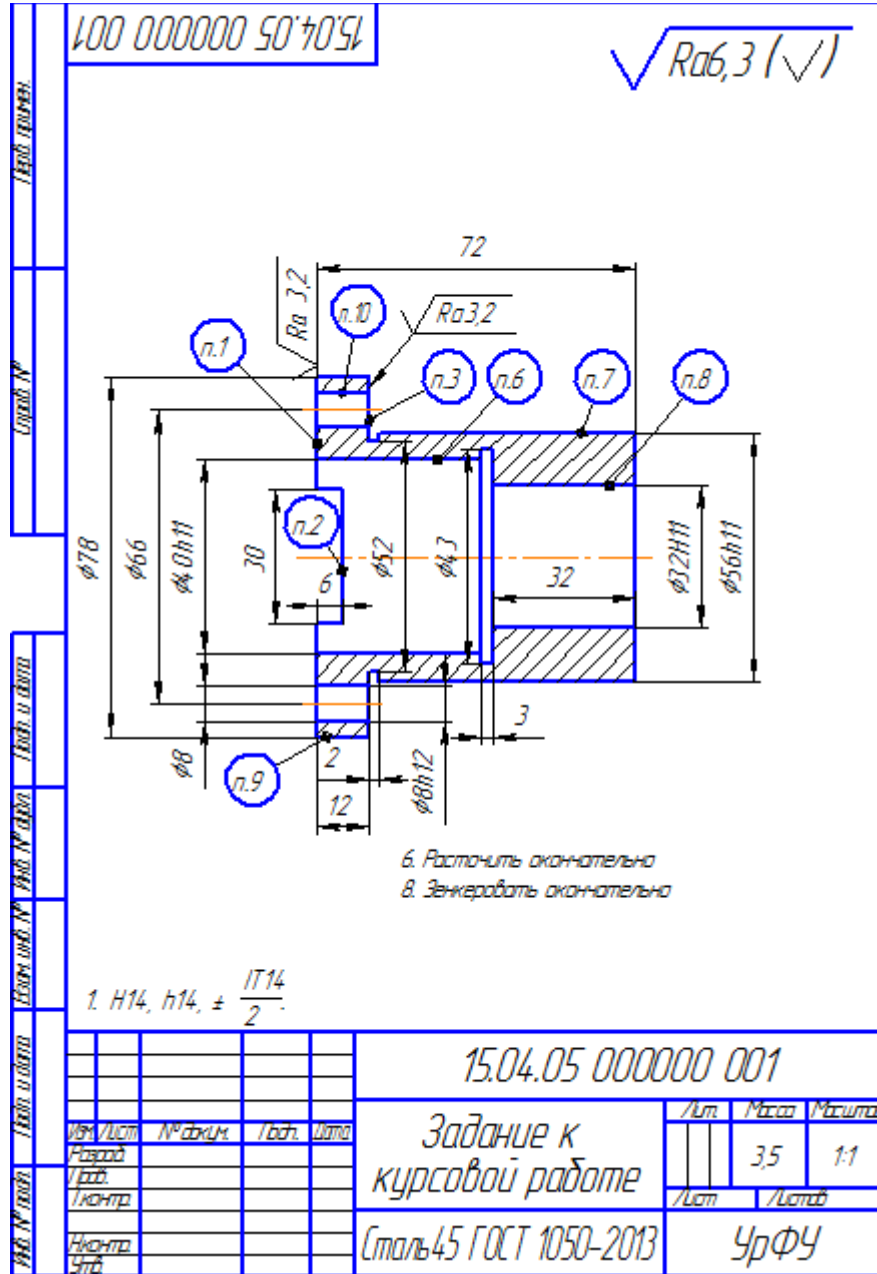
№	Наименование разделов работы	Сроки	Примечания	Отметка о выполнении
1				
2				
3				
4				

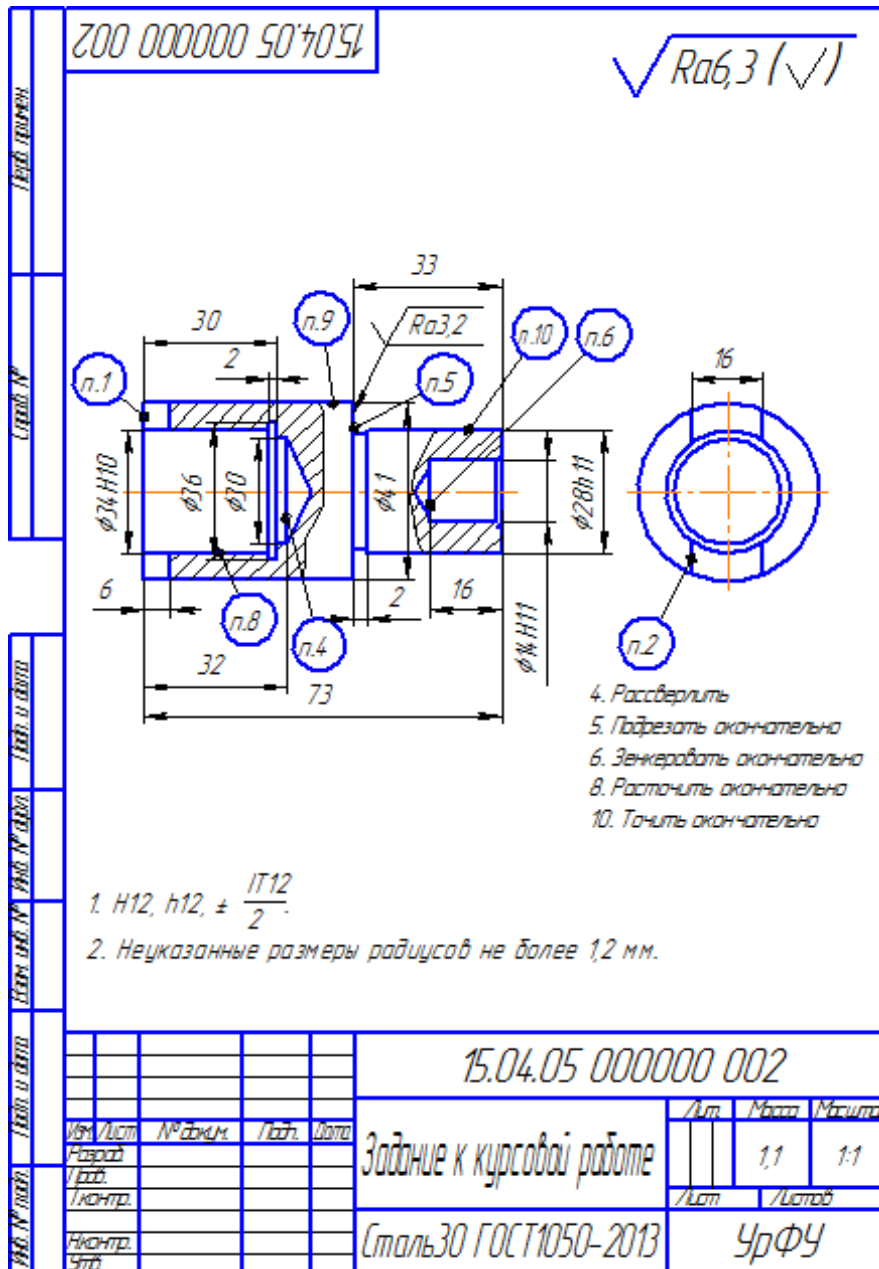
Руководитель \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /



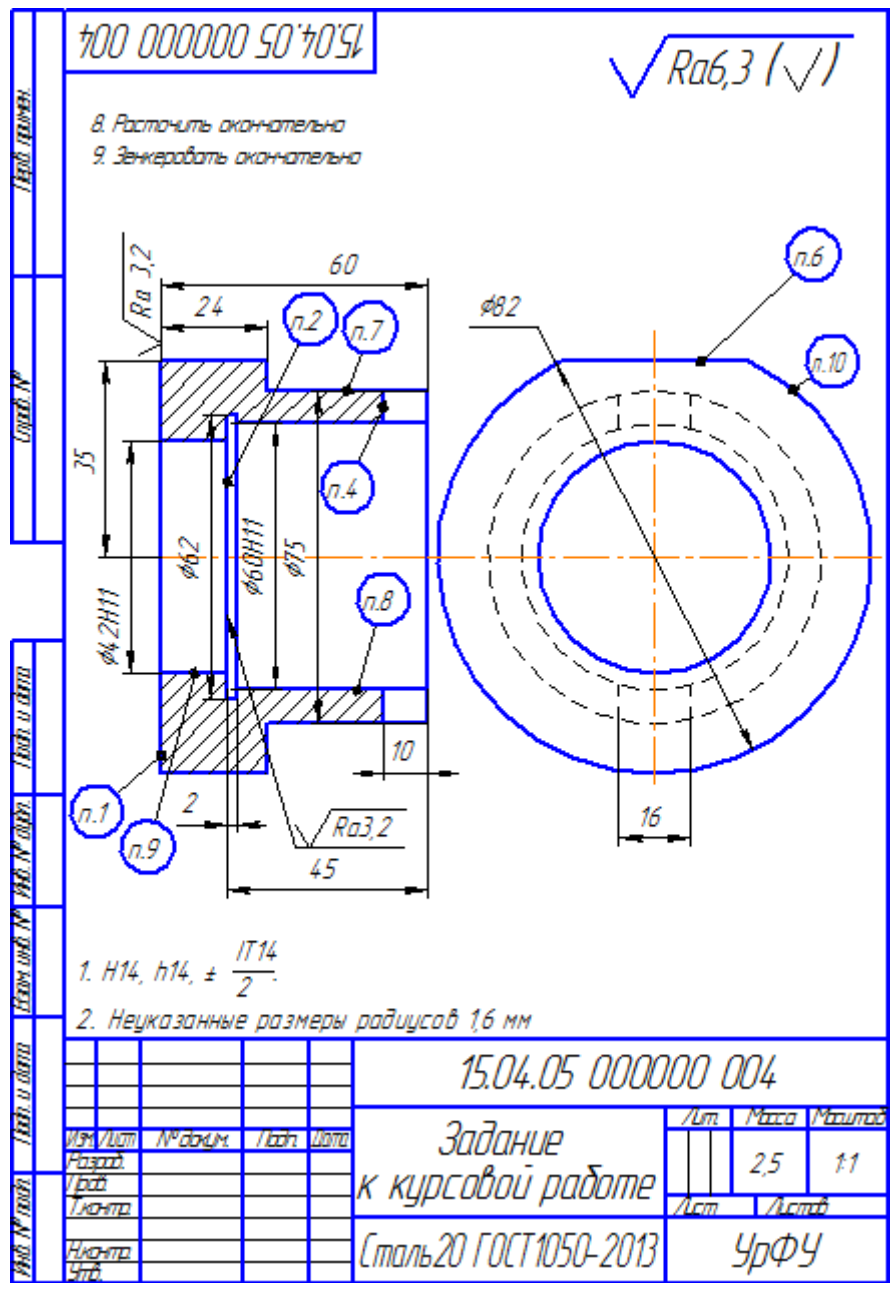
**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**

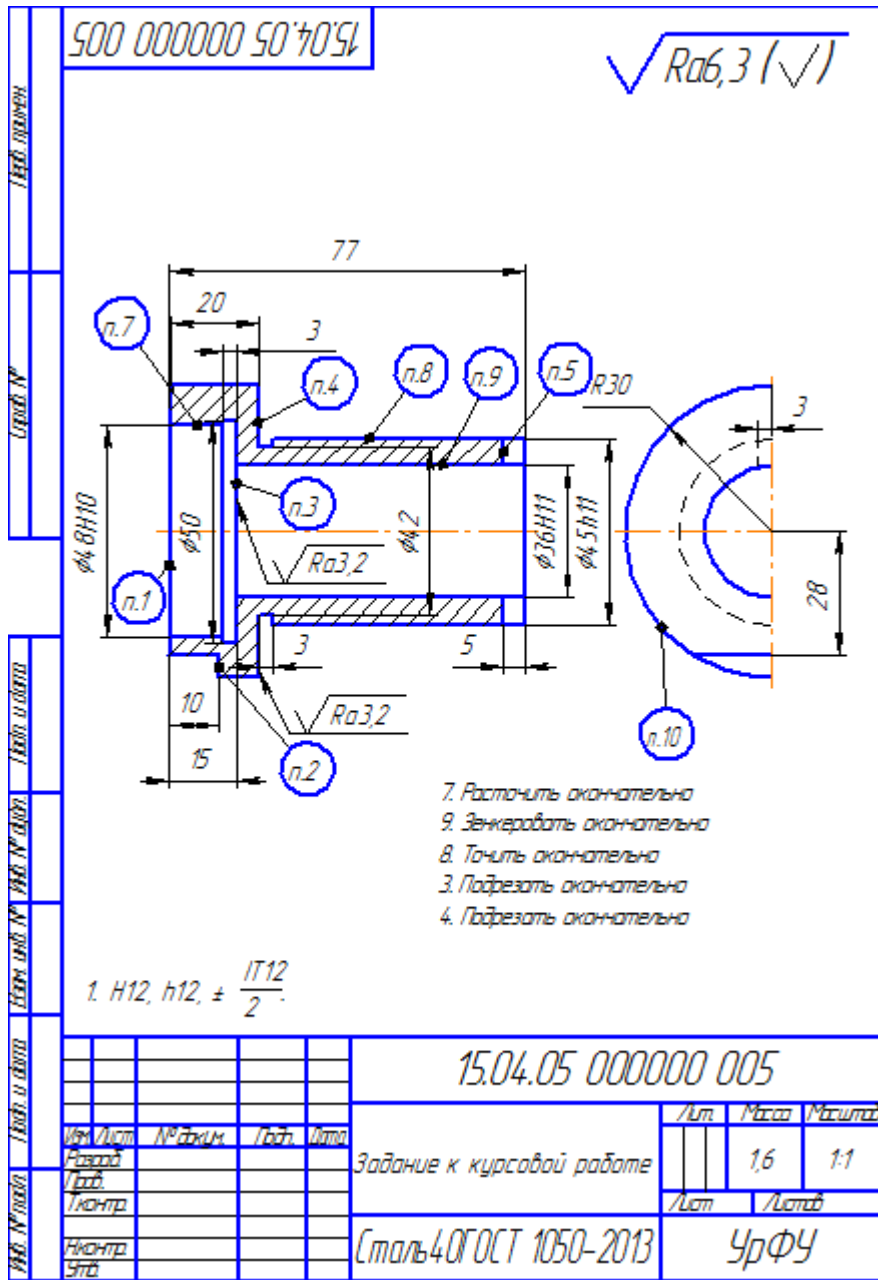
**ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

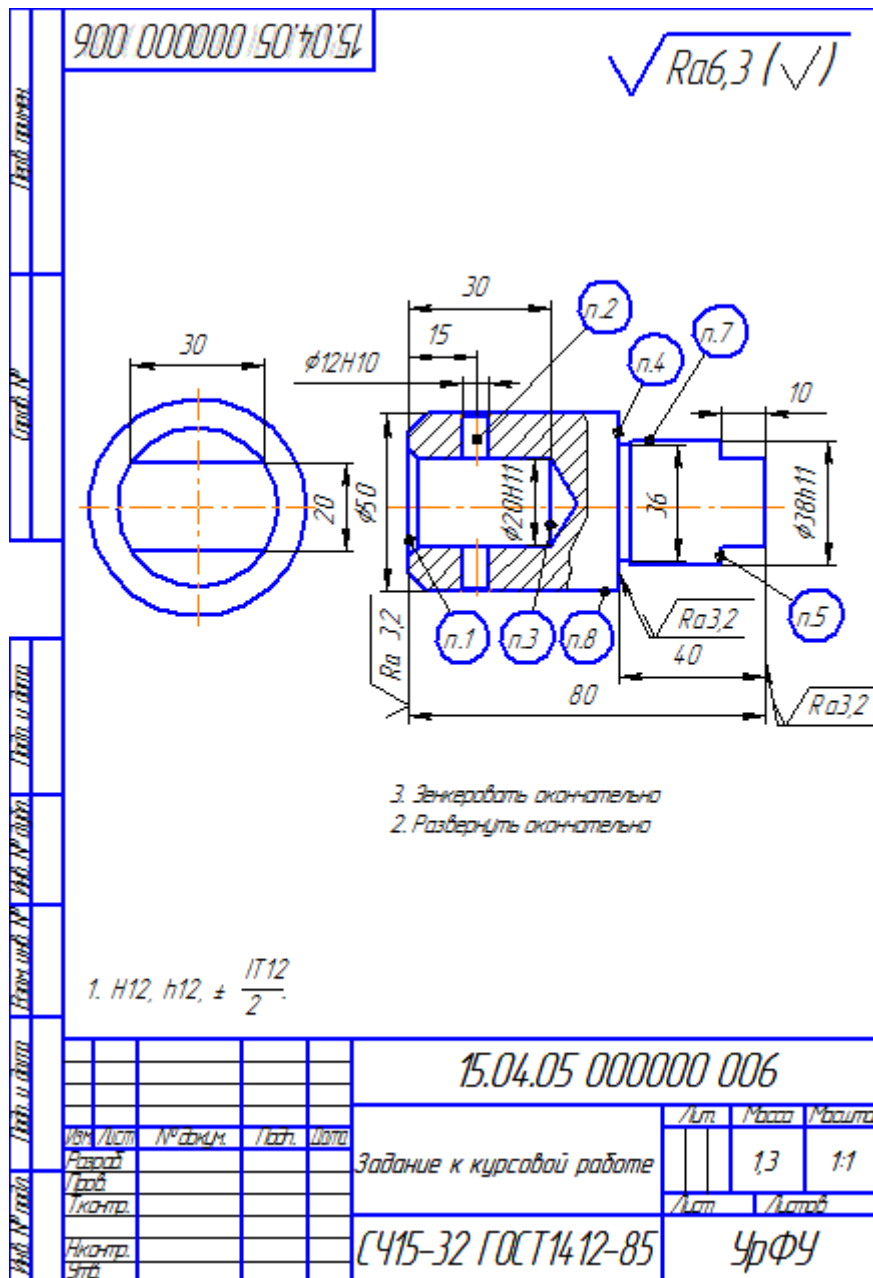


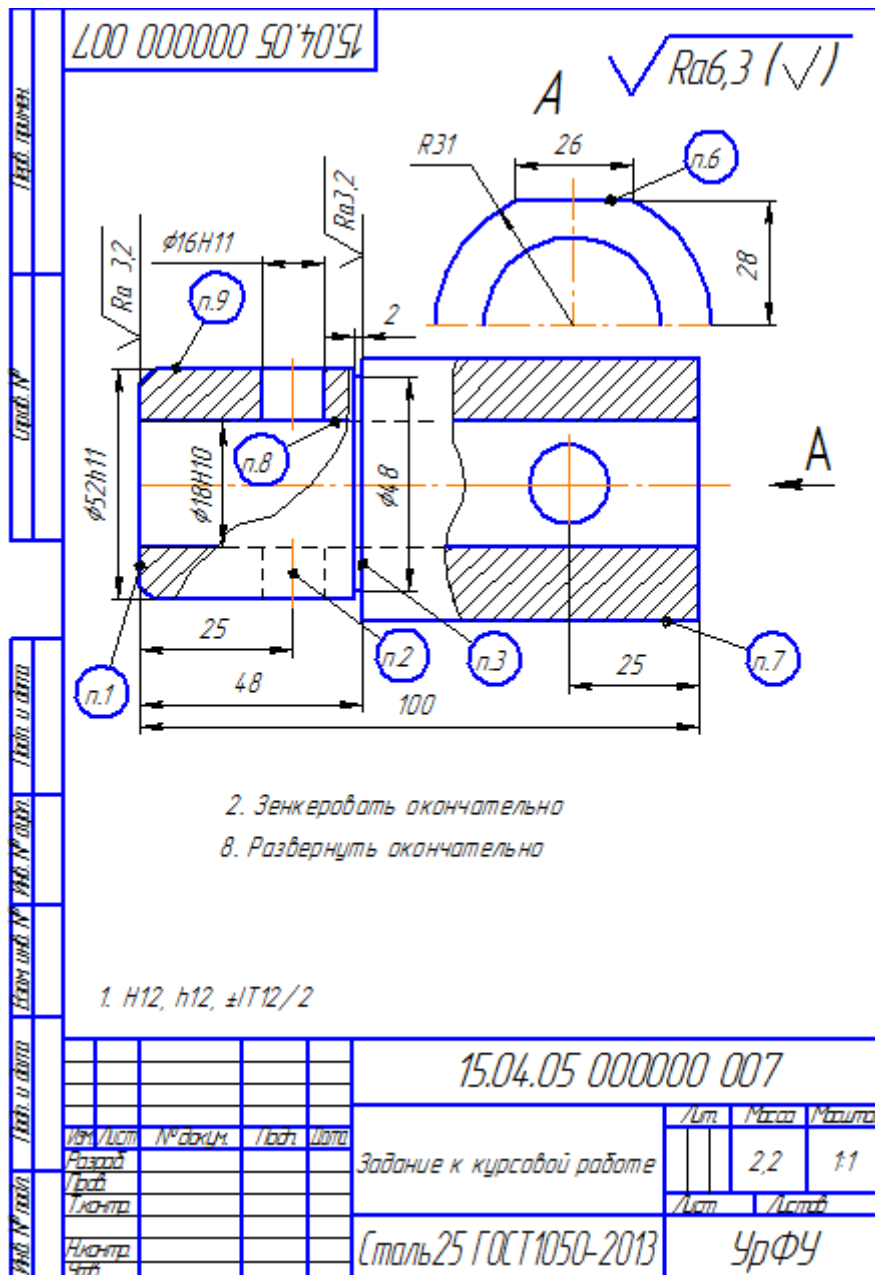


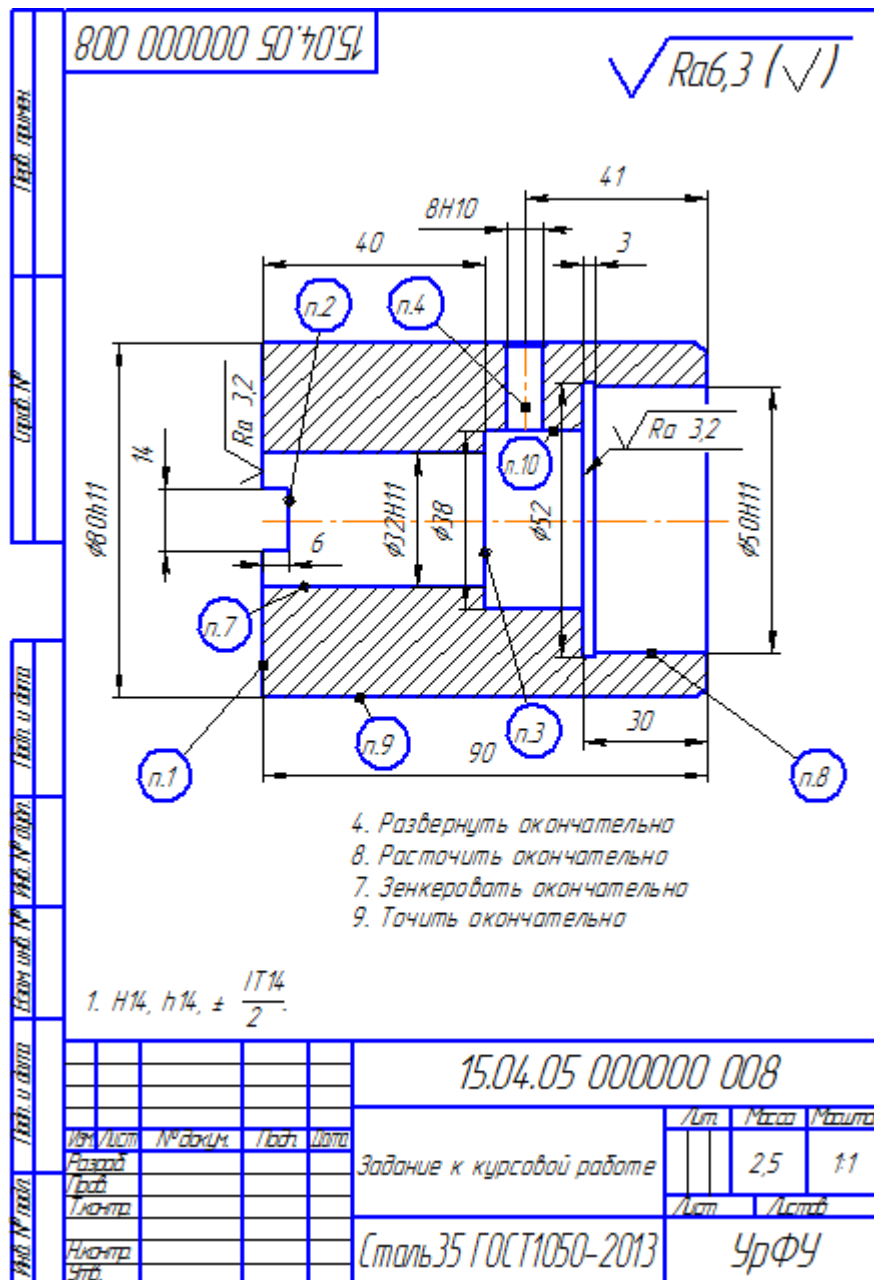


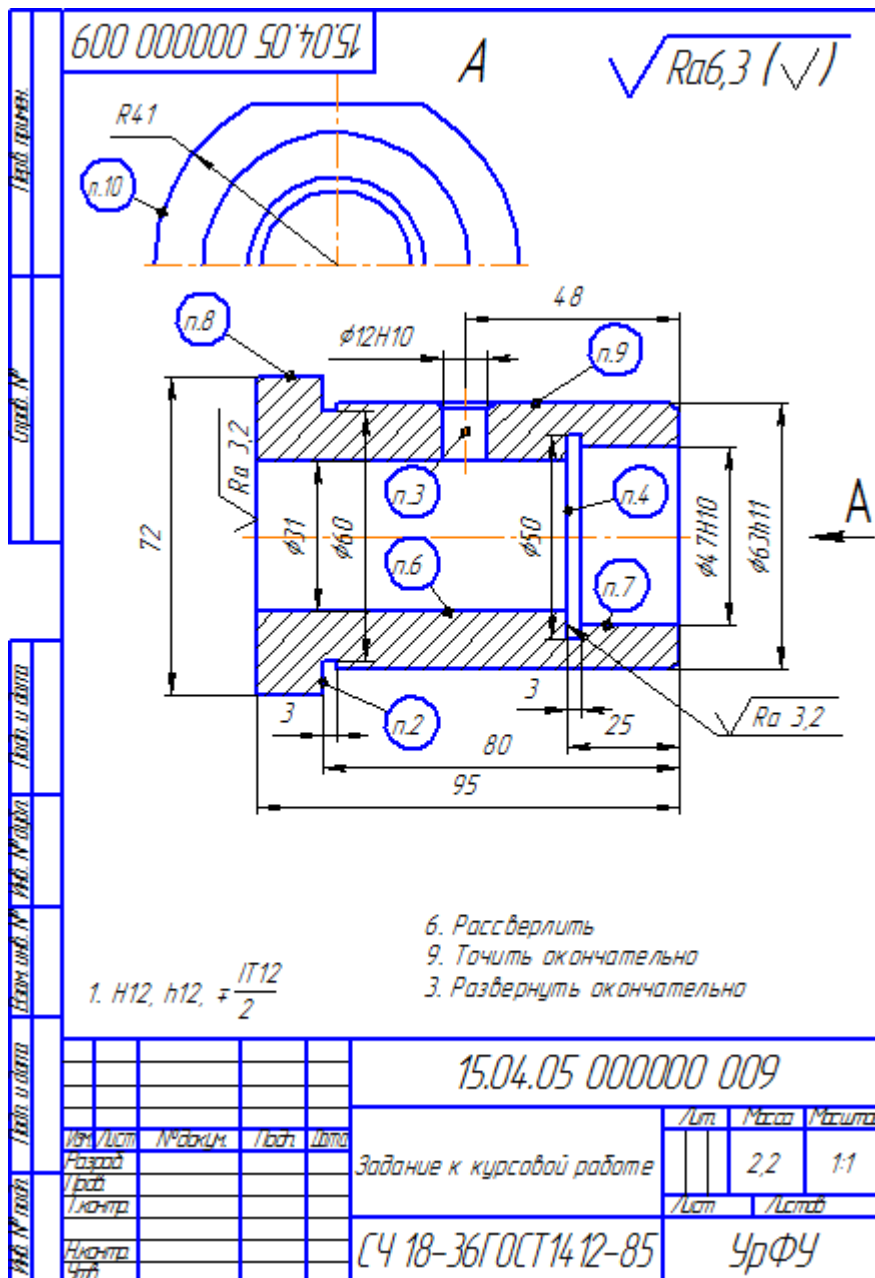


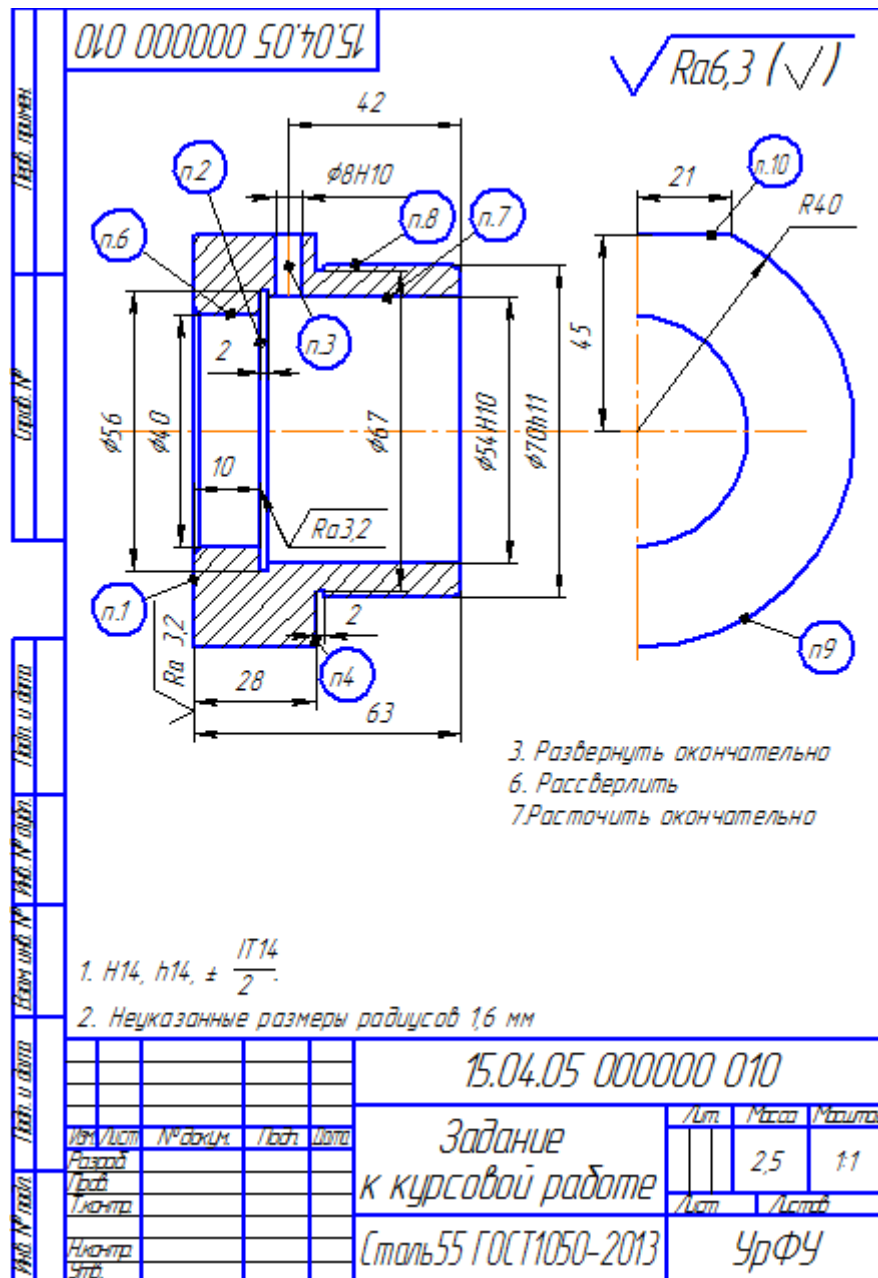


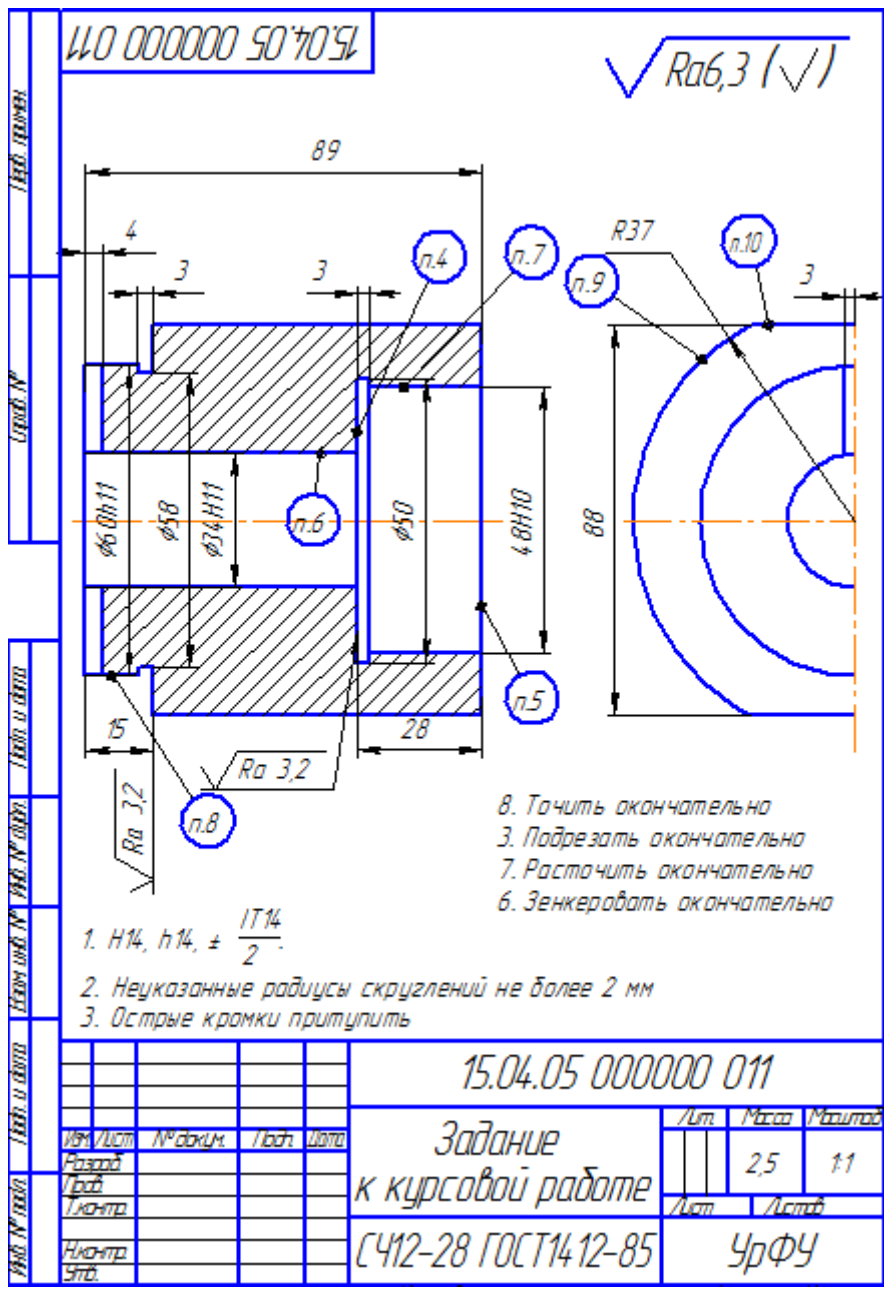














Электронный образовательный текстовый ресурс

Галкин Михаил Геннадьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И РАЗМЕРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ ПРУТКОВЫХ  
ЗАГОТОВОК**

Методические указания к выполнению курсовой работы

*Компьютерная верстка*

*М. Г. Галкин*

Рекомендовано Учебно-методическим советом УрФУ

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_

Электронный формат – pdf



<https://study.urfu.ru>

