

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*Д.Л. СКУРАТОВ, А.Н. ШВЕЦОВ*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве практикума для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2019

УДК 621.9(075)  
ББК 34.5я7  
С467

**Рецензенты:** д-р техн. наук, проф. Н. В. Н о с о в,  
канд. техн. наук, доц. Ю. С. Г о р ш к о в

*Скуратов, Дмитрий Леонидович*

С467 **Определение рациональных условий формообразования и упрочнения поверхностей деталей на операциях механической обработки:** практикум / *Д.Л. Скуратов, А.Н. Швецов.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 112 с.

**ISBN 978-5-7883-1406-8**

Представлены лабораторные работы по определению рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей, круглого наружного и внутреннего шлифования, концевое фрезерование, а также упрочнения поверхностей методом алмазного выглаживания.

Предназначен для студентов механических факультетов, обучающихся по направлению 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, изучающих дисциплины «Обработка конструкционных материалов», «Процессы и операции формообразования», «Моделирование процессов механической обработки» и «Резание, станки, инструменты».

Подготовлен на кафедре технологий производства двигателей.

УДК 621.9(075)  
ББК 34.5я7

ISBN 978-5-7883-1406-8

© Самарский университет, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>1. Лабораторная работа №1. Определение рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания заготовок .....</b>	<b>7</b>
1.1. Цель и задачи работы .....	7
1.2. Последовательность выполнения работы .....	7
1.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе .....	8
1.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании заготовок .....	8
1.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений .....	9
1.4.2. Построение математической модели .....	17
1.5. Программа для определения рациональных условий обработки .....	20
1.5.1. Описание программы .....	20
1.5.2. Пример расчета режима резания .....	20
1.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки .....	28
1.7. Содержание отчета .....	29
Контрольные вопросы.....	29
<b>2. Лабораторная работа №2. Определение рациональных условий обработки на операциях концевой фрезерования заготовок .....</b>	<b>30</b>
2.1 Цель и задачи работы .....	30
2.2. Последовательность выполнения работы .....	30
2.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе .....	31
2.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок .....	31
2.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений .....	32
2.4.2. Построение математической модели .....	39
2.5. Разработка программы для расчета оптимальных режимов обработки.....	42
2.5.1. Блок-схема основного модуля программы .....	42
2.5.2. Описание программы .....	42
2.5.3. Пример расчета режима резания .....	43
2.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки .....	47
2.7. Содержание отчета .....	47
Контрольные вопросы.....	48
<b>3. Лабораторная работа №3. Определение рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования заготовок .....</b>	<b>49</b>
3.1. Цель и задачи работы .....	49

3.2. Последовательность выполнения работы .....	50
3.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе .....	49
3.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи .....	51
3.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений .....	51
3.4.2. Построение математической модели .....	64
3.5. Программа для определения рациональных условий обработки ....	67
3.5.1. Описание программы .....	68
3.5.2. Пример расчета режима резания .....	69
3.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки .....	74
3.7. Содержание отчета .....	76
Контрольные вопросы .....	77
<b>4. Лабораторная работа №4. Определение рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания заготовок .....</b>	<b>78</b>
4.1. Цель и задачи работы .....	78
4.2. Последовательность выполнения работы .....	78
4.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе .....	79
4.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки на операции алмазного выглаживания заготовок .....	79
4.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений .....	80
4.4.2. Построение математической модели .....	86
4.5. Программа для определения рациональных условий обработки..	89
4.5.1. Описание программы .....	90
4.5.2. Пример расчета режима резания .....	90
4.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки .....	94
4.7. Содержание отчета .....	95
Контрольные вопросы .....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	96
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	97
Приложение 1. Отчет по лабораторной работе №1 .....	99
Приложение 2. Отчет по лабораторной работе №2 .....	102
Приложение 3. Отчет по лабораторной работе №3 .....	105
Приложение 4. Отчет по лабораторной работе №4 .....	108

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные инновационные технологические процессы изготовления деталей машин и в первую очередь деталей, входящих в состав сборочных единиц изделий аэрокосмической техники, базируются не только на использовании многоосевого станочного оборудования с ЧПУ и прогрессивного режущего инструмента, но и на определении рациональных условий формообразования, позволяющих обеспечить требуемое качество обработки при максимально возможной производительности.

Одними из наиболее широко используемых в производстве методов обработки являются процессы точения, фрезерования и шлифования, позволяющие выполнять формообразование цилиндрических, конических, фасонных и плоских поверхностей деталей. В то же время среди упрочняющих методов обработки достаточно широкое распространение получил метод алмазного выглаживания, благодаря его простоте, дешевизне и высокой эффективности. Применительно к данным процессам в настоящем практикуме представлены лабораторные работы, ориентированные на определение рациональных условий формообразования и упрочнения поверхностей деталей.

Определение рациональных условий обработки, включающих режим резания, конструкцию инструмента и его геометрию, марку инструментального материала, смазывающе-охлаждающее технологическое средство и т.д., базируется на линейных математических моделях, разработанных для процессов точения и растачивания, концевое фрезерования, круглого наружного и внутреннего шли-

фования, а также алмазного выплаживания. Математические модели реализованы в программах расчета, что существенно упрощает процедуру назначения режимов резания и упрочнения поверхностей заготовок.

Каждая лабораторная работа проиллюстрирована примерами, позволяющими для конкретных условий резания или упрочнения соответственно определить наивыгоднейшие условия обработки.

# **1. Лабораторная работа №1**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ ТОЧЕНИЯ И РАСТАЧИВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

### **1.1. Цель и задачи работы**

**Цель работы** – закрепление теоретических знаний в области определения рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания заготовок, а также получение практических навыков расчета режимов резания.

#### **Задачи:**

- ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании заготовок;
- ознакомиться с методикой и программой расчета режимов резания;
- приобрести практические навыки определения наиболее выгодных режимов резания при точении и растачивании заготовок.

### **1.2. Последовательность выполнения работы**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторной работы.
2. Изучить методические указания по выполнению данной лабораторной работы.
3. Ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании цилиндрических и конических поверхностей заготовок.
4. Ознакомиться с методикой и программой расчета режимов резания.

5. Определить наивыгоднейшие условия обработки для указанных поверхностей заготовки.

6. Провести обработку заготовки и оценить заданные параметры качества.

7. Оформить отчет по работе.

### **1.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе**

#### **Программное обеспечение:**

– авторская программа для определения рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания заготовок.

#### **Металлорежущее оборудование:**

– универсальные токарно-винторезные станки и токарные обрабатывающие центры с ЧПУ.

#### **Режущие инструменты:**

– проходные токарные резцы;

– расточные токарные резцы.

#### **Средства измерений:**

– штангенциркуль, гладкие микрометры и индикаторный нутромер для измерения диаметров заготовки и линейных размеров;

– тахометр для определения числа оборотов заготовки;

– автоматизированный профилометр-профилограф модели БВ-7669, для контроля шероховатости обработанных поверхностей.

### **1.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании заготовок**

Для решения задачи научно обоснованного определения рациональных условий обработки цилиндрических и конических поверхностей заготовок на операциях чистового точения и растачивания при изготовлении различных деталей и в частности деталей авиационной техники, необходимо выбрать целевую функцию, технические ограничения и на их базе разработать математическую модель, позволяющую получить рациональные режимы резания при различных вариантах управляемых параметров.



В данной лабораторной работе представлена линейная математическая модель, позволяющая осуществить оптимизацию в детерминированной постановке, при которой действие возмущающих параметров во внимание не принимается. Задача по определению рациональных условий обработки в этом случае сводится к задаче линейного программирования.

#### ***1.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений***

Чаще всего при определении рациональных условий обработки на ранее указанных операциях, то есть марки инструментального материала, геометрии инструмента, режима резания, СОТС и т.д., в качестве целевой функции принимается себестоимость одной операции. При этом переменная доля себестоимости операции при резании одним инструментом определяется по формуле

$$C = t_0 E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где  $t_0$  – основное технологическое (машинное) время, мин;  $E$  – себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.;  $t_c$  – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, установку переточенного и подналадку станка, мин;  $\mathcal{E}_u$  – затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за период его стойкости, руб.;  $Q$  – количество деталей, обработанных за период стойкости, шт.

При правильном построении производственного процесса определение рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания должно основываться на экономическом периоде стойкости инструмента. При использовании в расчетах экономических периодов стойкости режимы резания, обеспечивающие наименьшее время резания, будут одновременно и наиболее экономичными [6]. Поэтому в качестве целевой функции при продольном точении и растачивании заготовок целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из ранее изложенного, уравнение целевой функции будет иметь вид:

$$f_m = \frac{l_m A}{n S t}, \quad (1.1)$$

где  $A$  – припуск на обработку (на сторону), мм;  $l_m$  – длина пути резца в направлении подачи, мм;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $n$  – число оборотов заготовки, об/мин.

Большинство деталей аэрокосмической техники работают при высоких давлениях, температурах и знакопеременных нагрузках, поэтому к качеству обработки этих деталей предъявляются повышенные требования. В связи с ранее изложенным, на операции чистового точения и растачивания должны накладываться определенные технические ограничения.

### ***Ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента***

Скорость резания при продольном точении и растачивании определяется из условия полного использования режущих свойств инструмента на основании неравенства:

$$v \leq v_m, \quad (1.2)$$

где  $v$  – скорость резания, м/мин;  $v_m$  – максимально допустимая скорость резания при заданной стойкости резца, м/мин.

Подставив значения  $v$  и  $v_m$ , определяемые по формулам

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad v_m = \frac{C'_v k_v}{T^m t^{x_v} S^{y_v}},$$

в неравенство (1.2) и решая его относительно  $nSt$ , получим первое техническое ограничение:

$$n (100S)^{y_v} (100t)^{x_v} \leq \frac{318 C'_v k_v 100^{(x_v + y_v)}}{T^m D}, \quad (1.3)$$

где  $n$  – число оборотов заготовки, об/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $C'_v$  – коэффициент, характеризующий условия обработки, для которых разрабатывались нормативные материалы;  $k_v$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение реальных условий обработки от тех, при которых определялся коэффициент  $C'_v$ ;  $T$  – заданная стойкость резца, мин;  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм;  $m, x_v, y_v$  – показатели степени, характеризующие влияние  $T, t, S$  на скорость резания.

В неравенстве (1.3) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо  $S \rightarrow 100S$ , а вместо  $t \rightarrow 100t$ , с соответствующими поправками в правой части.

**Ограничение, связанное с мощностью станка**

При токарной обработке необходимо, чтобы эффективная мощность  $N_{эф}$  не превышала мощности, подводимой к шпинделю станка, то есть выполнялось условие

$$N_{эф} \leq N_{ин}, \tag{1.4}$$

где  $N_{эф}$  – эффективная мощность, кВт;  $N_{ин}$  – мощность, подводимая к шпинделю станка, кВт.

Подставив в неравенство (1.4)  $N_{эф} = \frac{P_z v}{60 \cdot 1000}$ ,  $N_{ин} = N_{эд} \eta$  и,

учитывая, что  $P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}}$  и  $v = \frac{\pi D n}{1000}$ , получим после соот-

ветствующего преобразования и решения относительно  $n, S, t$  второе техническое ограничение в виде

$$n^{(1+z_{P_z})} (100S)^{y_{P_z}} (100t)^{x_{P_z}} \leq \frac{N_{эд} \eta \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 318^{(1+z_{P_z})} 100^{(x_{P_z} + y_{P_z})}}{C_{P_z} D^{(1+z_{P_z})}}, \tag{1.5}$$

где  $N_{эд}$  – мощность электродвигателя механизма главного движения станка, кВт;  $\eta$  – КПД кинематической цепи механизма главного движения;  $C_{P_z}$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на составляющую силы резания  $P_z$ ;  $x_{P_z}, y_{P_z}, z_{P_z}$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $t, S$  и  $v$  на величину силы  $P_z$ .

**Ограничение, связанное с точностью обработки**

Для обработки заданной поверхности заготовки с погрешностью, не превышающей допуск на диаметральный размер обрабатываемой поверхности, необходимо выполнить следующее условие [9]:

$$P_y \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_p} \right) \leq k_3 \frac{\delta}{2}, \quad (1.6)$$

где  $P_y = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}}$  – радиальная составляющая силы резания,

$H$ ;  $\frac{1}{j_{заг}}$ ,  $\frac{1}{j_{см}}$ ,  $\frac{1}{j_p}$  – податливость соответственно заготовки, станка

и резца, мм/Н;  $k_3$  – коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией заготовки, составляющих станка и резца,  $k_3 = 0,7 \dots 0,8$ ;  $\delta$  – допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм.

Подставив в эмпирическую зависимость для определения силы  $P_y$  формулу для расчета скорости резания  $v = \frac{\pi D n}{1000}$ , а затем вновь полученную зависимость в неравенство (1.6) и решив это уравнение относительно  $n, S, t$ , третье техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n^{z_{P_y}} (100S)^{y_{P_y}} (100t)^{x_{P_y}} \leq \frac{318^{z_{P_y}} 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} k_3 \delta}{2C_{P_y} D^{z_{P_y}} \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_p} \right)}, \quad (1.7)$$

где  $C_{P_y}$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на составляющую силы резания  $P_y$ ;  $x_{P_y}, y_{P_y}, z_{P_y}$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $t, S$  и  $v$  на величину силы  $P_y$ .

Для расчета податливости заготовки, станка и резца могут быть использованы следующие зависимости [9]:

– для определения податливости заготовки

$$\frac{1}{j_{заг}} = \frac{L^3}{k_1 J E},$$

где  $L$  – свободная длина заготовки, мм;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий влияние способа закрепления заготовки (при закреплении в патроне  $k_1 = 3$ , в центрах – 70, в патроне с поджатием центром задней бабки – 100);  $J$  – момент инерции наиболее опасного сечения заготовки, выбранного с учетом способа закрепления, мм<sup>4</sup>; для сплошного сечения –  $J = 0,05D^4$ , для кольцевого сечения –  $J = 0,05(D^4 - d^4)$ ;  $E$  – модуль продольной упругости материала обрабатываемой заготовки, МПа;

– для определения податливости станка

$$\frac{1}{j_{cm}} = 0,000025k_2\sqrt[3]{\frac{200}{H_u}},$$

при закреплении заготовки в центрах и в патроне с поджатием центром задней бабки станка  $k_2 = -1,0$ , где знак «–» учитывает конкурирующее влияние смещений на погрешность обработки, при закреплении заготовки в патроне  $k_2 = 0,03L$ , где  $L$  – вылет заготовки из патрона, мм;  $H_u$  – высота центров станка, мм;

– для определения податливости резца

$$\frac{1}{j_p} = \frac{l^3}{3J_p E_p},$$

где  $l$  – вылет резца из резцедержателя, если державка резца имеет круглое сечение по всей длине, или расстояние от вершины резца до перехода круглого сечения в призматическое;  $E_p$  – модуль продольной упругости материала державки резца, МПа;  $J_p$  – момент инерции поперечного сечения державки резца, мм<sup>4</sup>; для прямоугольного сечения  $J_p = \frac{HB^3}{12}$ , для круглого  $J_p = 0,05 \cdot d_p^3$  (если круглое сечение переходит в прямоугольное, то расчет производится по наибольшему диаметру круглого сечения).

При обточке наружных поверхностей заготовок проходной резец обладает очень высокой жесткостью в направлении действия радиальной составляющей силы резания по сравнению с другими компонентами технологической системы. Поэтому его податливость  $\frac{1}{j_p} = 0$ .

При расточке внутренних поверхностей заготовок жесткость резца, как правило, оказывается существенно ниже других компонентов технологической системы и поэтому определяет величину допустимой подачи, то есть в этом случае можно считать  $\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} = 0$ .

### ***Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности***

Обработка заданной поверхности заготовки с допускаемой шероховатостью может быть осуществлена при условии:

$$(100S)(100t)^x \leq \frac{C_s Rz^y r^n \gamma^{0,3} \alpha^{0,25} \cdot 100^{(x+1)}}{(\varphi\varphi_1)^z h_3^{0,2}} k_s, \quad (1.8)$$

где  $C_s, n, x, y, z$  – коэффициент и показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала;  $Rz$  – высота неровностей по десяти точкам, мкм;  $r$  – радиус закругления вершины резца, мм;  $\gamma$  – главный передний угол, градус;  $\alpha$  – главный задний угол, градус;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане, градус;  $h_3$  – износ по задней поверхности резца, мм;  $k_s$  – коэффициент, учитывающий группу обрабатываемого материала.

Неравенство (1.8) является четвертым техническим ограничением.

### ***Ограничение, связанное с температурой обработки***

При точении и растачивании заготовок температура в зоне резания, а также время нагрева и охлаждения могут быть достаточными для того, чтобы в поверхностном слое произошли структурно-фазовые превращения. Поэтому необходимо, чтобы температура в зоне резания не превышала критических значений, то есть должно выполняться условие

$$\theta \leq \theta_{кр}, \quad (1.9)$$

где  $\theta$  – температура в зоне резания, °C;  $\theta_{кр}$  – критическая температура в зоне резания, °C.

Температура в зоне резания при точении и растачивании заготовок может быть определена по эмпирической зависимости

$$\theta = C_{\theta} t^{x_{\theta}} S^{y_{\theta}} v^{z_{\theta}},$$

где  $C_{\theta}$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне резания;  $x_{\theta}, y_{\theta}, z_{\theta}$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $t, S$  и  $v$  на величину температуры резания.

Подставив вышеприведенную эмпирическую зависимость и формулу для расчета скорости резания в неравенство (1.9) и решив его относительно  $n, S, t$ , получим пятое техническое ограничение:

$$n^{-z_{\theta}} (100S)^{y_{\theta}} (100t)^{x_{\theta}} \leq \frac{\theta_{кр} \cdot 318^{z_{\theta}} \cdot 100^{(x_{\theta} + y_{\theta})}}{C_{\theta} D^{z_{\theta}}}. \quad (1.10)$$

***Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, используемого для точения или растачивания заготовки***

При обработке заготовки частота ее вращения и продольная подача, сообщаемая резцу, должны быть ограничены соответственно наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя и наибольшей и наименьшей подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

– шестое техническое ограничение:

$$n \geq n_{cm \min}, \quad (1.11)$$

где  $n_{cm \min}$  – минимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– седьмое техническое ограничение:

$$n \leq n_{cm \max}, \quad (1.12)$$

где  $n_{cm \max}$  – максимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– восьмое техническое ограничение:

$$100S \geq 100S_{cm \min}, \quad (1.13)$$

где  $S_{cm \min}$  – минимальная продольная подача станка, мм/об;

– девятое техническое ограничение:

$$100S \leq 100S_{cm \max}, \quad (1.14)$$

где  $S_{cm \max}$  – максимальная продольная подача станка, мм/об.

### ***Ограничения, связанные с глубиной резания***

Для обеспечения заданного качества точности детали глубина резания  $t$  не может быть меньше некоторой определенной для каждого инструмента и обрабатываемого материала величины  $t_{\min}$ . С другой стороны, глубина резания не может быть больше припуска на обработку. Тогда технические ограничения, обусловленные глубиной резания, будут иметь вид:

– десятое техническое ограничение:

$$100t \geq 100t_{\min}; \quad (1.15)$$

– одиннадцатое техническое ограничение:

$$100t \leq 100A, \quad (1.16)$$

где  $A$  – припуск на обработку (на сторону), мм.

### ***Ограничение, связанное с мощностью механизма подач***

Для нормального протекания процесса обработки необходимо, чтобы затраты мощности механизма подач станка не превышали максимальной мощности его привода, т.е.

$$P_x \cdot v_x \leq N_{n \max}, \quad (1.17)$$

где  $P_x$  – осевая составляющая силы резания, Н;  $v_x$  – скорость подачи, м/с;  $N_{n \max}$  – максимальная мощность механизма подач станка, Вт.

Учитывая, что  $P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} v^{z_{P_x}}$ ,  $v = \frac{\pi D n}{1000}$ , а  $v_x = \frac{S n}{60 \cdot 1000}$ , двенадцатое ограничение после соответствующих преобразований получим в следующем виде

$$(100t)^{x_{P_x}} (100S)^{(1+y_{P_x})} n^{(1+z_{P_x})} \leq \frac{60000 \cdot 1000^{x_{P_x}} \cdot N_{n \max} \cdot 100^{(x_{P_x} + 1 + y_{P_x})}}{C_{P_x} (\pi D)^{z_{P_x}}}. \quad (1.18)$$



### 1.4.2. Построение математической модели

Преобразуем полученные ранее неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима резания, а также целевую функцию, в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений при заданных определяющих и управляемых параметрах позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки для операций чистового точения и растачивания заготовок и гарантированно обеспечить при этом заданное значение конструктивных параметров.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы продольного точения и растачивания заготовок, прологарифмируем зависимости (1.3), (1.5), (1.7), (1.8), (1.10) – (1.16), (1.18) и (1.1), которые после введения обозначений будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_1 + y_v x_2 + & x_v x_3 \leq b_1; \\ (1 + z_{P_2}) x_1 + y_{P_2} x_2 + & x_{P_2} x_3 \leq b_2; \\ z_{P_y} x_1 + y_{P_y} x_2 + & x_{P_y} x_3 \leq b_3; \\ & x_2 + & x x_3 \leq b_4; \\ z_{\theta} x_1 + y_{\theta} x_2 + & x_{\theta} x_3 \leq b_5; \\ & x_1 & \geq b_6; \\ & x_1 & \leq b_7; \\ & x_2 & \geq b_8; \\ & x_2 & \leq b_9; \\ & & x_3 \geq b_{10}; \\ & & x_3 \leq b_{11}; \\ x_1 + (1 + y_{P_x}) x_2 + (1 + z_{P_x}) x_3 & \leq b_{12}. \end{array} \right. \quad (1.19)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3,$$

где  $x_1 = \ln n$ ;  $x_2 = \ln(100S)$ ,  $x_3 = \ln(100t)$ ;

$$b_1 = \ln \frac{318 C'_v k_v \cdot 100^{(x_v + y_v)}}{T^m D};$$

$$b_2 = \ln \frac{N \eta \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 318^{(1 + z_{P_z})} \cdot 100^{(x_{P_z} + y_{P_z})}}{C_{P_z} D^{(1 + z_{P_z})}};$$

$$b_3 = \ln \frac{318^{z_{P_y}} \cdot 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} k_3 \delta}{2 C_{P_y} D^{z_{P_y}} \left( \frac{1}{J_\delta} + \frac{1}{J_{cm}} + \frac{1}{J_p} \right)};$$

$$b_4 = \ln \frac{C_s R_z^y r^n \gamma^{0,3} \alpha^{0,25} \cdot 100^{(x+1)}}{(\varphi \varphi_1)^z h_3^{0,2}} k_s; \quad b_5 = \ln \frac{\theta_{kp} \cdot 318^{z_\theta} \cdot 100^{(x_\theta + y_\theta)}}{C_\theta D^{z_\theta}};$$

$$b_6 = \ln n_{cm \min}; \quad b_7 = \ln n_{cm \max}; \quad b_8 = \ln(100 S_{cm \min});$$

$$b_9 = \ln(100 S_{cm \max}); \quad b_{10} = \ln(100 t_{\min}); \quad b_{11} = \ln(100 A);$$

$$b_{12} = \ln \frac{60000 \cdot 1000^{z_{P_x}} \cdot N_{n \max} \cdot 100^{(x_{P_x} + 1 + y_{P_x})}}{C_{P_x} \cdot (\pi \cdot D)^{z_{P_x}}}$$

$$f_0 = \ln f_m; \quad c_0 = \ln(10000 l_m A).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (1.19) и линейная функция  $f_0$  представляют собой математическую модель для определения рациональных режимов резания при продольном точении и растачивании заготовок одним резцом.

Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (1.19) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим  $x_1$  из ограничения-неравенства, связанного с режущими свойствами инструмента, которые в значительной мере определяются его стойкостью

$$x_1 = b_1 - y_v x_2 - x_v x_3$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (1.19). При токарной обработке ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента является одним из основных ограничений. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных  $x_2$  и  $x_3$ :

$$\left\{ \begin{array}{ll} (y_{P_z} - y_v - z_{P_z} y_v)x_2 + (x_{P_z} - x_v - z_{P_z} x_v)x_3 \leq b_2 - (1 + z_{P_z})b_1; \\ (y_{P_y} - z_{P_y} y_v)x_2 + (x_{P_y} - z_{P_y} x_v)x_3 \leq b_3 - z_{P_y} b_1; \\ x_2 + x_3 \leq b_4; \\ (y_\theta - z_\theta y_v)x_2 + (x_\theta - z_\theta x_v)x_3 \leq b_5 - z_\theta b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \geq b_6 - b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \leq b_7 - b_1; \\ x_2 \geq b_8; \\ x_2 \leq b_9; \\ x_3 \geq b_{10}; \\ x_3 \leq b_{11}; \\ (1 + y_{P_x} - y_v)x_2 + (1 + z_{P_x} - x_v)x_3 \leq b_{12} - b_1. \end{array} \right. \quad (1.20)$$

$$f_0 = c_0 - b_1 - [(1 - y_v)x_2 + (1 - x_v)x_3].$$

Так как в условиях конкретной задачи  $c_0 - b_1$  является величиной постоянной, то целевая функция  $f_0$  достигнет минимального значения в том случае, когда достигнет максимального значения величина, заключенная в квадратные скобки, то есть неизвестные  $x_2$  и  $x_3$  примут максимально допустимые значения, удовлетворяющие системе ограничений (1.20).

На основании полученной математической модели созданы алгоритм и программа расчета для определения рациональных условий резания при точении и растачивании заготовок.

## **1.5. Программа для определения рациональных условий обработки**

На основе математической модели разработана программа для определения рациональных режимов обработки при точении и растачивании заготовок. В качестве средства разработки выбрана среда программирования Delphi в сочетании с СУБД Firebird. Данное решение позволяет снизить стоимость эксплуатации программы, так как Firebird является системой управления базами данных с открытым кодом, что разрешает её бесплатное неограниченное использование. Применение этой системы обусловлено необходимостью хранения значительного количества упорядоченных данных, таких как характеристики материалов, станков, параметров режущего инструмента и т.д.

Программа написана для операционной системы Microsoft Windows, как наиболее распространенной в данный момент системы.

Система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс, решается на ЭВМ симплекс-методом, т.е. совместно решаются все возможные пары линейных неравенств. Каждое ограничение описывает линию на плоскости. Совместное решение системы из двух таких уравнений дает точку пересечения этих двух линий. Таким образом, получают точки всех вершин области оптимальных решений. Далее из этого множества точек, удовлетворяющих всем ограничениям, выбирается точка, соответствующая минимуму целевой функции.

### ***1.5.1. Описание программы***

В программе можно выделить три основных блока: ввод исходных данных для расчета, просмотр результатов расчета и его графической интерпретации, средства редактирования базы данных.

Исходные параметры разделены на три логические группы:

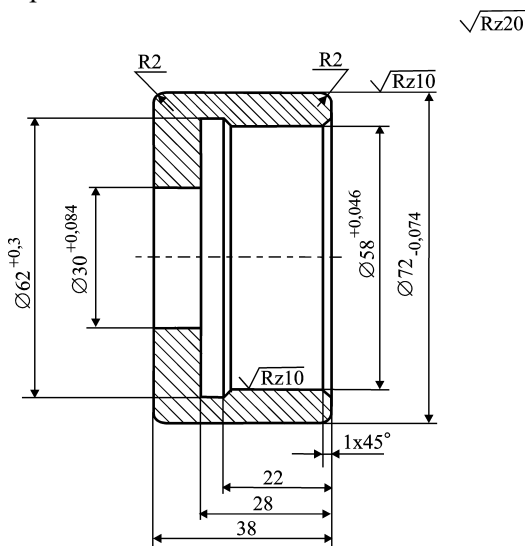
– параметры, относящиеся к станку, на котором производится обработка;

- параметры, относящиеся к обрабатываемой заготовке;
- параметры, относящиеся к резцу, при помощи которого ведётся обработка.

Ввод исходных данных существенно упрощён за счёт автоматической загрузки из созданной базы данных различных параметров и коэффициентов, необходимых для решения задачи. В созданную базу данных внесены параметры и коэффициенты, позволяющие определить рациональные условия резания при обработке различных сталей, а также жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов.

### 1.5.2. Пример расчета режима резания

В качестве примера выполним расчет режимов резания для чистовой обработки одной наружной и одной внутренней поверхностей втулки, изготавливаемой из титанового сплава ВТ8, эскиз которой представлен на рис. 1.1.



Неуказанные предельные отклонения размеров  $\pm \frac{IT14}{2}$

Рис. 1.1. Эскиз втулки

**Наружная поверхность Ø72 мм**

После запуска программы открывается вкладка ввода исходных данных «Данные для расчета», представленная на рис. 1.2.

На этой вкладке имеются окна для ввода исходных данных, определяющих характеристики станка, заготовки и инструмента.

В окне «Станок» в выпадающем списке оборудования выбираем станок, на котором будет обрабатываться заготовка. В нашем случае это токарно-винторезный станок модели 16К20. При этом все его технические характеристики автоматически загрузятся из базы данных. После чего выбирается вид предполагаемой обработки – «Обточка». Затем вводятся данные, определяющие параметры заготовки.

В окне «Заготовка» из выпадающего списка выбирается тип материала, а затем его марка. В нашем случае это титановый сплав марки ВТ8. При этом автоматически на экране отобразятся предел прочности данного материала при растяжении  $\sigma$  и модуль его продольной упругости  $E$ , а также поправочные коэффициенты соответственно на скорость и силы резания при данных условиях обработки по сравнению с нормативными. Затем вводятся необходимые геометрические параметры заготовки, перечисленные в данном окне, которые берутся непосредственно с эскиза или чертежа изготавливаемой детали. Следует отметить, что свободная длина детали  $L_0$  будет определяться видом закрепления, а припуск на сторону  $A$  при чистовой обработке следует брать, примерно, равным 1...1,5 мм. Обточку наружной поверхности втулки  $\varnothing 72$  мм будем производить в патроне. При этом припуск на обработку примем равным 1 мм. Минимальная глубина резания  $t_{\min}$  зависит от диаметра заготовки и точности выполняемого размера [10]. Назначим  $t_{\min}$  равной 0,15 мм. В этом же окне автоматически отображаются коэффициенты и показатели степеней, используемые в формуле для расчета температуры в зоне резания, и вводится значение критической температуры, а также указывается вид смазывающе-охлаждающей жидкости из выпадающего списка.

Прикрепить

Данные для расчёта

Станок

Модель	16K20
Тип материала	Титановые сплавы
Состояние заготовки	Отожжённое
Вид обработки	Обточка
Вид закрепления	В патроне
Вид заготовки	Прямоугольная
Материал реза	BK6-M
Н, мм/мин	12,50
Н <sub>т</sub> , мм	20
В, мм/об	1600,00
В, мм	20
С мин., мм/об	0,050
Т, мин	45
С макс., мм/об	2,800
Уг, мм	22
С макс., об/мин	5890,00
Уг, мм	30
Н <sub>т</sub> макс., об/мин	1600,00
Уг, мм	0,65
С мин., мм/об	0,050
Уг, мм	1,2
С макс., мм/об	2,800
Уг, мм	0,32
Наиб. усилие, Н	5890,00
К <sub>ув</sub>	1,00
К <sub>ов</sub>	1
К <sub>су</sub>	1,2
Мощность д.з., кВт	10,00
Высота центров, мм	215,00
Мощн. мех. подач, Вт	440,000

Заготовка

Тип материала	Титановые сплавы
Марка	BT8
Сигма <sub>т</sub> , МПа	1125
Е, МПа	117720
К <sub>тп</sub>	0,92
К <sub>тв</sub>	1,41
Охлаждение	5%эмульсия с 2%сул
Температурные хар-ки	
Δ, мм	72,00
Δ <sub>т</sub> , мм	58,00
Δ <sub>с</sub> , мм	0,074
Δ <sub>р</sub> , мкм	10,00
Δ <sub>л</sub> , мм	1,00
Δ <sub>л</sub> мин., мм	0,150
Δ <sub>л</sub>	16,00
Δ <sub>точ</sub>	38,00
С <sub>те</sub>	170,00
С <sub>х</sub>	0,05
С <sub>у</sub>	0,24
С <sub>z</sub>	0,24
С <sub>т</sub>	700
К <sub>т</sub>	1
К <sub>л</sub>	1
К <sub>с</sub>	1
К <sub>о</sub>	1

Резец

Материал реза	BK6-M
Н, мм	20
В, мм	20
Д, мм	22
Л, мм	30
С <sub>у</sub>	49,00
Уг	0,28
К <sub>ув</sub>	1,00
К <sub>ов</sub>	1
К <sub>су</sub>	1,2
Поправочные коэффициенты	
л. угол в плане	90
К <sub>фрх</sub>	1,15
К <sub>фру</sub>	0,50
К <sub>фрз</sub>	0,90
К <sub>фв</sub>	0,75
Радиус	1,00
К <sub>фрх</sub>	1,00
К <sub>фру</sub>	1,11
К <sub>фрз</sub>	1,05
Износ реза	0,30
К <sub>фрх</sub>	1,30
К <sub>фру</sub>	1,20
К <sub>фрз</sub>	1,03
Вспом. угол в плане	10
Gamma	10
Alfa	15

Рис. 1.2. Вкладка ввода исходных данных «Данные для расчёта» при определении режима резания для обработки наружной поверхности Ø72 мм

В окне «Резец» вначале задаются общие параметры, характеризующие инструмент, а именно: материал режущей части резца, форма державки и её размеры, вылет инструмента из резцедержателя, период стойкости, а затем его геометрические параметры: главный и вспомогательный углы в плане, радиус при вершине резца, допустимая величина износа, передний и задний углы. При этом материал режущей части инструмента и форма державки выбираются из выпадающих списков. Так как в нашем случае обрабатывается заготовка из титанового сплава, то для её формообразования целесообразно использовать резец с пластиной из твердого сплава группы «ВК». При этом при чистовом точении рекомендуется использовать, например, марку ВК6-М.

При наружной обработке сечение державки резца, как правило, прямоугольное, а вылет державки резца из резца держателя не превышает обычно 1...1,5 от её высоты (Н). Назначим вылет резца равным 1,5Н.

Период стойкости резца при чистовой обработке примем равным 45 минутам, а допустимую величину износа по задней поверхности равной 0,3 мм.

Исходя из имеющихся рекомендаций и технологических особенностей обработки геометрические параметры резца примем следующими: главный угол в плане  $\varphi = 90^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_l = 10^\circ$ ; главный передний угол  $\gamma = 10^\circ$ ; главный задний угол  $\alpha = 15^\circ$ ; радиус при вершине резца  $r = 1,0$  мм.

Как уже отмечалось ранее, обточка наружной поверхности  $\varnothing 72$  мм втулки осуществляется в патроне. При этом базирование заготовки выполняется по  $\varnothing 58$  мм и правому торцу (см. рис. 1.1), а закрепление по  $\varnothing 58$  мм. Поэтому, для того чтобы не врезаться резцом в кулачки, главный угол в плане принят равным  $90^\circ$ .



В этом же окне приведены коэффициенты и показатели степеней, используемые в формуле для расчета скорости резания.

После ввода всех исходных данных и нажатия кнопки «Применить» на экране монитора компьютера появляется главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания» программы, представленное на рис. 1.3.

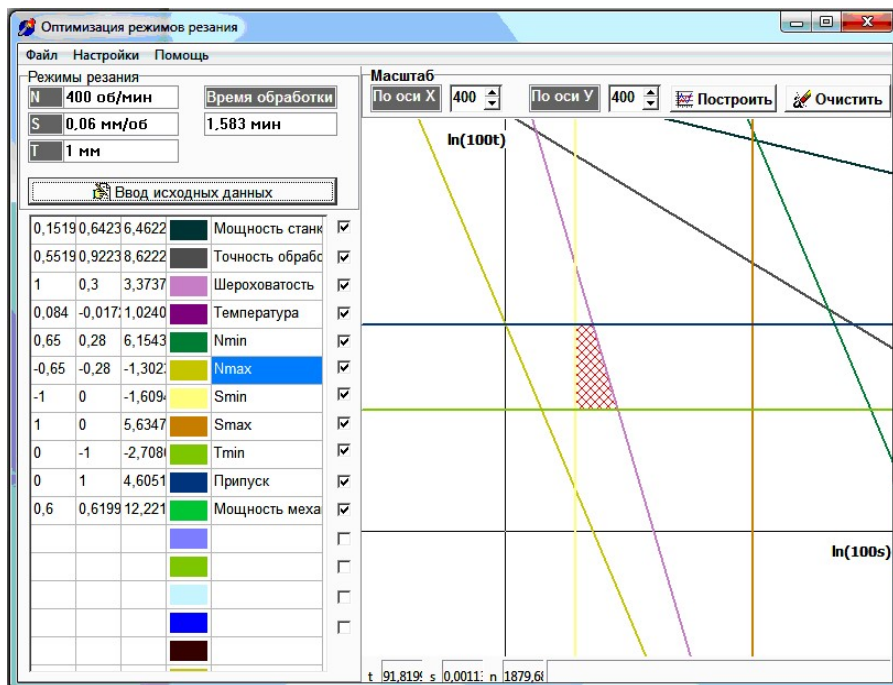


Рис. 1.3. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания» при определении режима резания для обработки наружной поверхности Ø72 мм

В левой части данного окна расположена таблица со значениями коэффициентов системы уравнений, а в правой части расположена графическая интерпретация решения этой системы, показывающая область возможных решений. Напротив каждой строки в таблице

написано к какому ограничению относится данная строка, а также указан цвет, которым будет отображаться ограничивающая прямая соответствующего технического ограничения. Программа позволяет учитывать не все ограничения, а лишь те, которые необходимы. После чего строится графическая интерпретация аналитического решения в виде области возможных значений режимов, из которых выбирается оптимальное значение. Пользователю предоставлены удобные средства для просмотра графического решения (перемещение области, изменение масштаба, мерцание выделенной прямой ограничения и т.д.).

Графический метод дает наглядное представление о влиянии технических ограничений на режимы обработки и позволяет проанализировать за счет чего в данном конкретном случае возможно увеличение производительность процесса резания.

Из области допустимых режимов обработки выбирается режим, обеспечивающий максимум целевой функции, то есть минимальное время обработки. Частота вращения шпинделя выбирается из перечня допустимых частот для выбранного станка. Результаты расчета представлены в левой верхней части диалогового окна.

Варьируя различным оборудованием в окне «Станок» вкладки «Данные для расчета», а также параметрами в окнах «Заготовка» и «Резец» этой же вкладки, можно получить наивыгоднейшие условия для обработки указанной поверхности.

### ***Внутренняя поверхность Ø58 мм***

Аналогичным образом определяются рациональные условия обработки и для расточки отверстия Ø58 мм. На рис. 1.4 и 1.5 приведены соответственно вкладка «Данные для расчета» с введенными исходными данными и главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания».

Данные для расчёта

Применить

Станок

Модель	16K20
Вид обработки	Расточка
N мин., об/мин	12,50
N макс., об/мин	1600,00
S мин., мм/об	0,050
S макс., мм/об	2,800
Наиб. усилие, Н	5890,00
Мощность дэ., кВт	10,00
Высота центров, мм	215,00
Мощн. мех. подач, Вт	440,000

Тип материала	Титановые сплавы
Марка	BT8
Sigma, МПа	1125
E, МПа	117720
Kmp	0,92
Kpv	1,41

Состояние заготовки	Отожжённое
Вид закрепления	В патроне
Охлаждение	5%эмульсия с 2%суи

СТета	170,00
XТета	0,95
УТета	0,24
ZТета	0,24
Tetta xp	700
KqТetta	1
KuТetta	1
KCTetta	1
KOTetta	1

D, мм	72,00
d, мм	58,00
delta, мм	0,046
Rz, мкм	10,00
A, мм	1,00
L мин., мм	0,150
L0	23,00
Lточ	28,00

Заготовка

Станок

Материал реза	ВК6-М
E, МПа	220000
T, мин	45
Крутая	Крутая
H <sub>т</sub> , мм	20
B <sub>т</sub> , мм	20
D <sub>т</sub> , мм	20
L <sub>т</sub> , мм	40

Cv	49,00
Xv	0,28
Yv	0,65
L	0,32
Kuv	1,00
Kov	1
Kcv	1,2

Поправочные коэффициенты

л. угол в плане	105
KRPx	1,15
KRFy	0,50
KRPz	0,90
KRFv	0,75
Радиус	0,50
KRPx	1,00
KRFy	1,00
KRPz	1,00
Износ реза	0,30
KRPx	1,30
KRFy	1,20
KRPz	1,03
Вспом. угол в плане	10
Gamma	10
Alpha	15

Резец

Рис. 1. 4. Вкладка ввода исходных данных «Данные для расчёта» при определении режима резания для обработки внутренней поверхности Ø58 мм

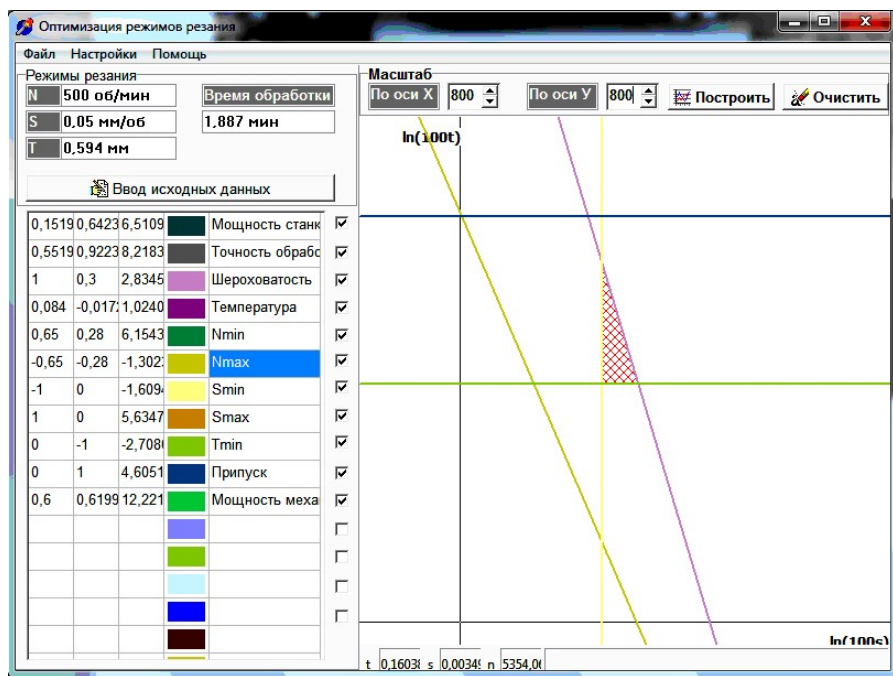


Рис. 1.5. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания» при определении режима резания для обработки внутренней поверхности Ø58 мм

Также как и в предыдущем случае, варьируя различным оборудованием в окне «Станок» вкладки «Данные для расчета», а также параметрами в окнах «Заготовка» и «Резец» этой же вкладки, можно получить наиболее выгодные условия для обработки внутренней поверхности Ø58 мм.

## 1.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки

После назначения наиболее выгодных условий для формообразования наружной и внутренней поверхностей выполняется обработка заготовки. Процесс резания осуществляется на станке, выбранном при назначении оборудования из перечня, имеющегося в лаборатории.

Контроль геометрических размеров наружной поверхности детали осуществляется при помощи штангенциркуля или микрометра, в зависимости от точности выполнения размера, а внутренней поверхности – при помощи штангенциркуля и индикаторного нутромера. Контроль шероховатости поверхностей производится посредством автоматизированного профилометра-профилографа модели БВ-7669. На основании результатов измерений делается заключение о правильности выбранных условий обработки.

### **1.7. Содержание отчета**

В процессе выполнения работы оформляется отчет, бланк которого приведен в приложении 1. В отчете приводятся: эскиз изготавливаемой детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наивыгоднейшие условия формообразования; общие виды вкладки «Данные для расчета» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов резания» при определении рациональных условий обработки для операций обточка и расточка указанных поверхностей; результаты измерения геометрических параметров обработанных поверхностей; ответ на индивидуальное задание и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Объяснить, что представляет собой математическая модель для определения рациональных условий обработки?
2. Что называется целевой функцией?
3. Что понимается под техническими ограничениями?
4. В каком случае задача по определению рациональных условий обработки может быть приведена к задаче линейного программирования?
5. Каким методом может быть решена задача линейного программирования?
6. Какие исходные данные могут варьироваться при определении рациональных условий обработки?
7. Как графически выглядит область рациональных условий обработки?

## **2. Лабораторная работа №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

### **2.1 Цель и задачи работы**

**Цель работы** – получение практических навыков и закрепление теоретических знаний в области определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок.

**Задачи:**

- ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок;
- ознакомиться с методикой и авторской программой расчета режимов резания при фрезеровании;
- приобрести практические навыки определения рациональных условий обработки для операций концевого фрезерования.

### **2.2. Последовательность выполнения работы**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторной работы.
2. Изучить методические указания по выполнению данной лабораторной работы.
3. Ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок.
4. Ознакомиться с методикой и программой расчета режимов резания при различных вариантах управляемых параметров.
5. Определить наиболее выгодные условия обработки для поверхностей заготовки, указанных в индивидуальном задании.

6. Провести обработку заготовки и оценить заданные параметры качества.

7. Оформить отчет по лабораторной работе.

### **2.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе**

#### **Программное обеспечение:**

– авторская программа для определения рациональных условий обработки на операциях концевой фрезеровки заготовок.

#### **Металлорежущее оборудование:**

– вертикально- и горизонтально-фрезерные станки и фрезерные обрабатывающие центры с ЧПУ.

#### **Режущие инструменты:**

- концевые фрезы из различных марок быстрорежущей стали;
- концевые фрезы из различных марок твердого сплава.

#### **Средства измерений:**

- штангенциркуль, штангенрейсмасс, гладкие микрометры для измерения линейных размеров;
- тахометр для определения числа оборотов фрезы;
- автоматизированный профилометр-профилограф модели БВ-7669, для контроля шероховатости обработанных поверхностей.

### **2.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок**

Обеспечение высокой производительности процесса резания, заданных точности, шероховатости и требуемого состояния поверхностного слоя на операциях механической обработки и, в частности, при получистовом и чистовом фрезеровании сложнопрофильных деталей, возможно лишь на основе научно обоснованного определения рациональных условий формообразования. Для этого необходимо выбрать целевую функцию, технические ограничения и на их базе разработать математическую модель, позволяющую получить наивыгоднейшие режимы резания при различных вариантах управляемых параметров.

### 2.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений

Наиболее часто при определении рациональных условий резания (конструкции и геометрии режущего инструмента, марки инструментального материала, режима резания, СОТС и т.д.) для операций механической обработки в качестве целевой функции принимается себестоимость операции. При этом переменная доля себестоимости операции при резании одним инструментом определяется по формуле [3]:

$$C = t_m E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где  $t_m$  – основное технологическое (машинное) время, мин;  $E$  – себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.;  $t_c$  – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, установку переточенного и подналадку станка, мин;  $\mathcal{E}_u$  – затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за период его стойкости, руб.;  $Q$  – количество деталей, обработанных за период стойкости, шт.

В свою очередь затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за его период стойкости, могут быть определены по формуле

$$\mathcal{E}_u = t_c E_n + C_{зам} + \frac{(C_{ин} - C_{отх})k_y}{i + 1},$$

где  $E_n$  – номинальная заработная плата наладчика в одну минуту, руб.;  $C_{зам}$  – стоимость заточки затупившегося инструмента, руб.;  $C_{ин}$  – первоначальная стоимость инструмента, руб.;  $C_{отх}$  – стоимость отходов инструмента, руб.;  $k_y$  – коэффициент, учитывающий случайную убыль инструмента;  $i$  – число переточек, допускаемых инструментом до его полного износа, шт.

При проектировании технологического процесса изготовления детали большое значение имеет правильный выбор периода стойкости режущего инструмента, применяемого для каждой операции. В зависимости от конкретных условий и задач производства могут ис-



пользоваться различные периоды стойкости:  $T_{\max}$  – максимальный период стойкости, мин;  $T_{\text{опт}}$  – период стойкости, соответствующий оптимальной скорости резания, мин;  $T_{\text{эк}}$  – экономический период стойкости, соответствующий минимальной себестоимости операции;  $T_{\text{н.нр}}$  – период стойкости, соответствующий наибольшей (максимальной) производительности. На практике наиболее часто используют экономический период стойкости

$$T_{\text{эк}} = \frac{1-m}{m} \left( t_c + \frac{\partial u}{E} \right);$$

$$T_{\text{н.нр}} = \frac{1-m}{m} \cdot t_c,$$

где  $m$  – показатель относительной стойкости инструмента.

Работа с максимальной производительностью, как правило, не соответствует минимальной себестоимости обработки. В связи с этим, при правильном построении производственного процесса определение рационального режима резания должно основываться на экономическом периоде стойкости. Обработка заготовок на режимах, соответствующих наибольшей производительности, в условиях производства ведется лишь в случаях крайней необходимости, когда требуется, не считаясь с затратами, изготовить максимально возможное количество деталей. Режимы резания, рассчитанные с использованием экономических периодов стойкости инструментов и обеспечивающие наименьшее время обработки, будут одновременно и наиболее экономичными [6]. Поэтому в качестве целевой функции при концевом фрезеровании целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из ранее изложенного, уравнение целевой функции при однопроходном фрезеровании концевыми фрезами будет иметь вид

$$f_m = \frac{L}{S_m} = \frac{L}{n_\phi \cdot S_{zz}}, \quad (2.1)$$

где  $L$  – длина рабочего хода фрезы, мм;  $n_\phi$  – частота вращения фрезы, об/мин;  $S_m$  – минутная подача, мм/мин;  $S_z$  – продольная подача, мм/зуб;  $z$  – число зубьев фрезы.

В свою очередь

$$L = l_m + l_1 + l_2,$$

где  $l_m$  – длина пути фрезы в направлении подачи, мм;  $l_1$  – путь врезания фрезы, мм;  $l_2$  – перебег фрезы, мм.

Путь врезания фрезы при концевом фрезеровании составляет [2]

$$l_1 = 0,5D_\phi \sin \psi,$$

где  $D_\phi$  – диаметр концевой фрезы, мм;  $\psi = \arccos(1 - 2t_\phi / D_\phi)$  ( $t_\phi$  – глубина фрезерования, мм).

Величина перебега фрезы обычно не превышает 1...5 мм.

Большое количество деталей машин и особенно деталей аэрокосмической техники работают при высоких давлениях, температурах и знакопеременных нагрузках, поэтому к качеству изготовления этих деталей предъявляются повышенные требования. Исходя из вышеизложенного, на операции получистового и чистового фрезерования должны накладываться определенные технические ограничения.

### ***Ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента***

Скорость резания при концевом фрезеровании определяется из условия полного использования режущих свойств инструмента на основании неравенства

$$v \leq v_m, \tag{2.2}$$

где  $v$  – скорость резания, м/мин;  $v_m$  – максимально допустимая скорость резания при заданной стойкости концевой фрезы, м/мин.

Подставив значения  $\nu$  и  $\nu_m$ , определяемые по формулам

$$\nu = \frac{\pi D_\phi n_\phi}{1000}, \nu_m = \frac{C_\nu D_\phi^{q_\nu}}{T^m S_z^{y_\nu} t_\phi^{x_\nu} B^{u_\nu} z^{p_\nu}}, \text{ в неравенство (2.2) и решая его}$$

относительно  $n_\phi S_z t_\phi$ , получим первое техническое ограничение:

$$n_\phi (100 S_z)^{y_\nu} (100 t_\phi)^{x_\nu} \leq \frac{318 C_\nu D_\phi^{(q_\nu-1)} 100^{(x_\nu+y_\nu)}}{T^m B^{u_\nu} z^{p_\nu}}, \quad (2.3)$$

где  $C_\nu$  – коэффициент, характеризующий условия обработки;  $T$  – заданный период стойкости фрезы, мин;  $B$  – ширина фрезерования, мм;  $m, x_\nu, y_\nu, q_\nu, u_\nu, p_\nu$  – показатели степени, характеризующие соответственно влияние  $T, t_\phi, S_z, D_\phi, B, z$  на скорость резания.

В неравенстве (2.3) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо  $S_z \rightarrow 100 S_z$ , а вместо  $t_\phi \rightarrow 100 t_\phi$ , с соответствующими поправками в правой части.

### **Ограничение, связанное с мощностью станка**

При фрезеровании заготовок, также как и при других видах механической обработки, проводимой на металлорежущих станках, необходимо, чтобы эффективная мощность  $N_{эф}$  не превышала мощности, подводимой к шпинделю станка, то есть выполнялось условие [10]

$$N_{эф} \leq 1,2 N_{инн}, \quad (2.4)$$

где  $N_{эф}$  – эффективная мощность, кВт;  $N_{инн}$  – мощность, подводимая к шпинделю станка, кВт.

Для определения эффективной мощности при концевом фрезеровании за основу могут быть приняты формулы, приведенные в работах [2, 5]. В общем виде эти формулы можно представить как

$$N_{эф} = C_N 10^{-5} D_\phi^{q_N} S_z^{y_N} t_\phi^{x_N} B z n_\phi^{z_N} k_{N1} k_{N2}, \quad (2.5)$$

где  $C_N$  – коэффициент, характеризующий условия обработки при фрезеровании концевыми фрезами, для которых была получена

вышеприведенная эмпирическая зависимость;  $k_{N1} = \left(\frac{\sigma_6}{750}\right)^{0,3}$ ,  $k_{N2}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние прочности обрабатываемого материала и величины переднего угла на эффективную мощность резания;  $x_N, y_N, q_N, z_N$  – показатели степени, характеризующие соответственно влияние  $t_\phi, S_z, n_\phi, D_\phi$  на мощность.

Подставив в неравенство (2.4) формулу (2.5) и  $N_{um} = N_{\text{эо}}\eta$ , после решения относительно  $n_\phi S_z t_\phi$  второе техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n_\phi^{z_N} (100S_z)^{y_N} (100t_\phi)^{x_N} \leq \frac{1,2N_{\text{эо}}\eta 100^{(x_N+y_N)}}{C_N 10^{-5} D_\phi^{q_N} Bz k_{N1} k_{N2}}, \quad (2.6)$$

где  $N_{\text{эо}}$  – мощность электродвигателя механизма главного движения станка, кВт;  $\eta$  – КПД кинематической цепи механизма главного движения.

***Обобщенное ограничение, учитывающее марку обрабатываемого и инструментального материалов, жесткость технологической системы, шероховатость обработанной и форму обрабатываемой поверхностей***

При концевом фрезеровании различных групп материалов величина подачи, приходящаяся на один зуб фрезы, не должна превышать значения, определяемого из неравенства [10]

$$S_z \leq \frac{C_S D_\phi^{q_S} k_{S1} k_{S2} k_{S3} k_{S4}}{t_\phi^{x_S} B^{u_S}}, \quad (2.7)$$

где  $C_S$  – коэффициент, характеризующий уровень подачи;  $k_{S1}$  – коэффициент, учитывающий жесткость упругой технологической системы;  $k_{S2}$  – коэффициент, учитывающий инструментальный материал;  $k_{S3}$  – коэффициент, учитывающий шероховатость обработанной поверхности;  $k_{S4}$  – коэффициент, учитывающий форму обрабатываемой поверхности;  $x_S, q_S, u_S$  – показатели степени, характеризующие соответственно влияние  $t_\phi, D_\phi, B$  на величину подачи.

После решения (2.7) относительно  $S_z$ ,  $t_\phi$  третье техническое ограничение будет иметь вид

$$(100S_z)(100t_\phi)^{x_s} \leq \frac{C_s D_\phi^{q_s} (100)^{(1+x_s)} k_{s1} k_{s2} k_{s3} k_{s4}}{B^{u_s}}. \quad (2.8)$$

***Ограничение, связанное с температурой резания при фрезеровании***

При чистовом концевом фрезеровании температура в зоне резания достаточна для того, чтобы в поверхностном слое произошли структурные и фазовые превращения. В связи с этим необходимо, чтобы температура в зоне контакта фрезы с заготовкой не превышала критических значений, то есть выполнялось условие

$$\theta \leq \theta_{кр}, \quad (2.9)$$

где  $\theta$  – температура в зоне резания, °С;  $\theta_{кр}$  – критическая температура в зоне резания, °С.

Температура в зоне резания при фрезеровании заготовок концевыми фрезами может быть определена по эмпирической зависимости [8]

$$\theta = C_\theta \nu^{z_\theta} S_z^{y_\theta} B^{u_\theta} \left( \frac{t_\phi}{D_\phi} \right)^{x_\theta}, \quad (2.10)$$

где  $C_\theta$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне резания при фрезеровании;  $x_\theta, u_\theta, y_\theta, z_\theta$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $t_\phi, B, S_z$  и  $\nu$  на величину температуры резания.

Подставив зависимость (2.10) и формулу для расчета скорости резания в неравенство (2.9) и решив его относительно  $n_\phi S_z t_\phi$ , получим четвертое техническое ограничение:

$$n_\phi^{z_\theta} (100S_z)^{y_\theta} (100t_\phi)^{x_\theta} \leq \frac{318^{z_\theta} \cdot 100^{(x_\theta+y_\theta)} \theta_{кр}}{C_\theta D_3^{(z_\theta-x_\theta)} B^{u_\theta}}. \quad (2.11)$$

### **Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, используемого для фрезерования**

При обработке заготовки частота вращения фрезы и минутная подача, сообщаемая концевой фрезе, должны быть ограничены, соответственно, наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя и наибольшей и наименьшей подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

– пятое техническое ограничение

$$n_{\phi} \geq n_{cm \min}, \quad (2.12)$$

где  $n_{cm \min}$  – минимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– шестое техническое ограничение

$$n_{\phi} \leq n_{cm \max}, \quad (2.13)$$

где  $n_{cm \max}$  – максимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– седьмое техническое ограничение

$$S_M \geq S_{M.cm \min},$$

где  $S_{M.cm \min}$  – минимальная минутная подача станка, мм/мин.

Учитывая, что  $S_M = n_{\phi} S_z z$ , в окончательном виде седьмое ограничение будет иметь вид

$$n_{\phi} (100 S_z) \geq \frac{100 S_{M.cm \min}}{z}; \quad (2.14)$$

– восьмое техническое ограничение

$$n_{\phi} (100 S_z) \leq \frac{100 S_{M.cm \max}}{z}, \quad (2.15)$$

где  $S_{M.cm \max}$  – максимальная минутная подача станка, мм/мин.

### ***Ограничения, связанные с глубиной резания***

При концевом фрезеровании глубина резания  $t_\phi$  не может быть меньше некоторой определенной для каждого инструмента и обрабатываемого материала величины  $t_{\phi.\min}$ . С другой стороны глубина резания не может быть больше  $t_{\phi.\max}$ , которая равна диаметру фрезы. Тогда технические ограничения, обусловленные глубиной резания, будут иметь вид:

– девятое техническое ограничение:

$$100t_\phi \geq 100t_{\phi.\min}; \quad (2.16)$$

– десятое техническое ограничение?

$$100t_\phi \leq 100t_{\phi.\max}. \quad (2.17)$$

Выбранные и описанные ранее технические ограничения, отражающие с определенной степенью точности физический процесс резания в совокупности с целевой функцией, позволяют построить математическую модель для определения рациональных условий обработки.

#### ***2.4.2. Построение математической модели***

Преобразуем полученные ранее неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима резания, а также целевую функцию, в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений, при заданных определяющих и управляемых параметрах, позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки для операций полустогового и чистового концевой фрезерования заготовок и гарантированно обеспечивать при этом технические требования, предъявляемые к детали. Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы концевой фрезерования заготовок, прологарифмируем зависимости (2.3), (2.6), (2.8), (2.11)-(2.17) и (2.1), которые после введения обозначений будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_\nu x_2 + x_\nu x_3 \leq b_1; \\ z_N x_1 + y_N x_2 + x_N x_3 \leq b_2; \\ x_2 + x_s x_3 \leq b_3; \\ z_\theta x_1 + y_\theta x_2 + x_\theta x_3 \leq b_4 \\ x_1 \geq b_5; \\ x_1 \leq b_6; \\ x_1 + x_2 \geq b_7; \\ x_1 + x_2 \leq b_8; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}; \end{array} \right. \quad (2.18)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2,$$

где  $x_1 = \ln n_\phi$ ;  $x_2 = \ln(100S_z)$ ;  $x_3 = \ln(100t_\phi)$ ;

$$b_1 = \ln \frac{318C_\nu D_\phi^{(q_\nu-1)} 100^{(x_\nu+y_\nu)}}{T^m B^{u_\nu} z^{p_\nu}}; \quad b_2 = \ln \frac{1,2N_{\text{эд}} \eta 100^{(x_N+y_N)}}{C_N 10^{-5} D_\phi^{q_N} Bz k_{N1} k_{N2}};$$

$$b_3 = \ln \frac{C_S D_\phi^{q_S} (100)^{(1+x_S)} k_{S1} k_{S2} k_{S3} k_{S4}}{B^{u_S}}; \quad b_4 = \ln \frac{318z_\theta 100^{(x_\theta+y_\theta)} \theta_{\text{кр}}}{C_\theta D_\phi^{(z_\theta-x_\theta)} B^{u_\theta}};$$

$$b_5 = \ln n_{\text{cm min}}; \quad b_6 = \ln n_{\text{cm max}}; \quad b_7 = \ln \frac{100S_{\text{м.см min}}}{z};$$

$$b_8 = \ln \frac{100S_{\text{м.см max}}}{z}; \quad b_9 = \ln(100t_{\phi.\text{min}}); \quad b_{10} = \ln(100t_{\phi.\text{max}});$$

$$f_0 = \ln f_m; \quad c_0 = \ln A = \ln \left( \frac{100L}{z} \right).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (2.18) и линейная функция  $f_0$  представляют собой математическую модель для определения рационального режима резания при фрезеровании заготовки концевой фрезой.



Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (2.18) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим  $x_1$  из ограничения-неравенства, связанного с режущими свойствами инструмента, которые в значительной мере определяются его стойкостью:

$$x_1 = b_1 - y_v x_2 - x_v x_3$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (2.18). При фрезеровании ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента, является одним из основных ограничений. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных,  $x_2$  и  $x_3$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} (y_N - y_v z_N)x_2 + (x_N - x_v z_N)x_3 \leq b_2 - z_N b_1; \\ x_2 + x_v x_3 \leq b_3; \\ (y_\theta - y_v z_\theta)x_2 + (x_\theta - x_v z_\theta)x_3 \leq b_4 - z_\theta b_1 \\ - y_v x_2 - x_v x_3 \geq b_5 - b_1; \\ - y_v x_2 - x_v x_3 \leq b_6 - b_1; \\ (1 - y_v)x_2 - x_v x_3 \geq b_7 - b_1; \\ (1 - y_v)x_2 - x_v x_3 \leq b_8 - b_1; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}; \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$f_0 = (c_0 - b_1) + (y_v - 1)x_2 + x_v x_3.$$

Так как в условиях конкретной задачи  $c_0 - b_1$  является величиной постоянной, то целевая функция  $f_0$  достигнет минимального значения в том случае, когда неизвестное  $x_2$  примет максимальное ( $(y_v - 1)$  – отрицательная величина), а  $x_3$  минимально допустимые значения, удовлетворяющие системе ограничений (2.19).

## **2.5. Разработка программы для расчета оптимальных режимов обработки**

Созданная математическая модель для определения рациональных условий обработки при концевом фрезеровании заготовок, представленная в пункте 2.4.2, позволяет реализовать её в программе расчета. В качестве средства разработки, также как и в предыдущей лабораторной работе, выбрана среда программирования Delphi в сочетании с СУБД Firebird. Данное решение позволяет снизить стоимость эксплуатации программы, так как Firebird является системой управления базами данных с открытым кодом, что разрешает её бесплатное неограниченное использование. Применение этой системы обеспечивает возможность упорядоченного хранения и быстрого доступа к данным, таким как характеристики материалов, модели станков, параметры режущего инструмента.

Программа создана для работы под управлением операционной системы семейства Microsoft Windows, как наиболее распространенной в данный момент системы.

### ***2.5.1. Блок-схема основного модуля программы***

Система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс концевого фрезерования, решается на ЭВМ симплекс-методом, то есть совместно решаются все возможные пары линейных неравенств. Каждое ограничение описывает линию на плоскости. Совместное решение системы из двух таких уравнений дает точку пересечения этих двух линий. Таким образом, на основе расчетов получают точки всех вершин области оптимальных решений. Далее из этого множества точек, удовлетворяющих всем ограничениям, выбирается точка, соответствующая минимуму целевой функции, то есть решается задача линейного программирования.

### ***2.5.2. Описание программы***

В программе можно выделить три основных блока: ввод исходных данных для расчета, просмотр результатов расчета и его графической интерпретации, средства редактирования базы данных.

Исходные параметры разделены на три логические группы:

- параметры, относящиеся к станку, на котором производится обработка;
- параметры, относящиеся к обрабатываемой заготовке;

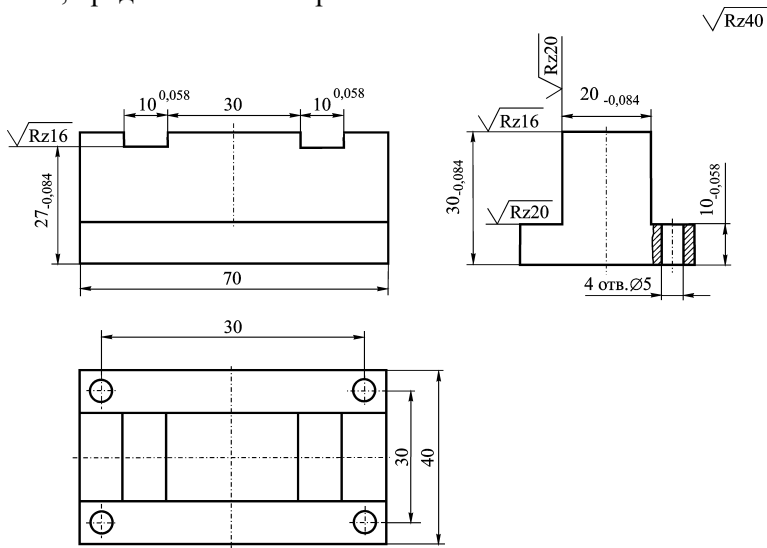
– параметры, относящиеся к фрезе, при помощи которой ведётся обработка.

Ввод исходных данных существенно упрощён за счёт автоматической загрузки из созданной базы данных различных параметров и коэффициентов, необходимых для решения задачи оптимизации. В созданную базу данных внесены параметры и коэффициенты, позволяющие определить рациональные условия резания при обработке различных сталей, а также титановых и алюминиевых сплавов.

### 2.5.3. Пример расчета режима резания

Рассмотрим в качестве примера применение программы для определения рациональных условий резания при чистовом концевом фрезеровании одной из плоских поверхностей корпуса, определяемой размерами:  $l_1 = 70 \pm 0,37$  мм;  $l_2 = 10^{0,36}$  мм;  $l_3 = 10_{-0,058}$  мм. Корпус, чертеж которого представлен на рис. 2.1, изготавливается из титанового сплава ВТ9.

После запуска программы открывается вкладка «Ввод исходных данных», представленная на рис. 2.2.



Неуказанные предельные отклонения размеров :  
валов по h14, отверстий по H14, остальных + IT14/2

Рис. 2.1. Эскиз корпуса

**Ввод исходных данных**

Станок

Модель: 6M13ГН1 с ЧПУ FMS-3000

Мощность станка, кВт: 7.50

КПД: 0.80

п. ст. мин, об/мин: 31.5

п. ст. макс. об/мин: 1600

S мин, мм/зуб: 12.5

S макс, мм/зуб: 1000

Инструмент

Фреза

Диаметр фрезы, мм: 12

Период стойкости, мин: 120

Число зубьев: 6

Заготовка

Тип материала

Типовые сплавы

Марка материала: ВТ9 (ТС)

Пред. прочн. мПа: 1150

Длина фрезерования, мм: 70

Ширина фрезерования: 1

ϕф min: 10

ϕф max: 12

Cteta	254.00	Cn	0.64
xteta	0.00	qn	0.27
yteta	0.17	kn	0.85
zteta	0.32	yn	0.75
uteta	0.05	zn	1.13
TetaKr	800	kn2	0.80
		Cv	60
		qv	0.60
		kv	0.30
		yv	0.30
		m	0.35
		uv	0.20
		Pv	0.20

Остальные коэффициенты

Cs	0.0216	ks1	0.9
ks	0.22	ks2	0.85
qs	0.75	ks3	0.35
us	0.1	ks4	1

Применить

Рис. 2.2. Вкладка «Ввод исходных данных» при определении рациональных условий обработки плоской поверхности корпуса

На этой вкладке имеются окна для ввода параметров, определяющих характеристики станка, инструмента и заготовки.

В окне «Станок» в выпадающем списке оборудования выбираем станок, на котором будет обрабатываться заготовка. В нашем случае это вертикально-фрезерный станок с ЧПУ модели 6М13ГН-1 с СЧПУ FMS-3000. При этом все его технические характеристики автоматически загрузятся из базы данных.

В окне «Инструмент» (см. рис. 2.2.) из выпадающего меню выбирается тип фрезы и инструментальный материал. Для обработки заготовки из титанового сплава ВТ9 выберем концевую фрезу из твёрдого сплава. Выбор титанового сплава обусловлен тем, что максимальная частота вращения шпинделя у станка модели 6М13ГН-1 составляет 1600 об/мин, а диаметр концевой фрезы, с помощью которой будет обработана поверхность (уступ), равен 12 мм, то есть максимально возможная скорость резания может достигнуть значения, равного 60 м/мин. При таких скоростях для чистовой обработки заготовок из титановых сплавов целесообразно использовать фрезы из твёрдого сплава, например, марки ВК6М. Затем вводятся геометрические параметры фрезы.

В окне «Заготовка» (см. рис. 2.2) вводятся тип материала и его марка. Причем рядом с маркой материала заготовки в круглых скобках указан тип инструментального материала, который будет использован при обработке данной заготовки. Это либо быстрорежущая сталь (БРС), либо твердый сплав (ТС). То есть из базы данных выбирается марка материала заготовки с соответствующим инструментальным материалом, из которого будет выполнена фреза. В нашем случае это титановый сплав ВТ9 (ТС). От марок обрабатываемого и инструментального материалов будут зависеть коэффициенты и показатели степеней, используемые в формулах для расчета скорости, мощности и температуры резания. Эти коэффициенты и показатели степеней загрузятся из базы данных автоматически. В этом же окне указываются длина и ширина фрезерования, мини-

мальная  $t_{\phi, \min}$  и максимальная  $t_{\phi, \max}$  глубины резания, а также коэффициенты, показатели степеней, используемые в неравенстве для обобщенного ограничения.

После ввода всех исходных данных и нажатия кнопки «Применить» на экране монитора компьютера появляется главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания» программы, представленное на рис. 2.3.

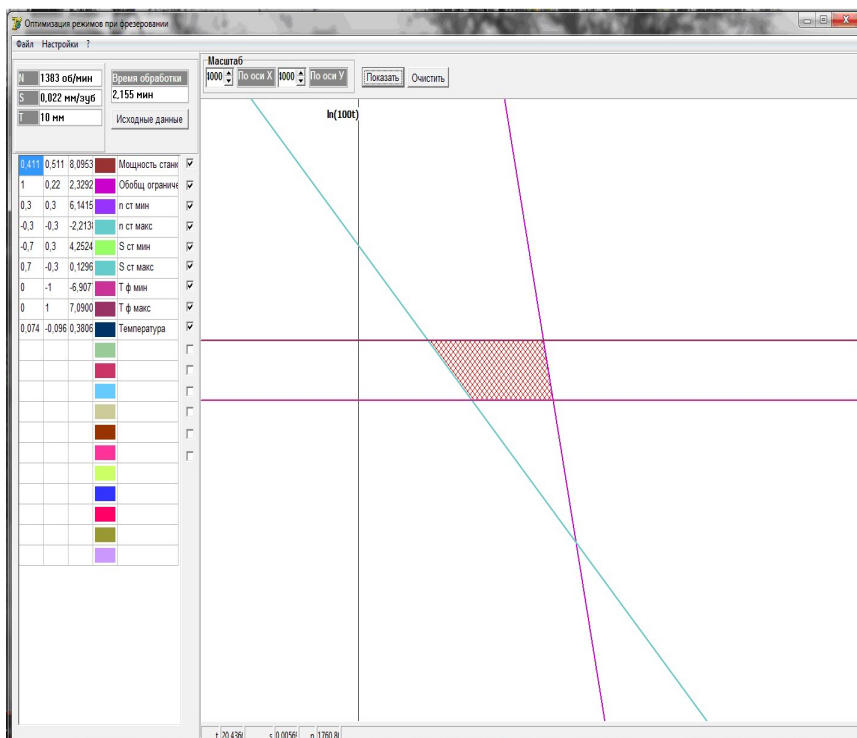


Рис. 2.3. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов резания» при концевом фрезеровании плоской поверхности

В левой части данного окна расположена таблица со значениями коэффициентов системы уравнений, а в правой части расположена графическая интерпретация решения этой системы, показывающая область возможных решений.

Интерфейс программы для определения рациональных условий обработки на операциях концевое фрезерования заготовок аналогичен интерфейсу программы, представленному в лабораторной работе №1.

Из области допустимых режимов обработки выбирается режим, обеспечивающий максимум целевой функции, то есть минимальное время обработки. Результаты расчета представлены в левой верхней части диалогового окна.

## **2.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки**

После определения наиболее выгодных условий резания для формообразования заданных преподавателем плоских поверхностей заготовки выполняется их обработка. Процесс фрезерования осуществляется на станке, выбранном при назначении оборудования из имеющегося в лаборатории перечня.

Контроль линейных геометрических размеров осуществляется либо при помощи штангенциркуля или штангенрейсмаса, либо при помощи микрометра. Выбор измерительного инструмента будет определяться точностью контролируемого размера.

Контроль шероховатости поверхностей производится посредством автоматизированного профилометра-профилографа модели БВ-7669. На основании результатов измерений делается заключение о правильности выбранных условий обработки.

## **2.7. Содержание отчета**

В процессе выполнения работы оформляется отчет, бланк которого приведен в приложении 2. В отчете приводятся: эскиз изготавливаемой детали с выделением плоских поверхностей, для обработ-

ки которых были определены наивыгоднейшие условия формообразования; общие виды вкладки «Ввод исходных данных» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов резания» при определении рациональных условий обработки для операций концевого фрезерования; результаты измерения геометрических параметров обработанных поверхностей; ответ на индивидуальное задание и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Для обработки каких поверхностей используются концевые фрезы?
2. Какие фрезы обладают бóльшей стойкостью при работе на идентичных режимах – твердосплавные или изготовленные из быстрорежущей стали?
3. Что включает в себя математическая модель для определения рациональных условий обработки?
4. Какие параметры процесса обработки могут быть использованы в качестве целевой функции?
5. Что понимается под техническими ограничениями?
6. В каком случае задача по определению рациональных условий обработки может быть приведена к задаче линейного программирования?
7. Каким методом может быть решена задача линейного программирования?
8. Какие исходные данные не могут, а какие могут варьироваться при определении рациональных условий обработки?
9. Как графически на плоскости выглядит область рациональных условий обработки?



### **3. Лабораторная работа №3**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО И ВНУТРЕНЕГО ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

### **3.1. Цель и задачи работы**

**Цель работы** – закрепление теоретических знаний в области определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок методом продольной подачи, а также получение практических навыков расчета режимов резания.

#### **Задачи:**

- ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи;
- ознакомиться с методикой и программой расчета режимов резания;
- приобрести практические навыки определения наивыгоднейших режимов резания при круглом наружном и внутреннем шлифовании цилиндрических и конических поверхностей заготовок методом продольной подачи.

### **3.2. Последовательность выполнения работы**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторной работы.
2. Изучить методические указания по выполнению данной лабораторной работы.
3. Ознакомиться с математической моделью, предназначенной для определения рациональных условий обработки при круглом на-

ружном и внутреннем шлифовании цилиндрических и конических поверхностей заготовок методом продольной подачи.

4. Ознакомиться с методикой и программой расчета режимов резания при шлифовании.

5. Для обработки наружной и внутренней поверхностей заготовки, указанных преподавателем, определить наивыгоднейшие условия резания.

6. Провести обработку заготовки и оценить заданные параметры качества.

7. Оформить отчет по работе.

### **3.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе**

#### **Программное обеспечение:**

– авторская программа для определения рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования заготовок методом продольной подачи.

#### **Металлорежущее оборудование:**

– универсальные круглошлифовальные наружно- и внутришлифовальные станки.

#### **Абразивные режущие инструменты:**

– шлифовальные круги прямого профиля (тип 1) для круглого наружного шлифования;

– шлифовальные круги для круглого внутреннего шлифования: прямого профиля (тип 1) и чашечные цилиндрические (тип 6).

#### **Средства измерений:**

– штангенциркуль, гладкие микрометры и индикаторный нутромер для измерения диаметров заготовки;

– тахометр для определения числа оборотов заготовки;

– автоматизированный профилометр-профилограф модели БВ-7669, для контроля шероховатости обработанных поверхностей.

### **3.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи**

Для решения задачи научно обоснованного определения рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования цилиндрических и конических поверхностей различных заготовок методом продольной подачи необходимо выбрать целевую функцию, технические ограничения и на их базе разработать математическую модель, позволяющую получить рациональные режимы резания при различных вариантах управляемых параметров.

В данной лабораторной работе представлена линейная математическая модель, позволяющая осуществить оптимизацию в детерминированной постановке, при которой действие возмущающих параметров во внимание не принимается. Задача по определению рациональных условий обработки сводится к задаче линейного программирования.

#### ***3.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений***

Чаще всего при определении рациональных условий обработки на ранее указанных операциях, то есть характеристики инструмента и его геометрии, режима резания, СОТС и т.д., в качестве целевой функции принимается себестоимость одной операции. При этом переменная доля себестоимости операции при шлифовании одним кругом определяется по формуле

$$C = t_0 E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где  $t_0$  – основное технологическое (машинное) время, мин;  $E$  – себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.;  $t_c$  – время, затрачиваемое на снятие изношенного инструмента, установку нового и подналадку станка, мин;  $\mathcal{E}_u$  – затраты, связанные с экс-

плуатацией инструмента за период его стойкости, руб.;  $Q$  – количество деталей обработанных за период стойкости, шт.

При правильном построении производственного процесса определение рациональных условий обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования должно основываться на экономическом периоде стойкости инструмента. При использовании в расчетах экономических периодов стойкости режимы резания, обеспечивающие наименьшее время обработки, будут одновременно и наиболее экономичными [6]. Поэтому в качестве целевой функции, при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок методом продольной подачи, целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из ранее изложенного, уравнение целевой функции будет иметь вид:

$$f_u = \frac{l_u A}{n_z S_{np} S_x}, \quad (3.1)$$

где  $A$  – припуск на обработку (на сторону), мм;  $l_m$  – длина пути шлифовального круга в направлении продольной подачи, мм;  $n_z$  – частота вращения заготовки (детали<sup>1</sup>), об/мин;  $S_{np}$  – продольная подача, мм/об;  $S_x$  – поперечная подача на один ход стола, мм/ход;  $n$  – число оборотов заготовки, об/мин.

Большинство деталей, в частности аэрокосмической техники, работают при высоких давлениях, температурах и знакопеременных нагрузках, поэтому к качеству обработки этих деталей, особенно на окончательных операциях, предъявляются повышенные требования. В связи с ранее сказанным, на операции круглого наружного и внутреннего шлифования должны накладываться определенные технические ограничения.

---

<sup>1</sup> В нормативной и справочной литературе по механической обработке и на практике заготовку часто именуют деталью.

### *Ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга*

Наиболее существенными факторами, влияющими на период стойкости шлифовального круга, являются его размеры, конструкция, характеристика, марка обрабатываемого материала и режимы резания. Для получения технического ограничения, связанного со стойкостью шлифовального круга при круглом наружном и внутреннем шлифовании, была использована формула, приведенная в работе [17]:

$$n_3^2 S_{np}^2 (1000 S_x)^2 \leq \frac{C_m \cdot 318000^2 B_k^2}{T_k D_3^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (3.2)$$

где  $n_3$  – частота вращения заготовки, об/мин;  $S_{np}$  – продольная подача, мм/об;  $S_x$  – поперечная подача на один ход стола, мм/ход;  $C_m$  – коэффициент, характеризующий условия, для которых определялся период стойкости шлифовального круга;  $B_k$  – высота круга, мм;  $T_k$  – период стойкости шлифовального круга, мин;  $D_3$  – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $q_m$  – показатель степени, характеризующий интенсивность влияния диаметра детали на период стойкости круга;  $k_1^T$  – коэффициент, учитывающий влияние марки обрабатываемого материала на период стойкости круга;  $k_2^T, k_3^T$  – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние размера и конструкции круга на его период стойкости.

Период стойкости шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью (прерывистых, композиционных, комбинированных) в 1,5...3 раза выше периода стойкости кругов со сплошной рабочей поверхностью [17]. Поэтому введение в формулу (3.2) коэффициента  $k_3^T$  в значительной мере повышает точность определения периода стойкости абразивных кругов, используемых при круглом шлифовании заготовок.

В неравенстве (3.2) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо  $S_x \rightarrow 1000S_x$ , с соответствующими поправками в правой части.

### ***Ограничение, связанное с мощностью станка***

При шлифовании, также как и при других видах механической обработки, проводимой на металлорежущих станках, необходимо, чтобы эффективная мощность  $N_{эф}$  не превышала мощности, подводимой к шпинделю шлифовальной бабки станка, то есть выполнялось условие

$$N_{эф} \leq N_{шп\ и\ б} , \quad (3.3)$$

где  $N_{эф}$  – эффективная мощность, кВт;  $N_{шп\ и\ б}$  – мощность, подводимая к шпинделю шлифовальной бабки станка, кВт.

Для определения эффективной мощности при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи за основу приняты формулы, приведенные в работе [13]. В уточненном и общем виде эти формулы можно представить как [17]

$$N_{эф} = C_N (\nu_s S_{np} S_x)^{0,7} D_s^{0,25} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N , \quad (3.4)$$

где  $C_N$  – коэффициент, характеризующий условия обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании, для которых была получена вышеприведенная эмпирическая зависимость;  $k_1^N, k_2^N, k_3^N$  – поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние изменения твердости шлифовального круга, марки обрабатываемого материала и конструкции круга на эффективную мощность.

Использование на операциях шлифования абразивных кругов специальных конструкций (прерывистых, композиционных, комбинированных) взамен сплошных позволяет уменьшить эффективную мощность шлифования на 20...25%.

Подставив в неравенство (3.3) формулу (3.4) и  $N_{шп шб} = N_{эд шб} \eta$ , а также учитывая, что  $v_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$ , после несложного преобразования и решения относительно  $n_3 S_{np} S_x$  второе техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n_3^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,7} \leq \frac{318000^{0,7} N_{эд шб} \eta}{C_N D_3^{0,95} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N}, \quad (3.5)$$

где  $N_{эд шб}$  – мощность электродвигателя шлифовальной бабки станка, кВт;  $\eta$  – КПД механизма шлифовальной бабки.

### ***Ограничение, связанное с точностью обработки***

Требуемая точность обработки поверхности заготовки обеспечивается условием [11]

$$\frac{P_y}{j} \leq a_n \delta_p, \quad (3.6)$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $\frac{1}{j}$  – податливость технологической системы, мм/Н;  $\delta_p$  – допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм;  $a_n$  – коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией технологической системы. Для чернового и получистового шлифования при консольном закреплении заготовки  $a_n = 0,1$ , а для чистового шлифования, соответственно,  $a_n = 0,05$ .

Для чернового, получистового и чистового шлифования, при закреплении в центрах или в патроне с поджатием центром задней бабки,  $a_n = 0,1 \dots 0,15$  [12]; для расчета по допускаемой форме допуск на форму цилиндрических поверхностей заготовок  $\delta_\phi = 0,3 \delta_p$ , при уровне относительной геометрической точности А (ГОСТ 24643-81).

Податливость технологической системы может быть определена

по формуле  $\frac{1}{j} = \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{опр}} \right)$ , тогда неравенство (3.6) примет

вид

$$P_y \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{опр}} \right) \leq a_n \delta, \quad (3.7)$$

где  $\frac{1}{j_{заг}}$ ,  $\frac{1}{j_{см}}$ ,  $\frac{1}{j_{опр}}$  – податливость соответственно заготовки, стан-

ка и оправки, на которую устанавливается круг при круглом внутреннем шлифовании (или шпинделя внутришлифовальной бабки при установке круга непосредственно на шпиндель), мм/Н.

Для расчета податливости заготовки при круглом шлифовании может использоваться та же самая зависимость, что и при точении. Причем при закреплении заготовки в патроне и в центрах значения коэффициента  $k_1^j$  для процессов точения и шлифования – одинаковы [9]. В случае закрепления заготовки в самозажимном поводковом патроне с поджатием центром задней бабки коэффициент  $k_1^j$  принимает значение, равное 140 [12].

Для расчета податливости станка могут быть использованы следующие, полученные авторами работы [17], зависимости:

– для станков с неповоротными шлифовальной и передней бабками

$$\frac{1}{j_{см}} = 0,00007292 k_2^j \sqrt[1,5]{\frac{185}{H_y}};$$

– для станков с поворотными шлифовальной и передней бабками

$$\frac{1}{j_{см}} = 0,0001429 k_2^j \sqrt[1,3]{\frac{185}{H_y}}.$$



При закреплении заготовки в центрах и в патроне с поджатием центром задней бабки станка значения коэффициента  $k_2^j$  при точении и шлифовании не отличаются, при закреплении заготовки в патроне величина  $k_2^j$  подсчитывается по той же самой формуле, что и для процесса точения.

Податливость оправки (или шпинделя внутришлифовальной бабки) рассчитывалась по формуле

$$\frac{1}{j_{опр}} = \frac{l_{опр}^3}{3J_{опр}E_{опр}},$$

где  $l_{опр}$  – длина оправки (или вылет шпинделя), мм;  $E_{опр}$  – модуль продольной упругости материала оправки (шпинделя), МПа;  $J_{опр} = 0,05d_{опр}^4$  – момент инерции поперечного сечения оправки (шпинделя), мм<sup>4</sup>.

При круглом наружном шлифовании заготовок планшайба с кругом без использования каких-либо оправок непосредственно устанавливается на шпиндель шлифовальной бабки, поэтому  $\frac{1}{j_{опр}} = 0$ .

При круглом внутреннем шлифовании поверхностей заготовок жесткость оправки, как правило, оказывается существенно ниже других компонентов технологической системы и поэтому определяет величину допустимой подачи, то есть в этом случае можно считать

$$\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} = 0.$$

При шлифовании большинства материалов различными кругами радиальная составляющая силы резания всегда больше главной составляющей, а отношение  $k_{и} = \frac{P_y}{P_z}$  чаще всего находится в интервале

от 2,2 до 3,3 [15]. Отношение сил  $\frac{P_y}{P_z}$  является наиболее стабильным силовым показателем при шлифовании, поэтому его достаточно часто используют для оценки режущей способности кругов. С

уменьшением этого отношения снижаются затраты энергии на трение и в целом на работу разрушения металла.

Главную составляющую силы резания можно определить из формулы для определения эффективной мощности при шлифовании [16]:

$$P_z = \frac{1000N_{эф}}{v_k},$$

где  $P_z$  – главная составляющая силы резания, Н;  $v_k$  – скорость круга, м/с.

Тогда формула для определения радиальной составляющей силы резания будет иметь вид

$$P_y = \frac{1000N_{эф}k_{ш}}{v_k},$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н.

Величину коэффициента  $k_{ш}$  можно рассчитать по приближенной формуле [4]

$$k_{ш} = 5 - \frac{50\rho_3^{0,7}}{v_k^{0,53}},$$

где  $\rho_3$  – радиус закругления вершины зерна, мм.

Подставив формулу для определения силы  $P_y$  в неравенство (3.7), а затем в полученное неравенство последовательно формулу (3.4) и формулу для определения скорости вращения заготовки  $v_3$ , после соответствующего преобразования и решения относительно  $n_3 S_{np} S_x$  получим третье техническое ограничение

$$\begin{aligned} n_3^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000S_x)^{0,7} &\leq \\ &\leq \frac{318000^{0,7} v_k a_n \delta_p}{1000C_N \left[ \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{онп}} \right) D_3^{0,95} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_{ш} \right]}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

### **Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности**

При круглом наружном и внутреннем шлифовании с продольной подачей среднее арифметическое отклонение профиля поверхности  $Ra$  может быть определено по формуле [17], полученной на основании анализа и обобщения имеющихся данных и собственных исследований авторов:

$$Ra = C_{Ra} \left( \frac{v_3}{60v_k} \right)^{0,5} \left( \frac{S_x}{D_k} \right)^{0,25} \left( \frac{S_{np}}{B_k} \right)^{0,5} k_{обц}^{0,5} k_{Ra} d_{зep}^{0,5} n^{m_{Ra}}, \quad (3.9)$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $C_{Ra}, m_{Ra}$  – коэффициент и показатель степени, зависящие от марки обрабатываемого материала и вида шлифования;  $D_k$  – диаметр круга, мм;  $k_{обц}$  – коэффициент, учитывающий влияние марки абразивного материала, поверхностной пористости [14] и структуры круга, а также условий его правки на формирование шероховатости поверхности; при обработке сталей и сплавов электрокорундовыми кругами твердостью МЗ...СМ2 и структурой 6...8  $k_{обц}$  можно принимать равным 0,2942, при обработке титановых сплавов кругами из карбида кремния вышеуказанной твердости и структуры  $k_{обц}$  можно принимать, соответственно, равным 0,2148;  $k_{Ra}$  – коэффициент, учитывающий влияние конструкции круга на шероховатость поверхности;  $d_{зep}$  – размер зерна, мм;  $n$  – число ходов выхаживания.

После несложного преобразования и решения формулы (3.9) относительно  $n_3 S_{np} S_x$ , учитывая, что  $v_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$ , четвертое техническое ограничение примет вид

$$n_3^{0,5} S_{np}^{0,5} (1000 S_x)^{0,25} \leq \frac{Ra (60 \cdot 1000 v_k B_k)^{0,5} (1000 D_k)^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_3 k_{обц} d_{зep})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}}. \quad (3.10)$$

### *Ограничение, связанное с температурой шлифования*

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования материалов, могут оказывать решающее влияние как на протекание самого процесса, так и на качество шлифованных поверхностей. Анализ исследований, проведенный многими авторами [7, 16, 19, 20 и др.], показывает, что физико-механическое состояние поверхностного слоя шлифованных деталей определяется не только контактной температурой, а всем пространственно-временным температурным полем. Поэтому при решении задач, связанных с определением рациональных условий обработки, наличие технического ограничения по температуре, в качестве которой в первом приближении может использоваться температура, соответствующая точке  $A_{C_1}$  – аллотропического изменения обрабатываемого материала, является обязательным, но не достаточным условием. Нахождение области рациональных условий обработки (конструкции и характеристики круга, режима резания и т.д.), исключающих возможность возникновения структурно-фазовых превращений в поверхностном слое заготовок при шлифовании, предполагает использование результатов исследования кинетики тепловых процессов и метастабильных диаграмм состояния материалов.

Исходя из вышесказанного, должно выполняться условие

$$\theta_{\max} \leq \theta_{кр}, \quad (3.11)$$

где  $\theta_{\max}$  и  $\theta_{кр}$  – соответственно максимальная и критическая температуры в зоне контакта круга с заготовкой, °С.

Максимальную температуру в зоне контакта круга с заготовкой можно определить по формуле

$$\theta_{\max} = \theta_0 + \Delta\theta_{\max}, \quad (3.12)$$

где  $\theta_0$  – начальная температура поверхности заготовки, °С;  $\Delta\theta_{\max}$  – максимальное приращение температуры поверхности заготовки в

зоне контакта за счет тепла, поступающего в заготовку при шлифовании, °С.

Подставив формулу (3.12) в неравенство (3.11), получим техническое ограничение, связанное с температурой шлифования:

$$\Delta\theta_{\max} \leq \theta_{кр} - \theta_0. \quad (3.13)$$

Максимальное приращение температуры поверхности заготовки в зоне контакта можно определить по формуле, приведенной в работе [16]:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{aL_{\kappa}}{\pi v_3}}, \quad (3.14)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $L_{\kappa}$  – длина дуги контакта круга с заготовкой (деталью), м;  $v_3$  – скорость вращения заготовки, м/с.

Независимо от используемой системы единиц физических величин (СИ или МКС) числовое значение приращения температуры одинаково, так как по размеру градус Цельсия равен градусу Кельвина.

При шлифовании заготовок плотность теплового потока может быть определена по следующей формуле:

$$q = \frac{N_{\text{эф}}}{F_{\kappa}} k_Q = \frac{N_{\text{эф}}}{L_{\kappa} \cdot B_{\kappa}} k_Q, \quad (3.15)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $N_{\text{эф}}$  – эффективная мощность, Вт;  $F_{\kappa}$  – площадь контакта круга с заготовкой, м<sup>2</sup>;  $L_{\kappa}$  – длина дуги контакта круга и заготовки, м (формулы для определения  $L_{\kappa}$  при различных видах шлифования приведены в работе

[11]);  $B_\kappa$  – высота шлифовального круга, м;  $k_Q$  – коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в заготовку.

Учитывая, что мощность резания подсчитывается по эмпирической формуле (3.4), в которой значения  $D_3, B_\kappa$  задаются в мм, то в формулах (3.14) и (3.15) значения  $L_\kappa$  и  $B_\kappa$  также целесообразно задавать в мм, введя соответствующие переводные коэффициенты. Тогда формула (3.14) после подстановки в нее формул (3.15) и (3.4) с учетом, что  $v_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{60 \cdot 1000}$ , после преобразования примет вид

$$\Delta\theta = \frac{8,729 \cdot 10^7 C_N D_3^{0,45} n_3^{0,2} S_{np}^{0,7} S_x^{0,7} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}{\lambda B_\kappa^{0,75} L_\kappa^{0,5}}, \quad (3.16)$$

где  $k_3^\theta$  – коэффициент, учитывающий влияние конструкции шлифовального круга на изменение температуры в зоне контакта круга с деталью.

При шлифовании заготовок кругами с прерывистой режущей поверхностью происходит существенное снижение максимальной температуры в зоне контакта по сравнению с температурой, имеющей место при шлифовании сплошными кругами. Это обусловлено, во-первых, уменьшением эффективной мощности, затрачиваемой на процесс резания, во-вторых, периодическим прерыванием поступающего в заготовку теплового потока и, в-третьих, отводом тепла из зоны резания смазывающе-охлаждающими элементами композиционных и комбинированных кругов благодаря их высокой теплопроводности. Как видно, в формуле (3.16) отсутствует коэффициент  $k_3^N$  (см. формулу 3.4), его влияние на снижение температуры учитывает коэффициент  $k_3^\theta$ .

Подставив формулу (3.16) в неравенство (3.13), предварительно выразив длину дуги контакта круга с заготовкой  $L_k$  для круглого наружного и внутреннего шлифования по формулам Е.Н. Маслова [11], после соответствующего преобразования и решения данного неравенства относительно  $n_3 S_{np} S_x$  получим пятое техническое ограничение

$$n_3^{0,2} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,45} \leq \frac{C_\theta (\theta_{kp} - \theta_0) \lambda B_k^{0,75} D_k^{0,25}}{D_3^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}, \quad (3.17)$$

где для круглого наружного шлифования  $C_\theta = \frac{1,2328 \cdot 10^{-6}}{(D_k + D_3)^{0,25}}$ , а для

круглого внутреннего  $C_\theta = \frac{1,1105 \cdot 10^{-6}}{(D_3 - D_k)^{0,25}}$ .

### ***Ограничения, связанные с кинематическими возможностями шлифовального станка***

При круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовки частота ее вращения, продольная и поперечная подачи должны быть ограничены, соответственно, наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя (планшайбы) передней бабки, наибольшей и наименьшей продольной и поперечной подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями выбранного станка, будут иметь вид:

– шестое техническое ограничение:

$$n_3 \geq n_{cm \min}, \quad (3.18)$$

где  $n_{cm \min}$  – минимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

– седьмое техническое ограничение:

$$n_3 \leq n_{cm \max}, \quad (3.19)$$

где  $n_{cm \max}$  – максимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

– восьмое техническое ограничение:

$$S_{np} \geq S_{np \text{ cm min}}, \quad (3.20)$$

где  $S_{np \text{ cm min}}$  – минимальная продольная подача станка, мм/об;

– девятое техническое ограничение:

$$S_{np} \leq S_{np \text{ cm max}}, \quad (3.21)$$

где  $S_{np \text{ cm max}}$  – максимальная продольная подача станка, мм/об;

– десятое техническое ограничение:

$$1000S_x \geq 1000S_{x \text{ cm min}}, \quad (3.22)$$

где  $S_{x \text{ cm min}}$  – минимальная поперечная подача станка, мм/ход;

– одиннадцатое техническое ограничение

$$1000S_x \leq 1000S_{x \text{ cm max}}, \quad (3.23)$$

где  $S_{x \text{ cm max}}$  – максимальная поперечная подача станка, мм/ход.

### ***3.4.2. Построение математической модели***

Преобразуем полученные выше неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима резания, а также целевую функцию, в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений при заданных определяющих и управляемых параметрах позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки для операций круглого наружного и внутреннего шлифования цилиндрических и конических поверхностей заготовок методом продольной подачи и гарантиро-



ванно обеспечить при этом заданное значение конструктивных параметров.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы круглого наружного и внутреннего шлифования заготовок методом продольной подачи, прологарифмируем зависимости (3.2), (3.5), (3.8), (3.10), (3.17), (3.18) – (3.23) и (3.1), которые после введения обозначений будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq b_1; \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_2; \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_3; \\ 0,5x_1 + 0,5x_2 + 0,25x_3 \leq b_4; \\ 0,2x_1 + 0,7x_2 + 0,45x_3 \leq b_5; \\ x_1 \geq b_6; \\ x_1 \leq b_7; \\ x_2 \geq b_8; \\ x_2 \leq b_9; \\ x_3 \geq b_{10}; \\ x_3 \leq b_{11}; \end{array} \right. \quad (3.24)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3.$$

где  $x_1 = \ln n_s$ ;  $x_2 = \ln S_{np}$ ;  $x_3 = \ln(1000S_x)$ ;

$$b_1 = \ln \frac{C_m \cdot 318000^2 B_\kappa^2}{T_\kappa D_3^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T; \quad b_2 = \ln \frac{318000^{0,7} N_{\text{эдшоб}} \eta}{C_N D_3^{0,95} B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N};$$

$$b_3 = \ln \frac{318000^{0,7} v_\kappa a_n \delta_p}{1000 C_N \left( \frac{1}{j_{за2}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{онп}} \right) D_3^{0,95} B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_{ш}}$$

$$b_4 = \ln \frac{Ra(60 \cdot 1000 v_{\kappa} B_{\kappa})^{0,5} (1000 D_{\kappa})^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_3 k_{обц} d_{зеп})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}}; \quad b_5 = \ln \frac{C_{\theta} (\theta_{кр} - \theta_0) \lambda B_{\kappa}^{0,75} D_{\kappa}^{0,25}}{D_3^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^{\theta}};$$

$$b_6 = \ln n_{cm \min}; \quad b_7 = \ln n_{cm \max}; \quad b_8 = \ln S_{np \text{ cm} \min};$$

$$b_9 = \ln S_{np \text{ cm} \max}; \quad b_{10} = \ln 1000 S_{x \text{ cm} \min}; \quad b_{11} = \ln 1000 S_{x \text{ cm} \max};$$

$$f_0 = \ln f_u; \quad c_0 = \ln(1000 l_{uA}).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (3.24) и линейная функция  $f_0$  представляют собой математическую модель для определения рациональных условий резания на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования цилиндрических и конических поверхностей заготовок, осуществляемых методом продольной подачи.

Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (3.24) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим  $x_1$  из ограничения-неравенства, связанного с температурой шлифования:

$$x_1 = 5b_5 - 3,5x_2 - 2,25x_3,$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (3.24). Выбор этого ограничения-неравенства обусловлен тем, что при шлифовании именно температура в зоне контакта круга с заготовкой наиболее часто является основным ограничивающим фактором, не позволяющим вести формообразование поверхностей на более производительных режимах из-за возможности образования структурных и фазовых изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных  $x_2$  и  $x_3$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} -5x_2 - 3x_3 \leq b_1 - 10b_5; \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_2 - 3,5b_5; \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_3 - 3,5b_5; \\ -1,25x_2 - 0,875x_3 \leq b_4 - 2,5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_6 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_7 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_8 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_9 - 5b_5; \\ x_2 \geq b_{10}; \\ x_2 \leq b_{11}; \\ x_3 \geq b_{12}; \\ x_3 \leq b_{13}; \end{array} \right. \quad (3.25)$$

$$f_0 = c_0 - 5b_5 + 2,5x_2 + 1,25x_3.$$

Так как в условиях конкретной задачи  $c_0 - 5b_5$  является величиной постоянной, то  $f_0$  достигнет минимального значения в том случае, когда примут минимально допустимые значения неизвестные  $x_2$  и  $x_3$ , удовлетворяющие системе ограничений (3.24).

Следует отметить, что использование данной модели для определения рациональных условий обработки конических поверхностей возможно только для случаев, когда изменение скорости вращения заготовки не превышает 15 %.

### 3.5. Программа для определения рациональных условий обработки

На основе математической модели разработана программа для определения рациональных режимов обработки на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования заготовок. В качестве средства разработки выбрана среда программирования Delphi в сочетании с СУБД Firebird. Данное решение позволяет снизить стоимость эксплуатации программы, так как Firebird является системой

управления базами данных с открытым кодом, что разрешает её бесплатное неограниченное использование. Применение этой системы обусловлено необходимостью хранения значительного количества упорядоченных данных, таких как характеристик материалов, технических характеристик станков, параметров режущего инструмента и т.д.

Программа написана для операционной системы Microsoft Windows, как наиболее распространенной в данный момент системы.

Система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс, решается на ЭВМ симплекс-методом, т.е. совместно решаются все возможные пары линейных неравенств. Каждое ограничение описывает линию на плоскости. Совместное решение системы из двух таких уравнений дает точку пересечения этих двух линий. Таким образом, получают точки всех вершин области оптимальных решений. Далее из этого множества точек удовлетворяющих всем ограничениям выбирается точка, соответствующая минимуму целевой функции.

### ***3.5.1. Описание программы***

В программе можно выделить три основных блока: ввод исходных данных для расчета, просмотр результатов расчета и его графической интерпретации, средства редактирования базы данных.

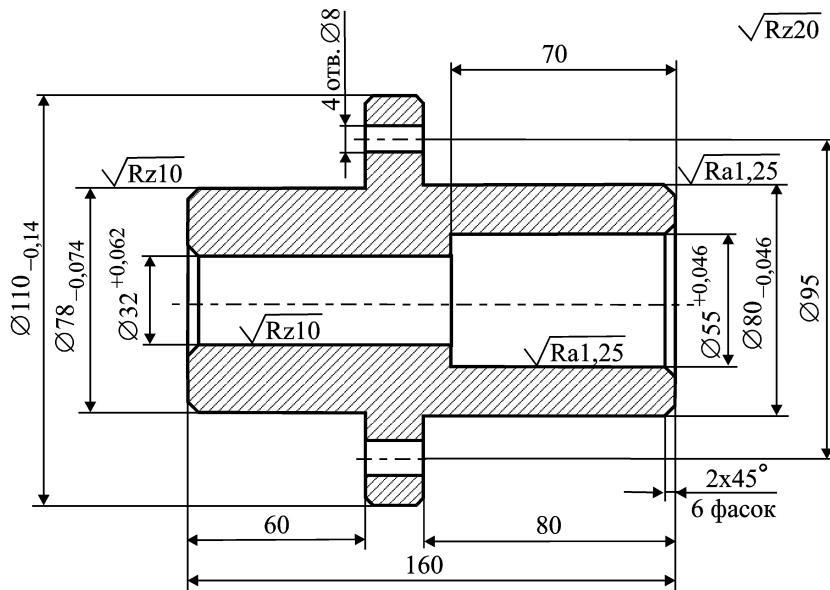
Исходные параметры разделены на три логические группы:

- параметры, относящиеся к шлифовальному станку, на котором производится обработка;
- параметры, относящиеся к абразивному кругу, который используется для выполнения операции;
- параметры, относящиеся к заготовке.

Ввод исходных данных существенно упрощён за счёт автоматической загрузки из созданной базы данных различных параметров и коэффициентов, необходимых для решения задачи. В созданную базу данных внесены параметры и коэффициенты, позволяющие определить рациональные условия резания при обработке различных сталей, а также жаропрочных и титановых сплавов.

### 3.5.2. Пример расчета режима резания

В качестве примера выполним расчет режимов резания для шлифования одной наружной и одной внутренних поверхностей втулки, выполненной из титанового сплава ВТ8, её эскиз представлен на рис. 3.1.



Неуказанные предельные отклонения размеров  $\pm \frac{IT14}{2}$

Рис. 3.1. Эскиз втулки

#### **Наружная поверхность $\varnothing 80$ мм**

После запуска программы открывается вкладка ввода исходных данных «Данные для расчета», представленная на рис.3.2.

На этой вкладке имеются окна для ввода исходных данных, определяющих характеристики станка, инструмента и заготовки.

В окне «Станок» в выпадающем списке оборудования выбираем станок, на котором будет выполняться обработка заготовки.

Станок		Данные для расчёта		Абразивный круг		Характеристики круга		Заготовка		Вид закрепления	
Модель	ЭЦЛ 3ТВ1	Н <sub>ц</sub> , мм	185	С <sub>пр</sub> ст <sub>пл</sub>	0.2	Марка абразива	Карбид кремния	Тип материала	Титановые сплавы	Тожденье	Отожненное
Н <sub>шт</sub> , мм	7.5	С <sub>пр</sub> ст <sub>ак</sub>	0.7	Геометрические параметры		К <sub>р</sub> емнистость	0.4	Состояние заготовки	В пароне	Delta, °C	600
Н <sub>ст</sub> ст <sub>п</sub> , об/мин	40	С <sub>х</sub> ст <sub>пл</sub> , мм/ход	0.0025	Т, мин	15	Твердость	М3	Delta, мм	80	Д <sub>з</sub> , мм	80
Н <sub>ст</sub> ст <sub>ак</sub> , об/мин	500	С <sub>х</sub> ст <sub>ак</sub> , мм/ход	0.05	К <sub>1Т</sub>	0.7	К <sub>2Т</sub>	1	Д <sub>з</sub> , мм	95	Д <sub>з</sub> , мм	100
Вид шлифования	Круг для наружное	Операция	Полуцифровая	К <sub>3Т</sub>	1	К <sub>З</sub> зетта	1	В <sub>з</sub> , мм	1.25	В <sub>з</sub> , мм	1.25
Круг для наружное	Внутреннее шлифование	Наружное шлифование		К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	В <sub>д</sub> , мм	0.15	В <sub>д</sub> , мм	0.15
У <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , м/с	40	У <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , м/с	50	К <sub>1Т</sub>	0.9	К <sub>2Т</sub>	0.85	delta, мм	0.046	delta, мм	0.046
Д <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	32	Д <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	600	К <sub>2Т</sub>	1	К <sub>3Т</sub>	1	ш, мм	80	ш, мм	80
В <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	25	В <sub>к</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	63	К <sub>3Т</sub>	1	К <sub>З</sub> Т	1	п	5	п	5
Д <sub>д</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	200	Д <sub>д</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	280	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	а, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	3.16E-6	а, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	3.16E-6
Л <sub>д</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	125	Л <sub>д</sub> ст <sub>ак</sub> , мм	710	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	TO	30	TO	30
Е <sub>опр</sub> , МПа	200000	Е <sub>опр</sub> , МПа	200000	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	а <sub>дс</sub>	0.1	а <sub>дс</sub>	0.1
допр, мм	20	допр, мм	20	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	С <sub>тв</sub>	600	С <sub>тв</sub>	600
допр, мм	20	допр, мм	20	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	m <sub>тв</sub>	-0.024	m <sub>тв</sub>	-0.024
допр, мм	20	допр, мм	20	К <sub>З</sub> Т	1	К <sub>З</sub> Т	1	k <sub>q</sub>	0.835	k <sub>q</sub>	0.835
Применить											

Рис. 3.2. Вкладка ввода исходных данных «Данные для расчета» при определении режима шлифования для обработки наружной поверхности Ø80 мм

В нашем случае это универсальный круглошлифовальный станок модели ЗУ131ВМ. При этом все его характеристики загружаются из базы данных автоматически. После чего выбирается вид шлифования: «Круглое наружное» или «Круглое внутреннее». В нашем случае это «Круглое наружное». Затем выбирается тип операции. Так как наружная поверхность обрабатывается по 8-му качеству точности, а шероховатость составляет  $Ra = 1,25$  мкм, то укажем тип операции – «Получистовая». Затем переходим к окну «Абразивный инструмент» данной вкладки (см. рис. 3.2).

На этой вкладке вначале задаются основные параметры круга: его конструкция, марка абразивного материала, зернистость и твердость.

Для наружной обработки втулки выберем круг со сплошной рабочей поверхностью. Круги «Прерывистый», «Композиционный» и «Комбинированный» следует выбирать в том случае, если деталь является ответственной и после обработки шлифовочные прижоги на её поверхности должны полностью отсутствовать.

Так как втулка выполнена из титанового сплава ВТ8, то для её обработки следует использовать абразивный круг из карбида кремния зелёного или чёрного, причём лучше твердостью МЗ. Использование более твердых кругов может привести к возникновению шлифовочных прижогов, снижающих сопротивление усталости деталей. Учитывая, что шероховатость наружной поверхности составляет  $Ra = 1,25$  мкм, размер абразивных зерен можно взять равным 0,40 мм. После чего указывается стойкость шлифовального круга, которая при круглом наружном шлифовании составляет 10...15 минут.

В этом же окне располагаются поправочные коэффициенты и показатели степеней, входящие в ограничения, связанные со стойкостью инструмента, мощностью станка и температурой шлифования. Данные коэффициенты загружаются из базы данных автоматически.

В последнюю очередь заполняется окно «Заготовка» (см. рис. 3.2). В этом окне из выпадающего списка выбирается тип материала, а затем его марка. В нашем случае это титановый сплав ВТ8. При этом его физико-механические характеристики из базы данных загружаются автоматически. После чего указывается состояние заготовки, которое выбирается также из выпадающего списка, например, «Отожжённое».

Обработка заготовки может производиться при закреплении её в патроне, в центрах и в патроне с поджатием центром задней бабки. В нашем случае шлифование наружной поверхности втулки  $\varnothing 80$  мм с технологической точки зрения целесообразно выполнять в патроне. Поэтому при указании вида закрепления выберем – «В патроне». После чего вводятся необходимые геометрические параметры заготовки, указанные в данном окне, а именно: наружный диаметр обрабатываемой заготовки  $D_3$ , внутренний диаметр заготовки  $d_3$ , длина шлифования  $l_{ш}$ , длина заготовки  $l_3$ , припуск на обработку на сторону  $A$ , допуск на размер обрабатываемой поверхности  $\delta_p$  и шероховатость поверхности  $Ra$ . Эти параметры берутся с чертежа детали. Затем вводится допустимая критическая температура в зоне резания ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и указывается число ходов выхаживания  $n$  (3...5).

В этом же окне располагаются поправочные коэффициенты и показатели степеней, входящие в ограничения, связанные с точностью обработки и предельно допустимой шероховатостью обработанной поверхности.

После ввода всех исходных данных и нажатия кнопки «Применить» на экране монитора компьютера появляется главное диалоговое окно программы – «Оптимизация режимов при шлифовании», представленное на рис. 3.3. В левой части данного окна расположена таблица со значениями коэффициентов системы уравнений, а в правой части расположена графическая интерпретация решения этой системы, показывающая область возможных решений.



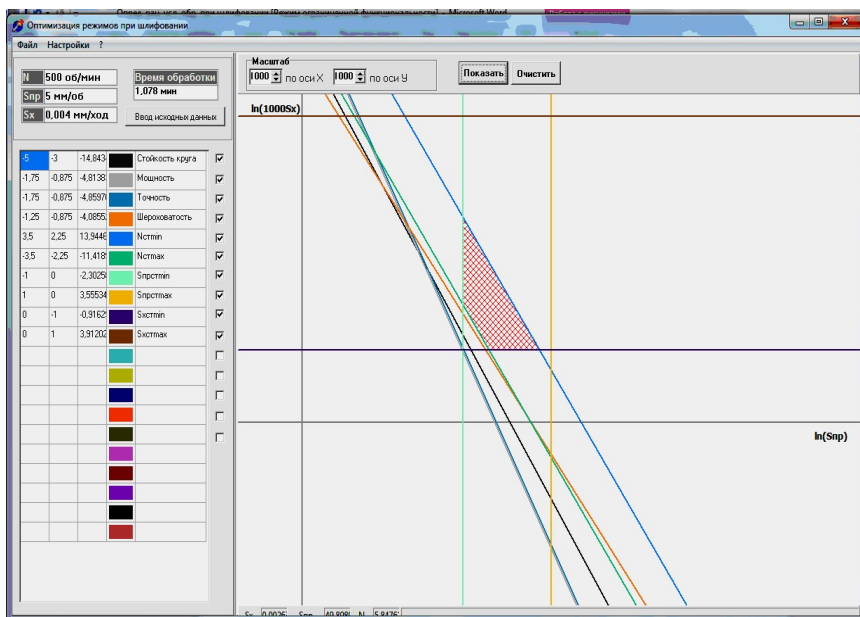


Рис. 3.3. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов при шлифовании» при определении режима резания для формообразования наружной поверхности Ø80 мм

Напротив каждой строки в таблице с коэффициентами, в диалоговом окне «Оптимизация режимов при шлифовании», написано, к какому ограничению относится данная строка, а также указан цвет, которым будет отображаться ограничивающая прямая соответствующего технического ограничения. Программа позволяет учитывать не все ограничения, а лишь те, которые необходимы. После чего строится графическая интерпретация аналитического решения в виде области возможных значений режимов, из которых выбирается оптимальное значение. Пользователю предоставлены удобные средства для просмотра графического решения (перемещение области, изменение масштаба, мерцание выделенной прямой ограничения и т.д.).

Варьируя различными параметрами в окнах «Станок», «Абразивный круг» и «Заготовка», следует получить наивыгоднейшие параметры для обработки указанной поверхности.

### ***Внутренняя поверхность Ø55 мм***

Аналогичным образом определяются рациональные условия обработки и для шлифования отверстия Ø55 мм. На рис. 3.4 и 3.5 приведены соответственно вкладка «Данные для расчета» с введенными исходными данными и главное диалоговое окно «Оптимизация режимов при шлифовании».

Также как и в предыдущем случае, варьируя различным оборудованием в окне «Станок» вкладки «Данные для расчета», а также параметрами в окнах «Абразивный круг» и «Заготовка» этой же вкладки, можно получить наивыгоднейшие условия для обработки внутренней поверхности Ø55 мм.

## **3.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки**

После назначения наивыгоднейших условий для формообразования наружной и внутренней поверхностей выполняется обработка заготовки. Процесс резания осуществляется на станке, выбранном при назначении оборудования.

Контроль геометрических параметров детали осуществляется при помощи штангенциркуля, микрометра или индикаторного нутромера в зависимости от точности выполнения размера. Контроль шероховатости поверхностей производится посредством автоматизированного профилометра-профилографа модели БВ-7669. На основании результатов измерений делается заключение о правильности выбранных условий обработки.

Данные для расчёта

Станок

Абразивный круг

Заготовка

Материал

Вид шлифования: **Круглое внутреннее**

Вид закрепления: **Отожженное**

Тип материала: **Титановые сплавы**

Состояние заготовки: **В паре**

Н<sub>ц</sub>, мм: **185**

Н<sub>ш</sub>шб, кВт: **7.5**

Н<sub>ст</sub>пл, об/мин: **40**

Н<sub>ст</sub>стак, об/мин: **500**

С<sub>пр</sub>стпл, мм/ход: **0.2**

С<sub>пр</sub>стак, мм/ход: **0.7**

С<sub>х</sub>стпл, мм/ход: **0.0025**

С<sub>х</sub>стак, мм/ход: **0.05**

Т, мин: **10**

Поправочные коэффициенты

К1Т: **0.7**    К1N: **0.9**

К2Т: **1**    К2N: **0.85**

К3Т: **1**    К3N: **1**

КЗ<sub>Э</sub>л<sub>Э</sub>: **1**

Вид шлифования: **Круглое шлифование**

У<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, м/с: **40**

Д<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **32**

В<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **25**

Д<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **200**

Л<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **125**

Е<sub>спр</sub>, МПа: **200000**

ф<sub>опр</sub>, мм: **20**

л<sub>опр</sub>, мм: **80**

У<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, м/с: **50**

Д<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **600**

В<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **63**

Д<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **280**

Л<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **710**

Характеристики круга

Марка абразива: **Карбид кремния**

Зернистость: **0.4**

Твердость: **М3**

Конструкция круга

Площью

Геометрические параметры

В<sub>к</sub>, мм: **25**

Д<sub>к</sub>, мм: **32**

Т, мин: **10**

Поправочные коэффициенты

К1Т: **0.7**    К1N: **0.9**

К2Т: **1**    К2N: **0.85**

К3Т: **1**    К3N: **1**

КЗ<sub>Э</sub>л<sub>Э</sub>: **1**

Материал

Тип материала: **Титановые сплавы**

Марка: **BT8**

Темп\_кр, °C: **600**

Д<sub>з</sub>, мм: **80**

ф<sub>з</sub>, мм: **55**

ф<sub>в</sub>, мм: **100**

Р<sub>в</sub>, мм: **1.25**

А, мм: **0.15**

delta, мм: **0.046**

л<sub>ш</sub>, мм: **70**

п: **5**

σ<sub>вс</sub>: **0.1**

σ<sub>ра</sub>: **475**

μ<sub>га</sub>: **-0.012**

kg: **0.885**

Операция

Получистова

У<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, м/с: **50**

Д<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **600**

В<sub>к</sub>т<sub>в</sub>, мм: **63**

Д<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **280**

Л<sub>д</sub>т<sub>в</sub>, мм: **710**

Е<sub>спр</sub>, МПа: **200000**

ф<sub>опр</sub>, мм: **20**

л<sub>опр</sub>, мм: **80**

Применить

Рис. 3.4. Вкладка ввода исходных данных «Данные для расчета» при определении режима шлифования для обработки внутренней поверхности Ø55 мм

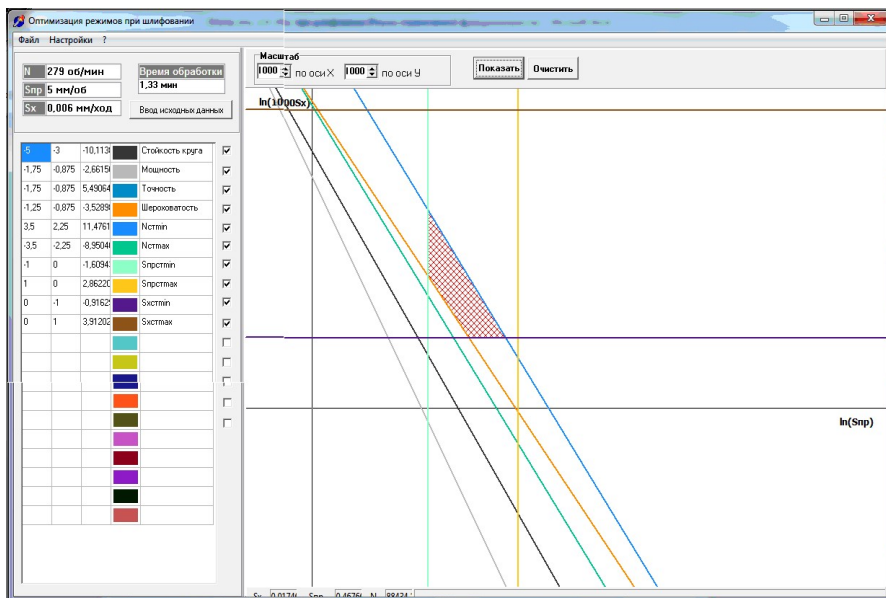


Рис. 3.5. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов при шлифовании» при определении режима резания для формообразования внутренней поверхности  $\varnothing 55$  мм

### 3.7. Содержание отчета

В процессе выполнения работы оформляется отчет, бланк которого приведен в приложении 3.

В отчете приводятся:

- рабочий чертеж изготавливаемой детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наивыгоднейшие условия формообразования;
- общие виды вкладки «Данные для расчета» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов при шлифовании» при определении рациональных условий обработки для операций круглого наружного и внутреннего шлифования указанных поверхностей;
- результаты измерения геометрических параметров обработанных поверхностей; ответ на индивидуальное задание и выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить, что представляет собой математическая модель для определения рациональных условий обработки?
2. Что называется целевой функцией?
3. Что понимается под техническими ограничениями?
4. В каком случае задача по определению рациональных условий обработки может быть приведена к задаче линейного программирования?
5. Каким методом может быть решена задача линейного программирования?
6. Какие исходные данные могут варьироваться при определении рациональных условий обработки?
7. Как графически выглядит область рациональных условий обработки?

## **4. Лабораторная работа №4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИИ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ЗАГОТОВОК**

### **4.1. Цель и задачи работы**

**Цель работы** – получение практических навыков и закрепление теоретических знаний в области определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания заготовок.

**Задачи:**

- ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания заготовок;
- ознакомиться с методикой и программой расчёта режимов алмазного выглаживания поверхностей;
- приобрести практические навыки определения рациональных условий обработки для операций алмазного выглаживания.

### **4.2. Последовательность выполнения работы**

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторной работы.
2. Изучить методические указания по выполнению данной работы.
3. Ознакомиться с математической моделью для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания цилиндрических поверхностей заготовок.
4. Ознакомиться с методикой и программой расчёта режимов алмазного выглаживания.
5. Определить наивыгоднейшие условия обработки для поверхностей заготовки, указанных в индивидуальном задании.

6. Провести обработку заготовки и оценить заданные параметры качества поверхности.

7. Оформить отчет по работе.

### **4.3. Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений, применяемые в работе**

#### **Программное обеспечение:**

– авторская программа для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания заготовок.

#### **Металлорежущее оборудование:**

– токарно-винторезные станки.

#### **Выглаживающие инструменты:**

– инденторы из натурального алмаза;

– инденторы из синтетического алмаза.

#### **Средства измерений:**

– штангенциркуль, гладкие микрометры для измерения диаметров и линейных размеров заготовки;

– тахометр для определения числа оборотов заготовки;

– автоматизированный профилометр-профилограф модели БВ-7669, для контроля шероховатости обработанных поверхностей.

### **4.4. Математическая модель для определения рациональных условий обработки на операции алмазного выглаживания заготовок**

Для решения задачи научно обоснованного определения рациональных условий обработки цилиндрических поверхностей на операциях алмазного выглаживания, в том числе при производстве различных деталей аэрокосмической техники, необходимо выбрать целевую функцию, технические ограничения и на их базе разработать математическую модель, позволяющую получить рациональные режимы обработки при различных сочетаниях управляемых параметров процесса выглаживания.

В настоящей лабораторной работе представлена линейная математическая модель, позволяющая осуществить оптимизацию в де-

терминированной постановке, при которой действие возмущающих параметров (колебания прижимного усилия, изменение прочностных характеристик материалов заготовки по её длине и т.д.) во внимание не принимается. Задача по определению рациональных условий обработки в данном случае сводится к задаче линейного программирования.

#### ***4.4.1. Выбор целевой функции и технических ограничений***

Чаще всего при определении рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания, то есть вида и марки алмаза, радиуса алмазной сферы, режима обработки, смазывающего средства и т.д., в качестве целевой функции принимается себестоимость операции. При этом переменная доля себестоимости операции при выглаживании одним инструментом также как и при других видах обработки определяется по формуле

$$C = t_0 E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где  $t_0$  – основное технологическое (машинное) время, мин;  $E$  – себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.;  $t_c$  – время, затрачиваемое на снятие изношенного инструмента и установку нового или восстановленного, а также подналадку станка, мин;  $\mathcal{E}_u$  – затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за период его стойкости, руб.;  $Q$  – количество деталей, обработанных за период стойкости, шт.

При правильном построении производственного процесса определение рациональных условий обработки на операции алмазного выглаживания должно основываться на экономическом периоде стойкости инструмента. При использовании в расчетах экономических периодов стойкости режимы выглаживания, обеспечивающие наименьшее время обработки, будут одновременно и наиболее экономичными [6]. Поэтому в качестве целевой функции при процессе



алмазного выглаживания заготовок целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из выше изложенного, уравнение целевой функции будет иметь следующий вид:

$$f_m = 100 \frac{i \cdot l_m}{100 S_0 n}, \quad (4.1)$$

где  $i$  – число проходов инструмента;  $l_m$  – длина пути инструмента в направлении подачи, мм;  $S_0$  – подача, мм/об;  $n$  – частота вращения заготовки, об/мин.

В целевой функции (4.1) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо  $S_0 \rightarrow 100 S_0$ , с соответствующими поправками в правой части уравнения.

Большинство деталей аэрокосмической техники работают при высоких давлениях, температурах и в условиях знакопеременных нагрузок, вследствие чего к качеству обработки этих деталей, особенно на окончательных операциях, предъявляются повышенные требования. В связи с вышеизложенным, на операции алмазного выглаживания, являющиеся, как правило, финишными, должны накладываться определенные технические ограничения.

### ***Ограничение, связанное со стойкостью выглаживающего инструмента***

Скорость обработки при выглаживании, определяется из условия полного использования свойств инструмента на основании неравенства:

$$v \leq \frac{C'_v k_m}{T^{m_v} Ra_{исх}^{n_v} P_y^{x_v}}, \quad (4.2)$$

где  $v$  – скорость выглаживания, м/мин;  $C'_v$  – коэффициент, характеризующий условия обработки, для которых разрабатывались нормативные материалы;  $k_m$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение реальных условий обработки относительно тех, при

которых определялся коэффициент  $C'_v$ ;  $T$  – заданная стойкость выглаживателя, равная 600 ... 1800 мин (10...30 часам);  $Ra_{исх}$  – исходное значение шероховатости поверхности, мкм;  $P_y$  – сила выглаживания (радиальная сила), Н;  $n_v, m_v, x_v$  – показатели степени, характеризующие влияние  $T, Ra_{исх}, P_y$  на скорость выглаживания.

Подставив значение  $v$ , определяемое по формуле  $v = \frac{\pi D n}{1000}$ , в неравенство (4.2) получим первое техническое ограничение:

$$n P_y^{x_v} \leq \frac{1000 C'_v k_m}{\pi D T^{m_v} Ra_{исх}^{n_v}}, \quad (4.3)$$

где  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

### ***Ограничение, связанное с точностью обработки***

В процессе выглаживания обрабатываемый размер уменьшается на величину [18]:

$$\Delta d = \frac{4}{3} (Rz_{исх} - Rz),$$

где  $Rz$  – значение шероховатости поверхности после выглаживания, мкм.

При этом погрешность на диаметральный размер обрабатываемой поверхности не должна превышать допуск, вследствие чего необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{4}{3} C_{Rz} (Ra_{исх} - Ra) \leq k_3 \delta, \quad (4.4)$$

где  $C_{Rz}$  – коэффициент перевода параметра шероховатости из  $Ra$  в  $Rz$ ,  $C_{Rz} = 4...5$ ;  $Ra_{исх}$  и  $Ra$  – соответственно исходное и полученное значения шероховатости, мкм;  $k_3$  – коэффициент, показывающий в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией обработки;  $\delta$  – допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм.

Преобразовав неравенство (4.4), путем подстановки в него выражения, описывающего шероховатость поверхности при выглаживании  $Ra = C_S S_0^y P_y^x Ra_{ucx}^n R^m \nu^z$ , и решив относительно  $n, S_0, P_y$ , получим второе техническое ограничение:

$$n^z (100S_0)^y P_y^x \geq \frac{100^y \cdot 318^z \cdot (C_{Rz} Ra - 0,75k_3 \delta)}{C_S C_{Rz} D^z Ra_{ucx}^n R^m}. \quad (4.5)$$

***Ограничение, связанное с предельно допускаемой шероховатостью обработанной поверхности***

Шероховатость обработанной поверхности зависит от силы выглаживания, радиуса инструмента, скорости и подачи выглаживания, а также значения исходной шероховатости:

$$C_S S_0^y P_y^x Ra_{ucx}^n R^m \nu^z \leq Ra, \quad (4.6)$$

где  $C_S$  – коэффициент, определяющий конкретные условия выглаживания;  $R$  – радиус инструмента, мм;  $n, m, x, y, z$  – показатели степени, характеризующие влияние  $Ra_{ucx}, R, P_y, S_0, \nu$  на параметр шероховатости  $Ra$ .

Произведя необходимые преобразования, получим третье техническое ограничение:

$$n^z (100S_0)^y P_y^x \leq \frac{100^y \cdot 318^z \cdot Ra}{C_S D^z Ra_{ucx}^n R^m}. \quad (4.7)$$

***Ограничение, связанное с температурой обработки***

При алмазном выглаживании температура в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки, а также скорости нагрева и охлаждения поверхности могут быть достаточными для того, чтобы в поверхностном слое произошли структурные и фазовые превращения. Кроме того, практически у всех металлов и сплавов при температуре более 550...600°C резко возрастает адгези-

онное взаимодействие с алмазом, вследствие чего происходит катастрофический износ инструмента. Поэтому необходимо, чтобы температура в зоне резания не превышала критических значений, то есть должно выполняться условие:

$$\theta \leq \theta_{кр}, \quad (4.8)$$

где  $\theta$  – температура в зоне резания, °С;  $\theta_{кр}$  – критическая температура в зоне обработки, °С.

Подставив значение  $\theta$ , определяемое по зависимости  $\theta = C_{\theta} S_0^{y_{\theta}} P_y^{x_{\theta}} R^{m_{\theta}} \nu^{z_{\theta}}$ , в уравнение (4.8) и произведя необходимые преобразования, получим четвертое техническое ограничение:

$$n^{z_{\theta}} (100 S_0)^{y_{\theta}} P_y^{x_{\theta}} \leq \frac{\theta_{кр} \cdot 318^{z_{\theta}} \cdot 100^{y_{\theta}}}{C_{\theta} D^{z_{\theta}} R^{m_{\theta}}}, \quad (4.9)$$

где  $C_{\theta}$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне обработки;  $x_{\theta}, y_{\theta}, z_{\theta}, m_{\theta}$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $P_y, S_0, \nu, R$  на величину температуры.

### ***Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка***

При выглаживании частота вращения обрабатываемой заготовки или инструмента и подача должны быть ограничены, соответственно, наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя и наибольшей и наименьшей подачами, которые могут быть установлены на станке. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

– пятое техническое ограничение:

$$n \geq n_{cm \min}, \quad (4.10)$$

где  $n_{cm \min}$  – минимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– шестое техническое ограничение:

$$n \leq n_{cm \max}, \quad (4.11)$$

где  $n_{cm \max}$  – максимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

– седьмое техническое ограничение:

$$100S_0 \geq 100S_{cm \min}, \quad (4.12)$$

где  $S_{cm \min}$  – минимальная продольная подача станка, мм/об;

– восьмое техническое ограничение:

$$100S_0 \leq 100S_{cm \max}, \quad (4.13)$$

где  $S_{cm \max}$  – максимальная продольная подача станка, мм/об.

### ***Ограничения, обусловленные требованиями выглаживания***

Значение радиальной силы должно соответствовать требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности, а именно: условию смятия исходных микронеровностей при сглаживающем или условию упрочения при упрочняющем выглаживании. Величина силы выглаживания определяется в соответствии с формулой

$$P_y = \pi \cdot \varepsilon \cdot HV \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2,$$

в которой, относительное внедрение инструмента определяется

$$\varepsilon = \frac{h}{R} = \frac{k_i \cdot Rz_{ucx}}{R}.$$

Технические ограничения, обусловленные требованиями выглаживания, будут иметь вид:

$$P_y \geq \pi \cdot HV \cdot \frac{k_1 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2; \quad (4.14)$$

$$P_y \leq \pi \cdot HV \cdot \frac{k_2 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2, \quad (4.15)$$

где для сглаживающего режима  $k_1 = 0,7$ ,  $k_2 = 1,0$ , а для упрочняющего –  $k_1 = 1,1$ ,  $k_2 = 1,3$ ,  $HV$  – твердость обрабатываемого материала по Викерсу.

### ***Ограничение, обусловленное требованиями к величине остаточных напряжений***

Величина составляющей окружных остаточных напряжений  $\sigma_o^* = \sigma_o - \mu\sigma_\tau$  не должна быть меньше требуемой величины сжимающих остаточных напряжений

$$\sigma_{o \min}^* \leq \sigma_o^*; \quad (4.16)$$

Подставив значение  $\sigma_o^*$ , определяемое по зависимости  $\sigma_o^* = C_\sigma S_o^{y_\sigma} P_y^{x_\sigma} R^{m_\sigma} v^{z_\sigma}$ , в уравнение (4.16) и произведя необходимые преобразования, получим одиннадцатое техническое ограничение:

$$n^{z_\sigma} (100S_o)^{y_\sigma} P_y^{x_\sigma} \geq \frac{100^{y_\sigma} \cdot 318^{z_\sigma} \cdot \sigma_{o \min}^*}{C_\sigma D^{z_\sigma} R_{c\phi}^{m_\sigma}} \quad (4.17)$$

где  $C_\sigma$  – коэффициент, отражающий влияние условий обработки на величину окружной составляющей остаточных напряжений;  $x_\sigma, y_\sigma, z_\sigma, m_\sigma$  – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно  $P_y, S_o, v, R$  на величину окружных остаточных напряжений.

#### ***4.4.2. Построение математической модели***

Преобразуем полученные выше неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима выглаживания, а также целевую функцию в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений при заданных определяющих и управляемых параметрах позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки для операций алмазного выглаживания.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы алмазного выглаживания, прологарифмируем зависимости (4.3), (4.5), (4.7),

(4.9)-(4.15), (4.17) и (4.1), которые после введения обозначений будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_\nu x_3 \leq b_1; \\ zx_1 + yx_2 + xx_3 \geq b_2; \\ zx_1 + yx_2 + xx_3 \leq b_3; \\ z_\theta x_1 + y_\theta x_2 + x_\theta x_3 \leq b_4; \\ x_1 \geq b_5; \\ x_1 \leq b_6; \\ x_2 \geq b_7; \\ x_2 \leq b_8; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}; \\ z_\sigma x_1 + y_\sigma x_2 + x_\sigma x_3 \geq b_{11}. \end{array} \right. \quad (4.18)$$

$$f_{m0} = c_0 - x_1 - x_2$$

где  $x_1 = \ln n$ ;  $x_2 = \ln(100S)$ ;  $x_3 = \ln P_y$ ;

$$b_1 = \ln \left( \frac{1000 C'_\nu k_m}{\pi T^{m_\nu} Ra_{ucx}^{n_\nu} D} \right);$$

$$b_2 = \ln \left( \frac{100^y \cdot 318^z \cdot (C_{Rz} Ra - 0,75 k_3 \delta)}{C_S C_{Rz} D^z Ra_{ucx}^n R^m} \right);$$

$$b_3 = \ln \left( \frac{100^y \cdot 318^z \cdot Ra}{C_S D^z Ra_{ucx}^n R^m} \right);$$

$$b_4 = \ln \left( \frac{\theta_{kp} \cdot 318^{z_\theta} \cdot 100^{y_\theta}}{C_\theta D^{z_\theta} R^{m_\theta}} \right);$$

$$b_5 = \ln(n_{\min});$$

$$b_6 = \ln(n_{\max});$$

$$b_7 = \ln(100S_{\min});$$

$$b_8 = \ln(100S_{\max});$$

$$b_9 = \ln\left(\pi \cdot HV \cdot \frac{k_1 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R}\right)^2\right);$$

$$b_{10} = \ln\left(\pi \cdot HV \cdot \frac{k_2 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R}\right)^2\right);$$

$$b_{11} = \ln\left(\frac{100^{j_\sigma} \cdot 318^{z_\sigma} \cdot \sigma_{o \min}^*}{C_\sigma \cdot D^{z_\sigma} \cdot R_{c\phi}^{m_\sigma}}\right)$$

$$f_{m0} = \ln f_m;$$

$$c_0 = \ln(100 \cdot i \cdot l_m).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (4.18) и линейная функция  $f_0$  представляют собой математическую модель для определения рациональных условий при алмазном выглаживании заготовок.

Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (4.18) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим  $x_3$  из ограничения-неравенства, связанного с температурой обработки:

$$x_3 = \frac{b_4 - z_\theta x_1 - y_\theta x_2}{x_\theta}$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (4.18). В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных,  $x_1$  и  $x_2$ :



$$\left\{ \begin{array}{lll}
 \left( \frac{x_\theta}{x} - z_\theta \right) x_1 & - y_\theta x_2 & \leq b_1 \frac{x_\theta}{x_\nu} - b_4; \\
 \left( z \frac{x_\theta}{x} - z_\theta \right) x_1 & + \left( y \frac{x_\theta}{x} - y_\theta \right) x_2 & \geq b_2 \frac{x_\theta}{x} - b_4; \\
 \left( z \frac{x_\theta}{x} - z_\theta \right) x_1 & + \left( y \frac{x_\theta}{x} - y_\theta \right) x_2 & \leq b_3 \frac{x_\theta}{x} - b_4; \\
 x_1 & & \geq b_5; \\
 x_1 & & \leq b_6; \\
 & x_2 & \geq b_7; \\
 & x_2 & \leq b_8; \\
 z_\theta x_1 & + y_\theta x_2 & \geq b_4 - b_9 x_\theta; \\
 z_\theta x_1 & + y_\theta x_2 & \leq b_4 - b_{10} x_\theta; \\
 \left( z_\sigma \frac{x_\theta}{x_\sigma} - z_\theta \right) x_1 & + \left( y_\sigma \frac{x_\theta}{x_\sigma} - y_\theta \right) x_2 & \geq b_3 \frac{x_\theta}{x_\sigma} - b_4;
 \end{array} \right. \quad (4.19)$$

На основании полученной математической модели созданы алгоритм и программа расчета для определения рациональных условий обработки на операции алмазного выглаживания.

#### **4.5. Программа для определения рациональных условий обработки**

На основе математической модели разработана программа для определения рациональных режимов обработки на операции алмазного выглаживания заготовок. В качестве средства разработки выбрана среда программирования Delphi.

Программа написана для операционной системы Microsoft Windows, как наиболее распространенной в данный момент системы.

Система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс, решается на ЭВМ симплекс-методом, о котором уже было сказано в предыдущих лабораторных работах.

#### 4.5.1. Описание программы

В программе можно выделить два основных блока: ввод исходных данных для расчета, просмотр результатов расчета и его графической интерпретации.

Исходные параметры разделены на три логические группы:

- параметры, относящиеся к станку, на котором производится обработка;
- параметры, относящиеся к выглаживающему инструменту;
- параметры, относящиеся к обрабатываемой заготовке.

Ввод исходных данных осуществляется путём выбора соответствующих данных зашитых в программе расчёта и данных вводимых с клавиатуры.

#### 4.5.2. Пример расчета режима резания

В качестве примера выполним расчёт режимов обработки выглаживанием наружной поверхности вала, изготовленного из жаропрочной деформируемой стали 15X12H2MVФAB-III, эскиз которого представлен на рис. 4.1.

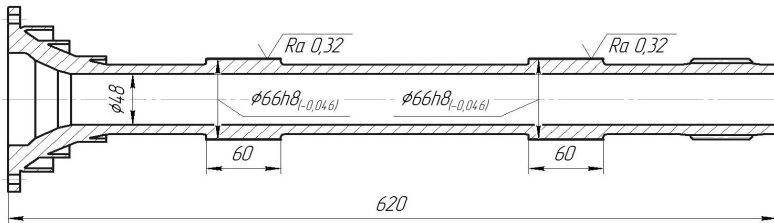


Рис. 4.1. Эскиз вала

#### **Обрабатываемая поверхность вала $\phi 66$ мм**

После запуска программы открывается вкладка ввода исходных данных «Исходные данные», представленная на рис. 4.2.

На этой вкладке имеются окна для ввода исходных данных, определяющих характеристики станка, заготовки и инструмента.

Исходные данные

Станок / Инструмент / Заготовка    Остальные коэффициенты

---

**Станок**

1B616 (№280) 1970г.

р. мин	16.5
р. макс	1600
S. мин	0.02
S. макс	0.46

**Качественные показатели**

ОН. МПа 550

---

**Алмазный наконечник**

АСБ-1

2.0 мм

Прижимное усилие

Режим выглаживания  
 Сглаживание  
 Упрочнение

193.683f < Ру < 228.898f

Расчет

200    Принять

---

**Обрабатываемый материал**

ЭП517-Ш (15X12H2МВФАБ-Ш)

Твердость HV	3650
Шероховатость Ra мск	1.63
Шероховатость Ra	0.32
Длина заготовки	80
Диаметр заготовки	66

Квалитет точности IT8

Таблица значений допусков

Число инструментальных проходов 1


 Применить

Рис. 4.2. Вкладка ввода исходных данных «Исходные данные» при определении режима алмазного выглаживания

В окне «Станок» в выпадающем списке оборудования выбираем станок, на котором будет обрабатываться заготовка. В нашем случае это токарно-винторезный станок модели 16А616. При этом все его технические характеристики автоматически загрузятся.

В окне «Алмазный наконечник» из выпадающего списка выбирается тип инструмента, а затем его радиус. В нашем случае это алмазный наконечник из синтетического алмаза марки АСБ-1, с радиусом рабочей части 2,0 мм.

В окне «Обрабатываемый материал» выбирается обрабатываемый материал – сталь 15Х12Н2МВФАБ-Ш, вручную вводятся значения исходной и требуемой шероховатости, длина зоны обработки и её диаметр. Из выпадающего списка выбирается качество точности, установленный на получаемую поверхность, выбирается число инструментальных проходов.

В окне «Прижимное усилие» осуществляется расчёт диапазона прижимного усилия, после чего вручную вводится значение усилия находящегося в указанном диапазоне.

После ввода всех исходных данных и нажатия кнопки «Применить» на экране монитора компьютера появляется главное диалоговое окно «Оптимизация режимов выглаживания» программы, представленное на рис. 4.3. В левой части данного окна расположена таблица со значениями коэффициентов системы уравнений, а в правой части расположена графическая интерпретация решения этой системы, показывающая область возможных решений. Напротив каждой строки в таблице написано к какому ограничению относится данная строка, а также указан цвет, которым будет отображаться ограничивающая прямая соответствующего технического ограничения. Программа позволяет учитывать не все ограничения, а лишь те, которые необходимы. После чего строится графическая интерпретация аналитического решения в виде области возможных значений

режимов, из которых выбирается оптимальное значение. Пользователю предоставлены удобные средства для просмотра графического решения (перемещение области, изменение масштаба, мерцание выделенной прямой ограничения и т.д.).

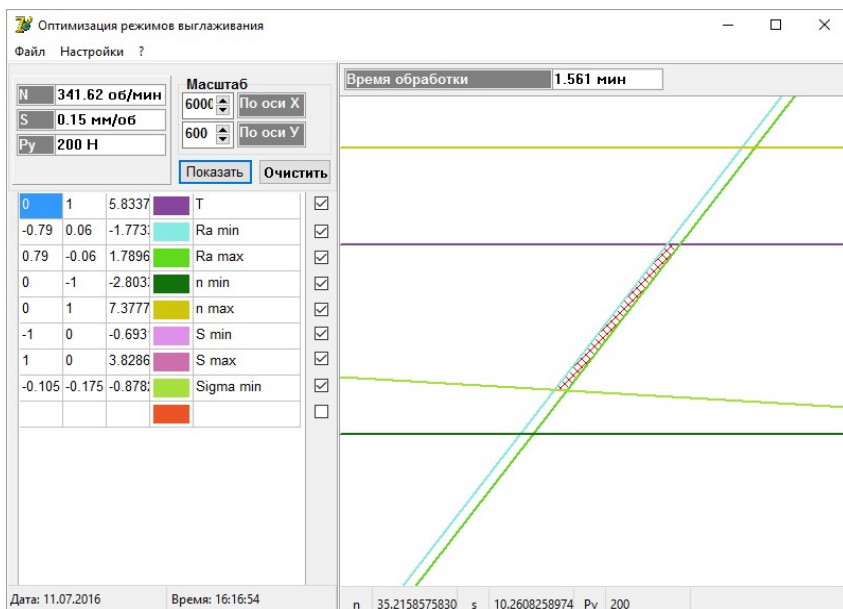


Рис. 4.3. Главное диалоговое окно «Оптимизация режимов выглаживания» при определении режима обработки наружной поверхности вала  $\varnothing 66$  мм

Графический метод дает наглядное представление о влиянии технических ограничений на режимы обработки и позволяет проанализировать за счет чего в данном конкретном случае возможно увеличение производительности процесса обработки алмазным выглаживанием.

Из области допустимых режимов обработки выбирается режим, обеспечивающий максимум целевой функции, то есть минимальное время обработки. Частота вращения шпинделя выбирается из переч-

ня допустимых частот для выбранного станка. Результаты расчета представлены в левой верхней части диалогового окна.

Варьируя различным оборудованием в окне «Станок» вкладки «Данные для расчета», а также параметрами в окнах «Алмазный наконечник», «Прижимное усилие» и «Обрабатываемый материал» этой же вкладки, можно получить наиболее выгодные условия для обработки указанной поверхности.

#### **4.6. Экспериментальная проверка выбранных условий обработки**

После назначения наиболее выгодных условий выглаживания наружной поверхности выполняется обработка заготовки. Процесс алмазного выглаживания осуществляется на станке, выбранном при назначении оборудования.

Контроль геометрических размеров наружной поверхности детали осуществляется при помощи штангенциркуля или микрометра в зависимости от точности выполнения размера. Контроль шероховатости поверхностей производится посредством автоматизированного профилометра-профилографа модели БВ-7669. На основании результатов измерений делается заключение о правильности выбранных условий обработки.

#### **4.7. Содержание отчета**

В процессе выполнения работы оформляется отчет. В отчете приводятся: эскиз изготавливаемой детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наиболее выгодные условия выглаживания; общие виды вкладки «Исходные данные» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов выглаживания»; результаты измерения геометрических параметров обработанных поверхностей; ответ на индивидуальное задание и выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить, что представляет собой математическая модель для определения рациональных условий обработки?
2. Что называется целевой функцией?
3. Что понимается под техническими ограничениями?
4. В каком случае задача по определению рациональных условий обработки может быть приведена к задаче линейного программирования?
5. Каким методом может быть решена задача линейного программирования?
6. Какие исходные данные могут варьироваться при определении рациональных условий обработки при алмазном выглаживании?
7. Как графически выглядит область рациональных условий обработки?
8. Какие параметры качества поверхности должны быть обеспечены при алмазном выглаживании?
9. Какие упрочняющие методы обработки используются в машиностроительном производстве?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в каталогах по режущему инструменту как отечественных, так и зарубежных режимы резания являются ориентировочными. Это обусловлено тем, что рекомендуемые режимы не привязаны к конкретному материалу и не учитывают технические требования на операции. Математические модели, используемые в лабораторных работах данного практикума и реализованные в программах расчета, позволяют определить рациональные условия обработки для конкретной поверхности заготовки при обеспечении наибольшей производительности и требований к геометрии, микрогеометрии и структурному состоянию материала.

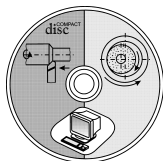
Эти модели могут быть использованы как при курсовом и дипломном проектировании, так и при проектировании реальных технологических процессов изготовления деталей. Следует также отметить, что эти модели применимы к универсальному оборудованию и оборудованию с ЧПУ.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / А.Н. Резников [и др.]; под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Баранчиков, В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов [Текст]: справочник / В.И. Баранчиков [и др.]; Под общ. ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
4. Богомолов. Н.И. Исследование прочности абразивных зёрен в процессе микрорезания / Н.И. Богомолов // Заводская лаборатория, 1966. – №3. – С. 353-354.
5. Волков, А.Н. Режимы резания авиационных материалов при фрезеровании [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Волков. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1994. – 90 с.
6. Горанский, Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин [Текст] / Г.К. Горанский. – Минск: Госиздательство БССР, 1963. – 192 с.
7. Евсеев, Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 128 с.
8. Кравченко Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов [Текст] / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. – 132 с.
9. Лепилин, В.И. Режимы резания авиационных материалов при точении [Текст]: учеб. пособие / Лепилин В.И. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2000. – 128 с.
10. Локтев, А.Д. Общемашиностроительные нормативы режимов резания [Текст]: справочник: в 2-х т.: Т. 1 / А.Д. Локтев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
11. Маслов, Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
12. Носов, Н.В. Технологические основы проектирования абразивных инструментов / Н.В. Носов, Б.А. Кравченко. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 257 с.

13. Ординарцев, И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев [и др.]; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
14. Островский, В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
15. Попов, С.А. Шлифовальные работы / С.А. Попов. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 1999. – 383 с.
16. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
17. Скуратов, Д.Л. Определение рациональных условий обработки при производстве деталей ГТД / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. – 154 с.
18. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
19. Урывский, Ф.П. Влияние параметров термического цикла на формирование свойств поверхностного слоя при шлифовании титановых сплавов и закаленных сталей / Ф.П. Урывский // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: межвуз. сб. – Куйбышев, 1981. – С. 71-78.
20. Ящерицын, П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Ерёменко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.



Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

**ОТЧЕТ**

по лабораторной работе «**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ  
УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ ТОЧЕНИЯ  
И РАСТАЧИВАНИЯ ЗАГОТОВОК**»

*Цель работы:*

1. Эскиз детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наивыгоднейшие условия формообразования

2. Общие виды вкладки «Данные для расчета» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов резания» при определении рациональных условий обработки:

а) наружной поверхности

б) внутренней поверхности

### 3. Результаты измерения параметров обработанных поверхностей

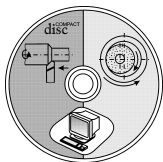
Наружная поверхность			
Диаметр, мм		Шероховатость $Rz$ , мкм	
по эскизу	измеренный	по эскизу	измеренная

Внутренняя поверхность			
Диаметр, мм		Шероховатость $Rz$ , мкм	
по эскизу	измеренный	по эскизу	измеренная

### 4. Индивидуальное задание

### 5. Выводы по работе

Преподаватель \_\_\_\_\_



Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

### **ОТЧЕТ**

по лабораторной работе «**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ КОНЦЕВОГО ФРЕРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК**»

*Цель работы:*

1. Чертеж детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наивыгоднейшие условия формообразования

2. Общие виды вкладки «Данные для расчета» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов резания» при концевом фрезеровании плоской поверхности:

а) первой плоской поверхности

б) второй плоской поверхности

### 3. Результаты измерения параметров обработанных поверхностей

Первая плоская поверхность							
Линейные размеры, мм				Шероховатость $Rz$ , мкм			
по чертежу		измеренные		по чертежу		измеренная	

Вторая плоская поверхность							
Линейные размеры, мм				Шероховатость $Rz$ , мкм			
по чертежу		измеренные		по чертежу		измеренная	

### 4. Индивидуальное задание

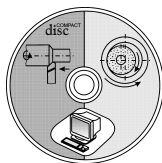
### 5. Выводы по работе

Преподаватель \_\_\_\_\_



Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_



**ОТЧЕТ**

по лабораторной работе **«ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО И ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК»**

*Цель работы:*

1. Чертеж детали с выделением поверхностей, для обработки которых определяются наивыгоднейшие условия формообразования

2. Общие виды вкладки «Данные для расчета» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов при шлифовании» при определении рациональных условий обработки:

а) наружной поверхности

б) внутренней поверхности

### 3. Результаты измерения параметров обработанных поверхностей

Наружная поверхность			
Диаметр, мм		Шероховатость $Rz$ , мкм	
по чертежу	измеренный	по чертежу	измеренная

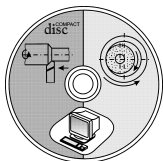
Внутренняя поверхность			
Диаметр, мм		Шероховатость $Rz$ , мкм	
по чертежу	измеренный	по чертежу	измеренная

### 4. Индивидуальное задание

### 5. Выводы по работе

Преподаватель \_\_\_\_\_

*Кафедра  
технологий производства  
двигателей*



## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

### ОТЧЕТ

по лабораторной работе «**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ЗАГОТОВОК**»

*Цель работы:*

1. Эскиз детали с выделением поверхностей, для которых определяются наивыгоднейшие условия обработки

2. Общие виды вкладки «Исходные данные» и главного диалогового окна «Оптимизация режимов выглаживания»

3. Результаты измерения параметров обработанных поверхностей

Диаметр, мм		Шероховатость $Ra$ , мкм	
по эскизу	измеренный	по эскизу	измеренная

4. Индивидуальное задание

## 5. Выводы по работе

Преподаватель \_\_\_\_\_

Учебное издание

*Скуратов Дмитрий Леонидович,  
Швецов Алексей Николаевич*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ  
НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Практикум*

Редактор И.И. Спиридонова  
Компьютерная верстка И.И. Спиридоновой

Подписано в печать 22.07.2019. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 7,0.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 32(Р1П)/2019.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

