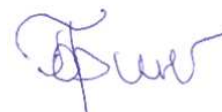


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**На правах рукописи**



**ФИНАГЕЕВ ПАВЕЛ РАМДИСОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК  
ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки (технические науки)**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Унянин Александр Николаевич

Ульяновск, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ПУТИ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ ЗА СЧЁТ НАЗНАЧЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Методы и методики определения режима точения .....	10
1.2. Управление процессом механической обработки .....	16
1.2.1. Причины, вызывающие отклонения назначенного режима от оптимального.....	16
1.2.2. Управление процессом по результатам мониторинга входных, выходных и текущих параметров.....	22
1.2.3. Управление процессом обработки с использованием систем с элементами искусственного интеллекта.....	27
1.2.4. Алгоритмы и методики коррекции режима резания .....	30
1.3. Анализ зависимостей для расчета выходных параметров процесса точения.....	38
1.4. Анализ известных моделей расчета температуры резания .....	42
1.5. Методы моделирования ограничений производительности точения.....	45
1.6. Выводы. Цель и задачи исследования.....	48
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ.....	51
2.1. Модель процесса механической обработки .....	51
2.2. Разработка плана варьирования управляемыми параметрами для различных вариантов соотношения между фактическими и заданными значениями выходных параметров .....	56
2.2.1. Коррекция режима резания при положительных значениях резервов.....	56
2.2.2. Коррекция режима резания при отрицательных значениях резервов .....	66
2.2.3. Коррекция режима резания при значениях резервов, равных или близких к нулю .....	69
2.3. Методика коррекции режима резания, учитывающая изменение параметров процесса обработки с увеличением времени наработки инструмента.....	72
2.4. Выводы.....	84
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ .....	85

3.1. Выбор контролируемых выходных параметров процесса точения при коррекции режима резания.....	85
3.2. Математическое моделирование выходных и текущих параметров процесса точения.....	86
3.2.1. Погрешность размера детали.....	86
3.2.2. Микрогеометрия обработанной поверхности.....	95
3.2.3. Износ режущего инструмента .....	99
3.3. Разработка математических моделей и программного обеспечения для расчета температур, возникающих при точении. Численное моделирование температур.....	101
3.3.1. Разработка математических моделей для расчета температур .....	101
3.3.2. Численное моделирование температур .....	111
3.4. Статистический анализ параметров процесса механической обработки..	119
3.4. Выводы.....	123
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА ТОЧЕНИЯ .....	125
4.1. Разработка программного обеспечения для назначения режима точения	125
4.1.1. Разработка программного обеспечения для назначения режима точения в условиях неопределенности технологической информации .....	125
4.1.2. Разработка программного обеспечения для назначения режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса резания с течением времени .....	134
4.2. Методика экспериментальных исследований.....	144
4.2.1. Показатели эффективности процесса точения.....	144
4.2.2. Средства технологического оснащения .....	145
4.2.3. Методы и средства измерения контролируемых параметров.....	145
4.2.4. Условия и порядок проведения экспериментов.....	146
4.2.5. Метрологическая оценка средства измерения шероховатости обработанной поверхности .....	148
4.2.6. Определение числа параллельных экспериментов.....	149
4.2.7. Состав опытов.....	151
4.3. Исследование эффективности функционирования разработанной методики и программного обеспечения при коррекции режима точения.....	151

4.3.1. Исследование эффективности методики коррекции режима течения при малой наработке инструмента .....	151
4.3.2. Исследование эффективности методики коррекции режима течения, учитывающей зависимость параметров обработки от времени .....	155
4.4. Техничко-экономическая эффективность .....	168
4.5. Выводы .....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	172
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ .....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	178
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	195

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Одной из актуальных задач является определение режима механической обработки, который существенно влияет на производительность, качество и стоимость изготовления деталей. Поэтому задача определения рационального режима резания является актуальной.

Рациональным методом назначения элементов режима обработки является их расчёт с использованием моделей и зависимостей для определения выходных параметров процесса. Однако математические модели, позволяющие рассчитать выходные параметры в зависимости от входных, не всегда обеспечивают корректные результаты. Многие из них не учитывают наличие ряда управляемых и неуправляемых факторов. Во многих случаях отсутствуют сведения для выбора параметров математических моделей, таких как коэффициенты трения в зонах контакта инструмента со стружкой и заготовкой. Многие модели получены на основе эмпирических данных и показывают достоверные результаты только в тех условиях, в которых они были получены.

Не все зависимости и модели учитывают, что параметры процесса механической обработки изменяются во времени. Известные методики назначения режима резания рассматривают процесс обработки заготовок резанием как стационарный процесс. Однако, такие факторы, как износ режущего инструмента, силы резания и температура, физико-механические свойства материалов заготовки и инструмента, шероховатость, точность размеров изменяются с увеличением времени работы инструмента. На выходные параметры процесса оказывают влияние неуправляемые факторы, такие как колебания припуска и механических свойств материала заготовки, переменная жёсткость технологической системы и др.

Отсутствие корректных математических моделей и исходных данных для определения выходных параметров в зависимости от условий обработки,

действие в ходе обработки неуправляемых факторов приводят к неопределённости информации. Эта неопределённость является причиной значительного расхождения между расчётными значениями выходных параметров и их действительными (фактическими) значениями, которое составляет в некоторых случаях 20 ... 30% и более [98]. В результате, режим резания, полученный посредством расчетов, может оказаться далёким от оптимального, и поэтому на этапе отладки технологического процесса необходима коррекция назначенного режима. Поэтому возникает необходимость в разработке методики коррекции режима резания, учитывающей, что изменение каждого из управляемых факторов отражается на изменении практически всех выходных параметров процесса обработки.

В качестве исследуемого метода обработки выбран процесс точения. Обработка заготовок точением по трудоемкости занимает 30% от общей трудоемкости механической обработки [60]. Современные токарные станки с ЧПУ обеспечивают точность размеров до 6-го качества и шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$ , равную 0,80 мкм [24, 56].

#### **Степень разработанности.**

Данной тематике посвящены работы Анцева А.В., Ардашева Д.В., Балакшина Б.С., Безъязычного В.Ф., Бобыря М.В., Завгороднего В.И., Ивченко Т.Г., Иноземцева А.Н., Зориктуева В.Ц., Кабалдина Ю.Г., Карплюк А.Ф., Медведева В.В., Петрешина Д.И., Полтавца В.В., Плотникова А.Л., Руденко А.С., Сулова А.Г., Унянина А.Н., Чигиринского Ю.Л., Юркевича В.В., Abburi N.R., Alaskari A., Ali S.M., Dhar N.R., Bernardos P.G., Dixit U.S., Karpat Y., Koren Y., Oraby S.E., Ozel T., Prasad B.S., Ulsoy A.G.

Отсутствуют методики коррекции режима процесса резания с изменяющимися параметрами и учитывающие, что изменение каждого из управляемых факторов отражается на изменении практически всех выходных параметров процесса.

**Цель исследования** заключается в разработке методик коррекции

режима механической обработки в условиях неопределённости технологической информации, позволяющих повысить производительность операций механической обработки при обеспечении требуемого качества деталей.

В ходе выполнения данной работы предполагается решить следующие **задачи**:

1. Разработать методики коррекции режима течения при различных соотношениях заданных и фактических значений выходных параметров и план варьирования управляемыми параметрами (факторами), используемый для приближения управляемых факторов к оптимальному уровню и для активного изучения процесса с целью коррекции математических моделей.

2. Разработать математические зависимости и модели для расчёта выходных параметров и текущих показателей процесса течения и полей их рассеивания.

3. Разработать методику определения изменяющихся во времени выходных параметров и текущих показателей процесса течения.

4. Разработать модели, алгоритмы и программное обеспечение для коррекции назначенного режима течения.

5. Оценить эффективность разработанных методик коррекции режима на основе анализа результатов их функционирования в лабораторных и производственных условиях.

#### **Научная новизна работы.**

1. Методика коррекции режима резания при различных соотношениях заданных и фактических значений выходных параметров, включающая план варьирования управляемыми параметрами с целью адаптации (коррекции) моделей процесса и приближения управляемых параметров к оптимальному значению.

2. Математические модели и зависимости для расчёта тангенциальной составляющей силы резания, температурного поля, шероховатости обработанной поверхности и полей их рассеивания и расчета погрешности

диаметрального размера детали. Модели учитывают изменение механических и теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента в зависимости от температуры в зоне обработки.

3. Методика определения взаимосвязанных текущих и выходных параметров процесса обработки, позволяющая рассчитать их значения в зависимости от времени наработки инструмента.

4. Результаты численного моделирования параметров процесса течения, в том числе исследование влияния изменения предела текучести материала заготовки на рассеивание контактных температур и тангенциальной составляющей силы резания.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методики коррекции режима при различных соотношениях заданных и фактических значений выходных параметров, в том числе с учётом изменения текущих и выходных параметров процесса во времени.

2. Методика определения изменяющихся во времени параметров процесса на основе разработки алгоритма его функционирования.

3. Модели и зависимости для расчёта параметров процесса течения и полей их рассеивания: температурного поля, шероховатости обработанной поверхности и погрешности диаметрального размера детали.

4. Результаты численного моделирования тангенциальной составляющей силы резания и температур на передней и задней поверхностях инструмента.

5. Результаты экспериментальных исследований эффективности разработанных методик коррекции режима течения.

**Методы исследования.** В работе использованы современные методы исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории резания, теории упругости, теории автоматического управления, математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены с применением современного технологического и вычислительного оборудования. При обработке экспериментальных данных



применялись методы статистической обработки результатов.

### **Практическая значимость.**

1. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для коррекции режима течения (свидетельства на регистрацию программных продуктов: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669693 Российская Федерация. Коррекция режима течения; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669706 Российская Федерация. Коррекция режима течения в условиях неопределенности технологической информации).

2. Разработано программное обеспечение для расчёта контактных температур при тчении (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610980 Российская Федерация. Расчет температуры резания при тчении с наложением вибраций).

3. Результаты экспериментальных исследований и опытно-промышленного испытания эффективности разработанных методик коррекции режима показали, что их применение позволяет повысить производительность процесса тчения на 25 – 35 % при обеспечении заданного качества деталей.

**Достоверность полученных результатов** диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования, аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных, применением статистических методов обработки результатов и сопоставлением полученных результатов с работами других авторов.

**Публикации.** По диссертационным исследованиям опубликовано 24 научные работы, в числе которых 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 статьи в изданиях, индексируемых в системе Scopus. Зарегистрировано 3 программы для ЭВМ.

# ГЛАВА 1. ПУТИ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ ЗА СЧЕТ НАЗНАЧЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Методы и методики определения режима точения

Одной из важнейших задач, решаемых при разработке технологических процессов (ТП) металлообработки, является определение рациональных режимов резания. Режим резания (глубина резания  $t_r$ , подача  $S_{об}$  и скорость резания  $V$ ) оказывает влияние на производительность обработки, качество и стоимость изготовленных деталей.

Для определения режима точения используют следующие методы: табличный, расчётный (аналитический), графоаналитический.

При использовании табличного метода ориентируются на нормативы режимов резания. Исходными данными являются физико-механические характеристики заготовки, припуск на обработку, материал режущей части инструмента и конструктивно-геометрические параметры самого инструмента. Определение режима резания табличным методом происходит в следующей последовательности [75]:

1. Сначала определяется глубина резания.
2. Затем осуществляется расчёт подач:
  - а)  $S_{шер}$  – подача, обеспечивающую требуемую шероховатость обработанной поверхности;
  - б)  $S_{жест}$  – учитывающая жёсткость обрабатываемой заготовки;
  - в)  $S_{пр.р}$  – допускаемая прочностью режущего инструмента.

В качестве технологически допустимой  $S_T$  выбирается минимальная подача из рассчитанных  $S_{шер}$ ,  $S_{жест}$ ,  $S_{пр.р}$ . После этого проводят коррекцию подачи исходя из технологических возможностей станка.

3. Выбирают скорость резания  $V$  и рассчитывают частоту вращения заготовки  $n$ .

4. На основе значений  $n$  и  $S_T$  определяют эффективную мощность, затрачиваемую на резание  $N_{рез}$ , и необходимую мощность электродвигателя станка:

$$N_{дв} = N_{рез} / \eta_{ст}, \quad (1)$$

где  $N_{дв}$  – мощность, потребляемая электродвигателем станка для выполнения данной операции (перехода), кВт;  $\eta_{ст}$  – коэффициент полезного действия (КПД) механизма главного привода станка (данные, как правило, приводятся в паспорте станка), значение коэффициента можно принять  $\eta_{ст} = 0,7 \dots 0,9$  [75].

В.И. Баранчиков в работах [6, 72] для выбора подачи  $S_{об}$  и скорости резания  $V$  использовал иной подход:

1) в зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  и радиуса при вершине резца  $r$  выбирается табличное значение подачи  $S_T$ . Затем подача  $S_{об}$  окончательно рассчитывается по зависимости [72]:

$$S_{об} = S_T \cdot K_S, \quad (2)$$

где  $K_S$  – поправочный коэффициент:

$$K_S = K_{S_{п}} \cdot K_{S_{и}} \cdot K_{S_{ф}} \cdot K_{S_{з}} \cdot K_{S_{ж}} \cdot K_{S_{м}}, \quad (3)$$

где  $K_{S_{п}}$  – коэффициент, характеризующий состояние обрабатываемой поверхности;  $K_{S_{и}}$  – коэффициент, учитывающий влияние материала режущей части резца;  $K_{S_{ф}}$  – коэффициент, учитывающий форму обрабатываемой поверхности;  $K_{S_{з}}$  – коэффициент, учитывающий наличие термообработки;  $K_{S_{ж}}$  – коэффициент, отражающий влияние жёсткость технологической системы;  $K_{S_{м}}$  – коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

2) Затем в зависимости от рассчитанного значения  $S_{об}$  и выбранной глубины резания  $t_r$  определяют значение скорости резания  $V_T$ . Затем скорость резания  $V$  окончательно рассчитывается по зависимости [72]:

$$V = V_T \cdot K_V, \quad (4)$$

где  $K_V$  – поправочный коэффициент:

$$K_V = K_{V_{м}} \cdot K_{V_{и}} \cdot K_{V_{ф}} \cdot K_{V_{т}} \cdot K_{V_{ж}} \cdot K_{V_{п}} \cdot K_{V_{сож}}, \quad (5)$$

где  $K_{V_{м}}$  – коэффициент обрабатываемости материала;  $K_{V_{и}}$  – коэффициент,

учитывающий влияние материала режущей части резца;  $K_{V\varphi}$  – коэффициент, характеризующий влияние угла в плане  $\varphi$ ;  $K_{V_T}$  – коэффициент, учитывающий вид обработки;  $K_{V_{ж}}$  – коэффициент, учитывающий жёсткость технологической системы;  $K_{V_{п}}$  – коэффициент, отражающий состояние обрабатываемой поверхности;  $K_{V_{сож}}$  – коэффициент, учитывающий влияние смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Остальные пункты алгоритма расчёта режима резания аналогичны вышеизложенному.

Этот метод назначения режима резания является весьма трудоёмким, так как требует анализа обширного объёма информации. Важно учесть, что все элементы режима взаимосвязаны и изменение одного из них автоматически приведёт к изменению других, что существенно затрудняет процесс назначения режима резания. Кроме того, разрабатываются и находят применение новые инструментальные материалы, сведения о технологических возможностях которых ограничены или отсутствуют.

При расчётном методе этапы определения режима точения аналогичны табличному методу, но имеют ряд следующих особенностей [23, 75, 89]:

1. Определение глубины резания  $t_r$ .
2. Назначение величины подачи  $S_{об}$ .

В работе [75] предложена следующая последовательность расчёта подачи  $S_{об}$ :

а) расчёт подачи  $S_{шер}$ , которая обеспечивает заданную величину шероховатости [75]:

$$S_{шер} \leq \frac{k_0 \cdot Ra^{k_1} \cdot V^{k_2} \cdot r^{k_3} \cdot HB^{k_4}}{t_r^{k_5} \cdot \varphi^{k_6} \cdot \varphi_1^{k_7}}, \quad (6)$$

где  $k_0, k_1, \dots, k_7$  – поправочные коэффициенты;  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $r$  – радиус при вершине резца, мм;  $t_r$  – глубина резания, мм;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане, град.;  $HB$  – твёрдость материала заготовки.

б) находят подачу, допускаемую прочностью режущего инструмента [75]:

$$S_{\text{пр.п}} \leq x_{P_z} \sqrt{\frac{B^2 \cdot H \cdot [\sigma_{\text{и}}]}{6 \cdot c_{P_z} \cdot l_p \cdot t_r^{y_{P_z}}}} \quad (7)$$

где  $B$  – ширина державки резца, мм;  $H$  – высота державки резца, мм;  $[\sigma_{\text{и}}]$  – допускаемое напряжение на изгиб материала державки резца, МПа;  $l_p$  – вылет резца из резцедержки, мм;  $c_{P_z}, y_{P_z}$  – эмпирические коэффициенты.

в) находят подачу, допускаемую жёсткостью заготовки:

$$S_{\text{жест}} \leq x_{P_z} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot J \cdot E \cdot f'}{1,1 \cdot c_{P_z} \cdot l_1^3 \cdot t_r^{y_{P_z}}}} \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент жёсткости (выбирается в зависимости от способа установки заготовки на станке);  $J$  – момент инерции сечения заготовки, мм<sup>4</sup>;  $E$  – модуль упругости материала заготовки, МПа;  $f'$  – допустимый прогиб заготовки при обработке, мм;  $l_d$  – вылет заготовки из токарного патрона (при закреплении её консольно), либо расстояние между точками закрепления заготовки, мм.

Из подач, рассчитанных по зависимостям (6) – (8), принимают минимальную.

В работе [23] для предварительного выбора подачи предложено следующее соотношение:

$$5 < \frac{t_r}{S_{\text{об}}} < 10. \quad (9)$$

В зависимости от требований к качеству и производительности обработки данное соотношение, может незначительно изменяться.

3. Задают период стойкости режущего инструмента (РИ)  $\tau_c$  по справочным данным в зависимости от условий обработки.

4. Определяют скорость резания  $V$  и составляющие силы резания (тангенциальную  $P_z$ , радиальную  $P_y$ ) по эмпирическим зависимостям.

5. Выбирают модель станка.

Этот метод расчёта режима резания находит применение, когда отсутствуют ограничения в выборе модели станка.

Определение режима резания графоаналитическим методом реализуется в следующей последовательности:

1. Определение количества проходов и глубины резания.
2. Выбор подходящего инструментального материала и определение конструктивно-геометрических параметров РИ.
3. Для определения технологической подачи рассчитываются лимитирующие подачи по соответствующим зависимостям, и минимальную из них выбирают в качестве технологической  $S_T$ .
4. На последнем этапе приступают к построению графика «линия станка-линия инструмента».

Линии строят в двойной логарифмической сетке, где частоту вращения детали  $n$  и подачу  $S_{об}$  откладывают по осям абсцисс и ординат соответственно. Значения подач получают путем решения следующих уравнений [75]:

$$S_{ст} = \frac{A'}{n^{\frac{1}{x_{Pz}}}} \text{ и } S_{реж} = \frac{B'}{n^p}, \quad (10)$$

где  $A'$ ,  $B'$ ,  $x_{Pz}$ ,  $p$  – эмпирические коэффициенты;  $S_{ст}$  – подача станка, при которой будет полностью использована мощность станка, мм/об;  $S_{реж}$  – подача, обеспечивающая заданный период стойкости инструмента  $\tau_c$ , мм/об;  $N_{дв}$  – мощность двигателя станка, кВт;  $D$  – максимальный диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

Наиболее эффективным режимом является тот, который соответствует точке пересечения прямых  $MN$  и  $KL$  (рис. 1).

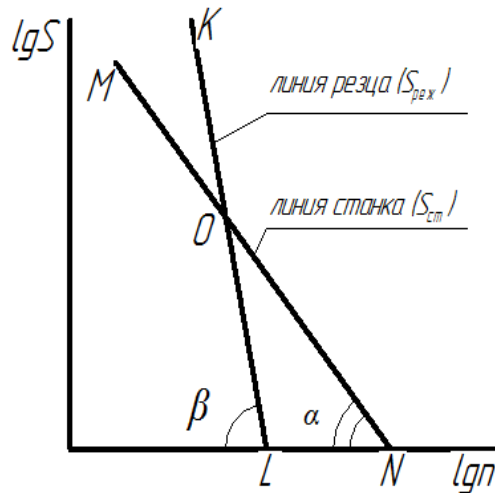


Рисунок 1 – График «линия станка-линия реза» [75]

Недостатком графоаналитического метода назначения режима резания является трудоёмкость расчётов при построении графика, что затрудняет его использование в производстве, особенно в условиях многономенклатурного производства.

Широко известен метод ускоренного определения оптимального режима резания, предложенный А.Д. Макаровым, на основе положения постоянства оптимальной температуры резания и способ назначения режима обработки по номограммам [50]. Однако, данный метод не нашёл широкого применения в производстве, в силу его трудоёмкости и больших временных затрат на подбор оптимальных значений скорости резания  $V$  и подачи  $S_{об}$ .

Наиболее эффективным из перечисленных выше методов является расчётный метод, основанный на использовании аналитических и эмпирических зависимостей. Однако, данные зависимости не учитывают влияние на выходные параметры многих входных и текущих параметров процесса, например износа инструмента, температур в зоне обработки и температурных деформаций элементов технологической системы, влияние СОЖ и других параметров. Во многих случаях отсутствуют необходимые данные для расчёта, которые используются для выбора параметров математических моделей, например, коэффициента трения в зоне контакта

инструмента с заготовкой, параметров механических и теплофизических значений инструментального и обрабатываемого материалов и др. Кроме того, в процессе обработки действует ряд неуправляемых факторов (колебание припусков и механических свойств материала заготовки).

Все вышеперечисленные методы рассматривают процесс резания как стационарный и не учитывают изменение параметров процесса в зависимости от времени работы инструмента. Поэтому назначенный режим обработки не будет рациональным, поскольку расчётные значения выходных и текущих параметров процесса резания могут существенно отличаться от фактических значений.

Для определения рационального режима обработки необходимо разработать методику, которая учитывает нестационарность процесса резания, а также предусматривает возможность коррекции элементов режима резания на основе текущей информации о выходных параметрах, компенсируя разницу между фактическим и расчётным значениями выходного параметра. Причины появления подобной ситуации приведены в п. 1.2.1.

## **1.2. Управление процессом механической обработки**

### **1.2.1. Причины, вызывающие отклонения назначенного режима от оптимального**

На точность обработки в процессе точения влияют различные факторы: геометрическая погрешность станка, износ резца, жёсткость технологической системы, её температурные деформации, стабильность механических свойств материала заготовки и припуска на механическую обработку.

Во время точения, когда резец контактирует с обрабатываемой поверхностью и стружкой, его рабочие поверхности подвергаются трению, что приводит к износу. Этот процесс не только изменяет размер детали (рис. 2), но и оказывает влияние на качество обработки.



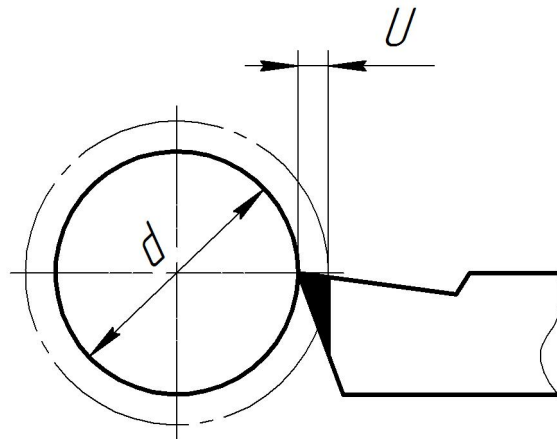


Рисунок 2 – Погрешность от износа инструмента

Процесс износа резца описывается кривой износа. Расчёт износа РИ в период нормального износа производят по следующей зависимости [50]:

$$U = (U_0 \cdot L)/1000, \quad (11)$$

где  $U_0$  – интенсивность изнашивания РИ, мкм/км;  $L$  – путь резания, м.

При точении путь резания  $L$  [50]:

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{1000 \cdot S_{об}}, \quad (12)$$

где  $D$  – диаметр заготовки, мм;  $l$  – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $S_{об}$  – подача, мм/об.

Для упрощения расчётов с целью учёта начального износа инструмента, принято расчётную величину  $L$ , увеличивать на некоторую дополнительную величину  $L_{доп}$ . В этом случае выражение (11) принимает следующий вид [53]:

$$U = \frac{U_0 \cdot (L + L_{доп})}{1000}. \quad (13)$$

В процессе обработки заготовки на станке в зоне обработки и в зонах трения в соединениях станка появляется теплота, которая вызывает температурные деформации элементов технологической системы: инструмента, заготовки, деталей станка. При точении наибольшие отклонения, вызванные температурными деформациями технологической системы, являются результатом удлинения резцов при их нагреве (удлинение может достигать

30...50 мкм) [50, 91].

Часть теплоты, образовавшейся в зоне резания, переходит в заготовку, вызывая при этом изменение её размеров и появление погрешности обработки.

При равномерном нагреве заготовки возникает погрешность размеров, а при местных нагревах её отдельных участков – коробление, приводящее к образованию погрешности формы. Температура обрабатываемой заготовки зависит от режима резания.

В ходе реализации процесса резания возникает сила, которая действует со стороны режущего инструмента на заготовку, установочные элементы приспособления и элементы станка. Через резец и суппорт она действует на другие элементы станка. При резании образуется замкнутая упругая технологическая система, которая подвергается воздействию силы резания. Это вызывает упругую деформацию всех элементов технологической системы, что является одной из причин появления погрешности обработки. Величина упругих деформаций пропорциональна силе резания: чем больше сила резания, тем больше упругие деформации. Дополнительные погрешности формы и размеров могут возникнуть, если на различных участках поверхности детали имеются разные значения припуска на обработку. Такая ситуация вызвана тем, что на участках с большим припуском возникает большая сила резания, поэтому упругая деформация элементов технологической системы при обработке таких участков увеличивается.

Кроме того, погрешности формы могут возникать из-за нестабильности физико-механических свойств материала заготовки таких как пределы прочности и текучести. На участках с более высокими значениями этих характеристик величина упругих деформаций увеличивается из-за роста силы резания.

Составляющая силы резания  $P_z$ , появляющаяся при обработке, вызывает смещение вершины резца из точки  $A$  в точку  $C$  (рис. 3). Из треугольника  $ABC$

видно, что увеличивается радиус заготовки вала  $\Delta r$  по сравнению с заданным значением, установленным при настройке станка:

$$\Delta r = BC = AC \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (14)$$

где  $AC = \Delta z$  – величина прогиба резца, мм;  $\phi$  – угол, который может быть определён по зависимости:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot \Delta z}{D}, \quad (15)$$

где  $D$  – диаметр заготовки, мм.

Увеличение диаметра за счёт прогиба резца:

$$\Delta D = \frac{4 \cdot \Delta z^2}{D}. \quad (16)$$

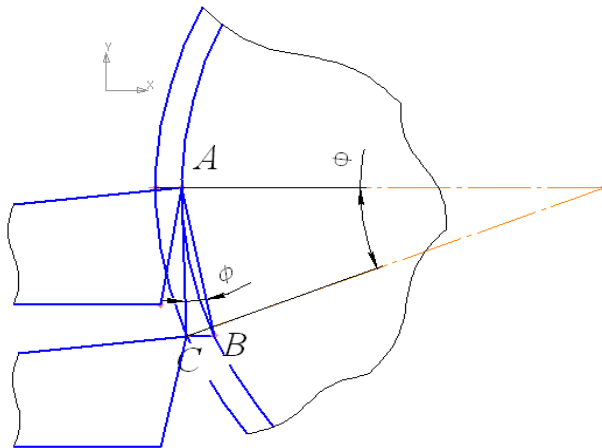


Рисунок 3 – Схема, поясняющая изменения диаметра вала за счёт деформации (прогиба) резца

Величина упругой деформации, возникающей под действием силы резания, представляет собой сумму деформаций технологической системы  $z$ ,  $y$  и  $x$  в направлении действия составляющих силы резания. Влияние этих деформаций на точность диаметрального размера различна. Деформация в направлении  $x$  всегда равна нулю, деформация в направлении  $z$  незначительна и проявляется только при точении. Приращение диаметра  $\Delta D$  (рис. 4) значительно меньше деформации  $z$ . Приращение размера, т. е. погрешность, возникающая в связи с деформацией  $y$ , равно величине данной деформации (при точении приращение диаметра равно  $2y$ ). Деформации  $y$  направлена

перпендикулярно к обработанной поверхности, а деформации  $x$  и  $z$  — касательно к ней. Таким образом, наибольшее влияние на точность обработки оказывает упругая деформация  $y$ . Следовательно, под жёсткостью технологической системы понимается в первую очередь её жёсткость в радиальном направлении. Если сила, действующая в этом направлении, равна  $P_y$ , а упругая деформация  $y$ , то жесткость  $j$  в этом направлении будет равна:

$$j = \frac{P_y}{y}. \quad (17)$$

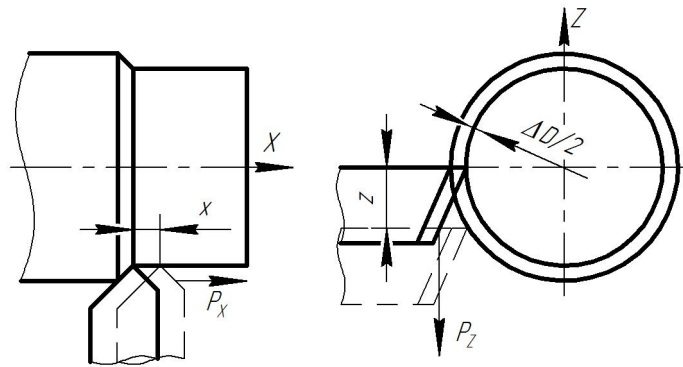


Рисунок 4 – Влияние на точность обработки упругих деформаций  $x$  и  $z$  [37]

Соответственно, чем выше жёсткость технологической системы, тем меньше её деформации и связанные с ними погрешности обработки.

Причинами отклонения режима обработки от оптимального являются, в частности, такие факторы, как колебания физико-механических свойств материала обрабатываемой заготовки и припуска.

Колебания припуска существенно влияют на нестабильность составляющей силы резания  $P_y$ . Это, в свою очередь, вызывает колебания величины упругих деформаций  $\Delta u$  и непосредственно влияет на высотные параметры шероховатости и точность размера детали. Колебания твердости обрабатываемого материала оказывают влияние на величину пластических деформаций в зоне контакта инструмента и заготовки и величину параметра  $Ra$  шероховатости обработанной поверхности.

Основными причинами, вызывающими отклонение назначенного режима

от оптимального значения, являются следующие:

1. Изменение во времени выходных параметров вследствие изменения неуправляемых факторов, например физико-механических свойств материала заготовок и стойкость инструмента в различных партиях.

Колебание стойкости инструмента из одной партии составляет 15...35% [52]. Интенсивности изнашивания режущих инструментов даже одной партии имеют различные значения [64]. Это обусловлено колебаниями физико-механических свойств материалов инструмента и заготовки, припуска и другими факторами.

Колебания предела прочности и текучести материала заготовок оказывают непосредственное влияние на силу и температуру в зоне резания, а они, в свою очередь, на выходные параметры качества (шероховатость, остаточные напряжения, точность размеров), интенсивность изнашивания РИ.

2. Некорректность математических зависимостей и моделей. Вследствие этого после расчета режима с использованием этих зависимостей не выполняются технические ограничения. Если фактическое значение выходного параметра превысит заданное, то необходимо скорректировать управляемые факторы, чтобы избежать появления брака. В обратном случае необходима коррекция с целью повышения производительности.

3. Отсутствие и неоднозначность исходных данных для определения режима резания. Исходные данные, необходимые для расчётов, например, коэффициенты моделей, часто отсутствуют или неоднозначны, что также является причиной того, что расхождение между расчётным и фактическим значениями выходного параметра составляет 20...30 % и более.

Для изготовления изделий, соответствующих техническим требованиям, необходимо осуществлять контроль процесса обработки. Это возможно реализовать посредством мониторинга процесса обработки.

### **1.2.2. Управление процессом обработки по результатам мониторинга входных, выходных и текущих параметров**

Управление точностью процесса механической обработки заготовок резанием осуществляют по входным и выходным данным и по текущим параметрам (показателям) процесса обработки (силы и температуры резания). В научно-технической литературе управление по текущим силовым параметрам часто обозначают как «управление упругими перемещениями».

Управление процессом обработки по результатам мониторинга входных данных позволяет уменьшить поле рассеивания случайных погрешностей, связанных с колебаниями припуска и твёрдости поверхностного слоя заготовки [46].

Можно предварительно измерить размеры и твёрдость всех заготовок в партии и рассортировать их на группы: по твёрдости и по величине снимаемого припуска. Настройка станка на размер регулируется на основе результатов замеров перед обработкой заготовок каждой из групп. Недостатком данного метода является его трудоёмкость, организационная сложность, большие затраты времени, а также отсутствие достоверных зависимостей для расчёта выходных параметров.

Адаптивные методы управления точностью, развитые в трудах научной школы Б.С. Балакшина, основаны на принципе компенсации упругих деформаций в технологической системе [5, 46, 53].

Основной принцип адаптивного управления состоит в постоянном поддержании оптимальных характеристик процесса обработки. Для достижения этой цели металлообрабатывающие станки оснащаются набором чувствительных элементов и преобразователей. Измеренные значения параметров процесса сравниваются с заданными, и в случае расхождения определяется необходимая поправка по величине и знаку [37].

В своих работах Б.С. Балакшин указывает, что преимуществом использования подачи в качестве управляемого параметра является то, что она

даёт возможность создания точного и чувствительного механизма управления упругими деформациями технологической системы. Поправка вносится за счёт воздействия на упругие перемещения технологической системы [53]. Оператор станка может осуществлять управление подачей вручную или использовать систему автоматического управления (САУ).

Такое управление даёт возможность:

1) значительно повысить точность обработки за счёт уменьшения поля рассеивания, вызванного случайными факторами (колебанием твёрдости, колебанием припуска и др.);

2) увеличить производительность за счёт применения максимально высоких режимов обработки, допускаемых технологической системой при обеспечении заданной точности.

Недостатком метода является влияние подачи на другие выходные параметры процесса обработки (например, можно получить недопустимые значения параметров микрогеометрии или параметров качества поверхностного слоя).

В САУ заложены «жёсткие» модели и алгоритмы выработки управляющего воздействия; контроль выходных параметров, а также подстройка управляемых параметров производится автоматически.

Использование специального оборудования при оснащении станков САУ может привести к значительному увеличению стоимости, увеличению сложности настройки и ремонта оборудования, затрат на его обслуживание [46]. Кроме того, применение большинства систем автоматического управления ограничено количеством параметров, которые можно контролировать для выработки управляющего воздействия. В большинстве случаев в технологической системе контролируются параметры шероховатости  $Ra$  и/или упругих деформаций элементов. А для обеспечения эффективного управления выбирается только один параметр, который составляет основу процесса - подача. Однако, если ориентироваться исключительно на один контролируемый

параметр, при управлении процессом, возникает потенциальная угроза получения неприемлемых значений других параметров.

*Управление точностью по выходным данным* основано на проведении систематических измерений размеров или других параметров качества обработанных поверхностей, по результатам которых производится периодическая поднастройка станка. Это требует остановки станка, проведения замеров, следовательно, ведёт к простоем оборудования.

Для автоматизации данного процесса используются приборы активного контроля и автоподналадчики. Автоподналадчики позволяют определять момент необходимой поднастройки в процессе работы станка без его остановки, основываясь на машинном времени или фактическом пути резания. Также, поднастройка может осуществляться с помощью регулярных измерений размеров заготовок с использованием контактных или бесконтактных измерительных устройств. Автоподналадчик даёт сигнал исполнительным органам станка для перемещения инструмента на определенное значение, компенсируя систематические погрешности. Эта величина в основном зависит от интенсивности износа и затупления инструмента [53].

В ФРГ профессором Х. Салье была разработана система адаптивного управления качеством обработанной заготовки. Система позволяет контролировать в процессе шлифования параметр шероховатости  $Ra$ , диаметр заготовки  $D$  и радиальную составляющую силы резания  $P_y$  (рис. 5) [92].

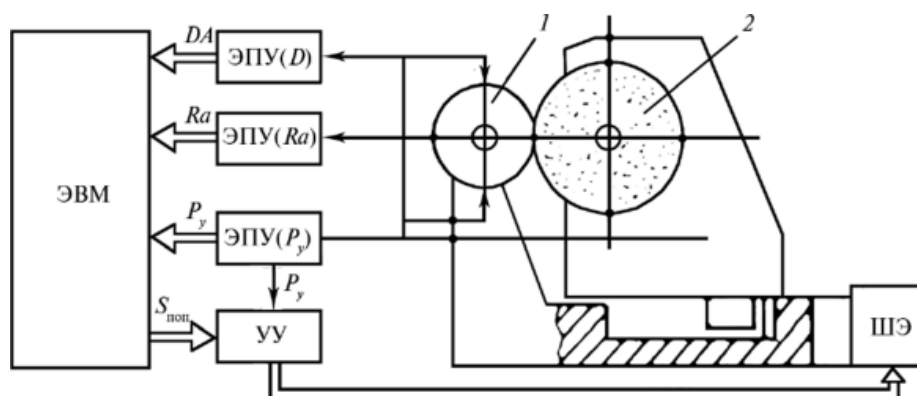


Рисунок 5 – Система адаптивного управления процессом шлифования заготовки [92]:

1 – заготовка, 2 – шлифовальный круг



В системе адаптивного управления Х. Салье используются несколько контролируемых выходных и один входной управляемый параметр.

Система управления процессом точения с обратной связью была разработана научной группой из Индии [131]. Эта система способна автоматически корректировать величину износа инструмента и прогиб заготовки, путём изменения входных параметров (глубины резания и подачи) в зависимости от текущих значений шероховатости и износа резца.

На режимы резания значительное влияние оказывает марка материала заготовки, материал режущей части инструмента, условия и вид обработки, температура в зоне резания, состав и техника подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Разработана САУ, которая использует априорную информацию о процессе резания и рекомендации по выбору значений режимных параметров, а также измеряемую информацию о силе и температуре резания. Наиболее информативными и доступными при измерении являются сила резания  $P_z$  и контактные температуры.

Первые подобные системы были разработаны в Уфимском авиационном институте и Рыбинском авиационно-техническом институте [32]. Данная САУ позволяет поддерживать температуру резания на постоянном оптимальном уровне (либо соответствующую ей термо-ЭДС  $E_0$ ). Для обеспечения требуемого уровня указанных выходных параметров необходимо обеспечить отклонение от уровня оптимальной температуры резания не более  $200^\circ\text{C}$ , а отклонение термо-ЭДС не более 0,5 мВ.

Система имеет следующие недостатки:

1. Технологически сложно обеспечить вышеуказанное отклонение термо-ЭДС;
2. Шунтирующее действие стружки;
3. Возникновение паразитной термо-ЭДС «режущая пластина-державка».

Управление точностью механической обработки по выходным данным позволяет компенсировать постоянные и переменные систематические

погрешности. Недостатком метода является ограничение условий применения автоналадчиков (должны быть обеспечены высокая однородность свойств материала заготовки, размеров заготовки и периода стойкости РИ), простой оборудования при ручной поднастройке, а также то, что данный метод не позволяет компенсировать случайные погрешности.

В.Ф. Безъязычный разработал адаптивную систему, работа которой основана на косвенном измерении силы и температуры резания [7]. В процессе резания поддерживается определенное соотношение температуры и составляющей силы резания  $P_z$ , которое обеспечивает поддержание в определённом диапазоне значений энергетического критерия процесса резания.

В ходе исследований с целью повышения производительности процесса точения труднообрабатываемых материалов, таких как ХН77ТЮР (ЭИ4375), ХН73МБТЮР (ЭИ698), ВТ9, 12Х18Н10Т и 20ХН3А, В.И. Завгородний [30] реализовал управление процессом обработки на основе параметра шероховатости обработанной поверхности. А.Ф. Карплюк [39] разработал систему точности токарной обработки, основанную на виброметрической информации. В работах Бобыря М.В., Титова В.С., Емельянова С.Г. и др. [9, 10, 11, 27] представлены АСУ стабилизации процесса механической обработки, управления скоростью резания, подачи и др. Данные системы позволяют управлять лишь одним текущим параметром, а также не позволяют достоверно оценить износ РИ, выходные параметры процесса (шероховатость, микротвёрдость, точность размеров и др.)

Учтётся вариабельность свойств материалов заготовки и РИ при назначении режима резания возможно за счёт введения дополнительных независимых переменных в математические модели, которые определяются непосредственно в производственных условиях [120]. В работах [66, 67, 113] предложена методика расчёта скорости резания, шероховатости обработанной поверхности и составляющих сил резания с учётом информации о свойствах контактной пары «твердосплавный инструмент - заготовка» (измерение

величины термо-ЭДС). Однако, для измерения величины термо-ЭДС следует провести обработку заготовки (пробный проход), что способствует увеличению временных и материальных затрат на производство детали.

В последнее время стали все более широко использоваться системы с элементами искусственного интеллекта, которые рассмотрены в п. 1.2.3.

### **1.2.3. Управление процессом точения с использованием систем с элементами искусственного интеллекта**

На основе искусственного интеллекта созданы различные системы (экспертные системы, системы принятия решений, искусственные нейронные сети и т.д.), применяемые в машиностроении, а именно в области управления процессом резания.

В.Ц. Зориктуев и Р.Р. Шангареев разработали систему управления режимом резания на основе нечёткой логики, которая обеспечивает стабильные значения тангенциальной составляющей силы  $P_z$  и температуры в зоне обработки  $T$  [33]. Разработанная модель процесса резания основана на зависимостях вида:  $P_z(S_{об}, V, t_r)$ ;  $T(S_{об}, V, t_r)$ . Данная система работает как на черновых, так и на чистовых режимах. Постоянство уровня текущих параметров позволяет повысить эффективность процесса токарной обработки.

Отсутствие возможности достоверно оценить влияние износа РИ на основные характеристики качества детали, такие как шероховатость поверхности, микротвёрдость и точность размеров, является одним из недостатков этой системы. Для снижения интенсивности износа РИ приходится снижать значения подачи  $S_{об}$ , скорости  $V$  и глубины резания  $t_r$ . Тем самым текущие параметры поддерживаются на постоянном уровне, но при этом снижается производительность. Однако, изменение элементов режима резания (подачи  $S_{об}$ , скорости  $V$  и глубины резания  $t_r$ ) непосредственно во время резания ведет к появлению неоднородной шероховатости обработанной поверхности.

В смежных с металлообработкой отраслях создаются гибридные

интеллектуальные компьютерные системы диагностики, сочетающие свойства традиционных систем, использующих «жесткие» модели и признаки интеллектуальных (в частности, экспертных) систем, такие, как наличие базы знаний. Экспертная система (ЭС) – это интеллектуальная система (программа), способная делать логические выводы на основании знаний в конкретной предметной области.

В.В. Юркевич и М.М. Климанов создали экспертную систему для токарно-винторезного станка модели ТВ-7. Данная система предоставляет возможность создания виртуальной модели детали, анализирует входную информацию, определяет показатели точности и сравнивает их с данными чертежа. Кроме того, система выявляет причины превышения допусков и дает рекомендации по улучшению показателей точности [122]. Применение экспертных систем в машиностроении целесообразно при решении трудно формализуемых задач, где необходимо вмешательство проектировщика [82].

В последние годы проводятся исследования, связанные с применением нейронных сетей в задачах прогнозирования шероховатости обработанной поверхности заготовки при токарной обработке [31].

В.В. Медведев и В.С. Медведев разработали систему диагностики качества поверхности детали, обработанной точением, на основе искусственного интеллекта [54, 55]. Суть методики заключается в использовании свойства нейронной сети находить настройку своей структуры по учебным данным, а затем адекватно реагировать на дальнейшие входные сигналы. Система работает в двух режимах (рис. 6): режиме обучения (а) и режиме работы (б).

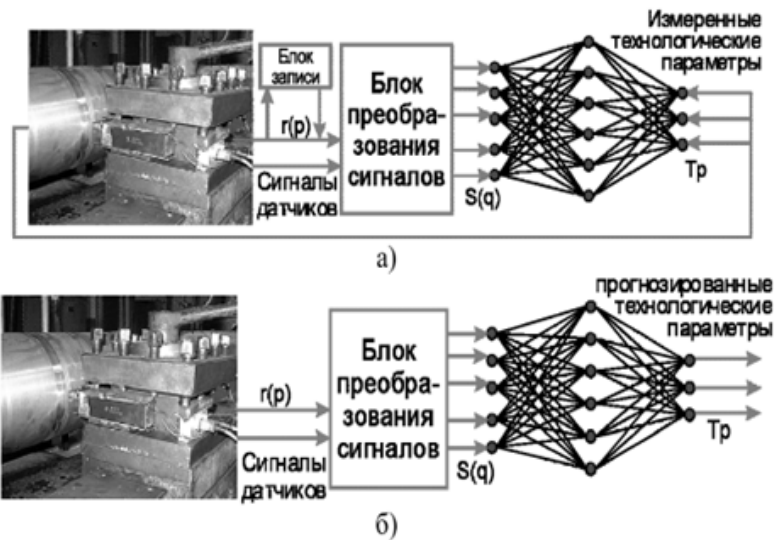


Рисунок 6 – Установка для исследования стабилизации качества поверхностного слоя при механообработке [54, 55]: а – схема в режиме обучения; б – схема в режиме работы

При необходимости в работу нейронной сети добавляют режим тестирования. В данном режиме вычисляется разница между расчётными и фактическими значениями параметров.

Аналогичные работы ведутся и за рубежом. Применяв нейронные сети, разработали систему управления процессом резания на основе нечёткой логики [128], модели прогнозирования шероховатости при чистовом точении [124, 130], систему прогнозирования шероховатости при точении стальных заготовок с минимальным применением СОТС [126] и систему прогнозирования упругих деформаций [127]. Отечественные работы, посвященные мониторингу износа резцов с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), представлены несколькими исследованиями [15, 26, 87, 118]. Для управления металлорежущими станками проводятся исследования с использованием ИНС, которые основаны на динамических моделях и предназначены для диагностики резания [38, 79].

Следует отметить то, что для эффективного применения АСУ с элементами ИИ следует произвести большое число экспериментов для сбора необходимых данных, что ведёт к росту материальных и временных затрат.

#### 1.2.4. Алгоритмы и методики коррекции режима резания

А.Н. Иноземцев в Тульском государственном университете (ТулГУ) [36] исследовал вопрос разрешения неопределённости технологической информации при разработке технологических процессов обработки заготовок. Одной из основных задач исследования являлась оптимизация процесса обработки резанием, связанная с задачей назначения оптимального режима. А.Н. Иноземцев рассматривал факт неопределённости как отсутствие или недостаток информации о зависимостях для расчёта периода стойкости инструмента.

Для решения данной проблемы автор применил метод рекурсивного стохастического самообучения технологической системы на основе разработанного алгоритма, представленного на рис. 7.

Подача  $S_{об}$  и глубина резания  $t_r$  задаются максимально возможными. Скорость резания  $V$  определяется по справочным данным, либо назначается оператором исходя из его опыта. Затем проводится эксперимент (продолжается до момента потери стойкости РИ). Далее в программу вводится действительное значение периода стойкости. Производится расчет скорости резания  $V$  для следующей итерации. Итерации реализуются, пока не будет решена задача определения скорости резания  $V^*$ , при которой обеспечивается заданный нормативный период стойкости.

Недостатком такой системы является то, что она имеет один управляемый фактор (скорость резания  $V$ ) и один контролируемый (период стойкости режущего инструмента  $\tau_c$ ). Не принято во внимание, что изменение скорости резания отразится на изменении выходных параметров процесса резания (шероховатость, точность размеров, микротвёрдость и др.).

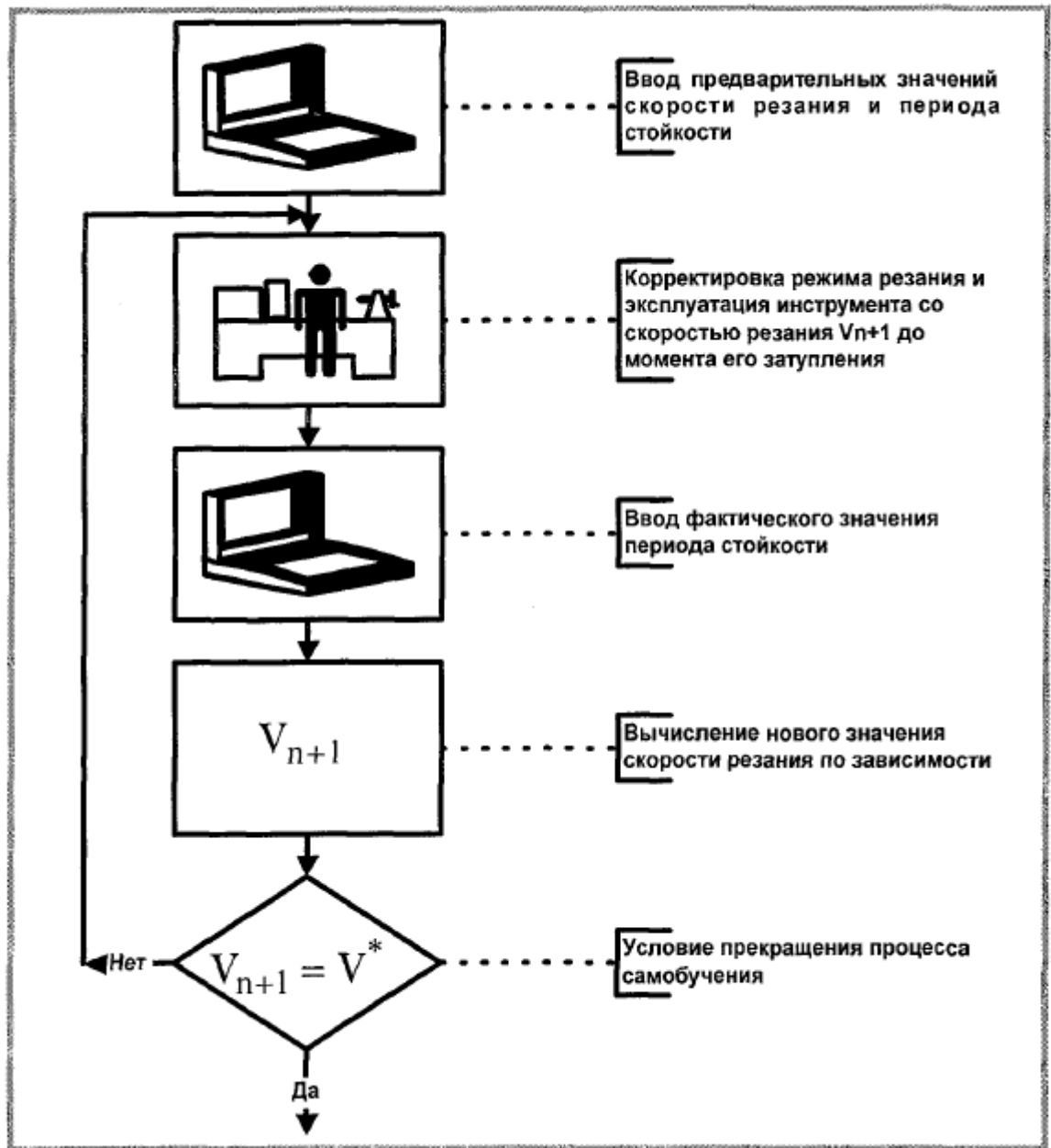


Рисунок 7 – Схема процедуры рекурсивного самообучения технологической системы [36]

Данное направление в ТулГУ продолжил развивать А.В. Анцев. В работе [2] он представил модели и методики расчета оптимального режима резания и методики восстановления РИ. Цель его исследований – снижение степени влияния неопределённости условий обработки, вызванной разбросом характеристик инструмента и обрабатываемых заготовок, на стойкость режущего инструмента.

Анцев А.В. получил зависимости, позволяющие рассчитать период

стойкости режущего инструмента и учитывающие стохастичный характер процесса резания, Им разработана методика определения оптимальных параметров резания для выполнения операций обработки на станках с ЧПУ. Эта методика предусматривает использование максимальных значений подачи, глубины и скорости резания, с учётом ограничений [2].

Разработанные автором модели и методики не учитывают влияния температуры резания на период стойкости РИ. Также не приведены данные исследований о влиянии назначенных режимов на параметры качества обработанных заготовок (точность размеров, шероховатость, микротвёрдость, остаточные напряжения и др.).

Суслов А.Г. и Петрешин Д.И. в своих исследованиях решали задачу обеспечения заданного значения параметра шероховатости  $Ra(Rz)$  обработанной поверхности при точении стальных валов из стали 20ХН17Н2 [35, 65]. В работе [65] описана система адаптивного управления параметрами качества поверхностей деталей (рис. 8).

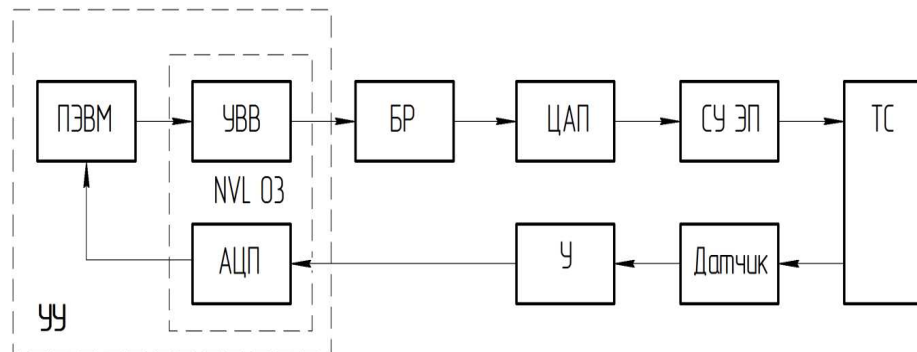


Рисунок 8 – Блок-схема САУ [65]

САУ работает следующим образом. Предварительно необходимо ввести исходные данные (требуемую шероховатость, диаметр обрабатываемой заготовки, режимы резания, физико-механические свойства обрабатываемого материала, жёсткость технологического оборудования). По введенным данным рассчитывается продольная подача  $S_{об}$ , которая должна обеспечить получение заданного значения параметра шероховатости  $Ra$ . После расчёта начальной величины продольной подачи  $S_{об}$  ее цифровой код через устройство ввода –



вывода (УВВ), буферный регистр (БР) и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) поступает на схему управления электроприводом (СУ ЭП) и начинается обработка заготовки. Непосредственно в ходе обработки производится измерение шероховатости с помощью профилометра с усовершенствованной опорой и ощупывающей иглой (рис. 9). Работает он следующим образом. Вращение датчика 1 сопровождается работой внутреннего чувствительного элемента 2, который оснащен надежно закрепленной алмазной иглой. Каждое вращение датчика позволяет измерить одну ординату. Чтобы получить точные данные о параметре шероховатости  $Ra$ , необходимо провести не менее 200 измерений. Зафиксировать информацию с датчика 1 позволяет токосъемный узел, обеспечивающий безопасный сбор данных. С целью обеспечить надлежащую работу, датчик плотно прижимается к контролируемой поверхности с использованием специальной пружины.

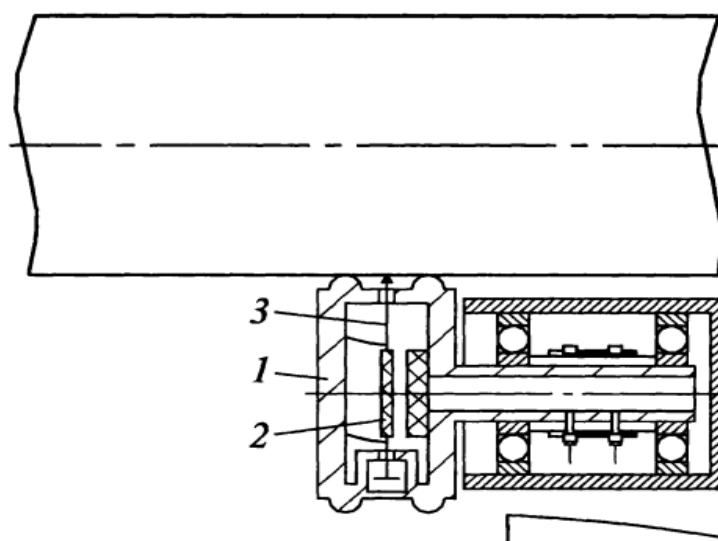


Рисунок 9 – Устройство для измерения шероховатости в процессе обработки [35]

Данная САУ работает с запаздыванием по управляемой величине шероховатости, так как для ее измерения требуется участок обработанной поверхности размером не менее 10 мм. По окончании процесса измерения шероховатости производится сравнение фактического (измеренного) значения с

заданным значением. Если измеренная величина превышает заданное, то корректируется величина продольной подачи: Величина коррекции продольной подачи  $\Delta S_{об}$  определяется по эмпирической зависимости [65]:

$$\Delta S_{об} = \left( \frac{\Delta Ra}{C_0 \cdot V^y} \right)^{1/x}, \quad (18)$$

где  $\Delta Ra$  – отклонение параметра шероховатости  $Ra$  от заданного (требуемого) значения, мкм;  $C_0$ ,  $x$ ,  $y$  – эмпирические коэффициенты;  $V$  – скорость резания, м/мин.

После того, как подача в процессе обработки была скорректирована, опять производится измерение шероховатости обработанной поверхности.

Если же измеренная величина шероховатости не достигает заданного значения, то величина продольной подачи остается без изменений.

Недостатками алгоритма коррекции, предложенного Д.И. Петрешиным, является то, что для расчёта величины коррекции продольной подачи используется эмпирическая зависимость и контролируется один выходной параметр. Не учтён тот фактор, что изменение подачи отразится на остальных выходных параметрах процесса. Поэтому есть необходимость в разработке аналогичных зависимостей для расчёта коррекции большего числа выходных параметров с учётом множества входных.

А.Н. Унянин и Е.А. Семлюков разработали методику коррекции режима механической обработки [101]. На первом этапе выполняется расчет режима обработки по формулам теории резания или режим назначается по каталогам режущего инструмента. Затем следует этап обработки на заданном режиме и измерения выходных параметров (например, диаметра вала и шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ ). Сравниваются заданные значения выходных параметров (заданы техническими требованиями) с их фактическими (измеренными) значениями. Если необходима коррекция режима, то рассчитывается величина управляющего воздействия:

$$\Delta X_{j1} = \frac{Y_1^{max} - Y_1^{0\phi}}{k \cdot \frac{dY_1}{dX_j}}, \quad (19)$$

где  $Y_i^{max}$  – заданное значение параметра  $Y_1$ ;  $Y_1^{0\phi}$  – фактическое значение параметра  $Y_1$ , получено на расчётном режиме обработки;  $k$  – количество управляемых параметров;  $\frac{dY_1}{dX_j}$  – частная производная, показывающая степень влияния  $j$ -го управляемого фактора на выходной параметр  $Y_1$ .

Затем идет этап проверки, на котором определяют как изменятся остальные выходные параметры при новых значениях элементов режима резания. Рассчитываются новые значения элементов режима резания и проводится обработка партии заготовок на скорректированном режиме, измеряются выходные параметры (например, шероховатость и диаметр обработанной поверхности). По результатам сравнений фактических значений выходных параметров с заданными, принимается решение о том, нужно ли корректировать режим резания.

Данная методика коррекции учитывает множество управляемых входных и контролируемых выходных параметров. Однако, она не учитывает изменение параметров обработки в процессе работы инструмента с течением времени (то есть, не принимает во внимание, что процесс обработки деталей является нестационарным процессом).

Аналогичные работы ведут и зарубежные ученые. А. Аласкари и С.Е. Ораби разработали адаптивную систему управления процессом черновой токарной обработки [125]. Авторы предлагают подход, основанный на применении рекурсивных непрерывных итераций для прогнозирования (расчёта) величины износа резца по задней поверхности, сил резания и потребляемой мощности. Алгоритм приведен на рис. 10.

В качестве исходных данных использованы: время  $\tau$ , глубина резания  $t_r$ , скорость резания  $V$ , подача  $S_{об}$ .

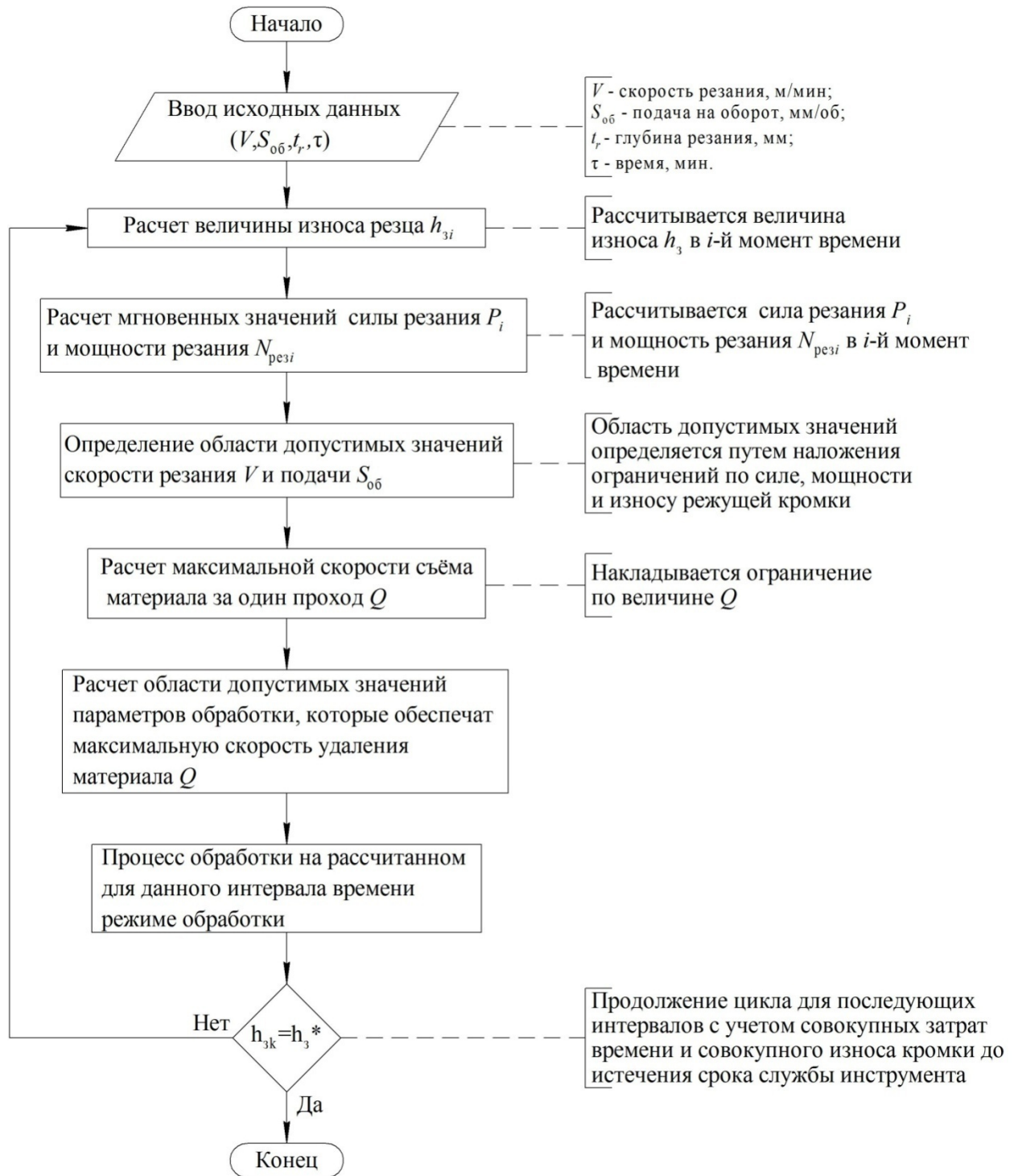


Рисунок 10 – Блок-схема системы адаптивного управления (А. Аласкари и С.Е. Ораби)

На первом этапе по эмпирической зависимости рассчитывается величина износа по задней поверхности резца в  $i$ -й момент времени  $h_{zi}$ . Используя полученное значение  $h_{zi}$ , рассчитываются силы резания и потребляемая мощность в  $i$ -й момент времени обработки заготовки.

Определяется область допустимых значений скорости резания  $V$  и подачи

$S_{об}$ , при которых выполняются заданные технические ограничения (по потребляемой мощности и прочности механизма продольной подачи станка). Максимальный съём металла за один проход  $Q$  рассчитывается по зависимости:

$$Q = 1000 \cdot V \cdot S_{об} \cdot t_r. \quad (20)$$

Выбирается оптимальная пара «скорость резания - подача», которая обеспечивает максимальную скорость съёма металла с заготовки на заданном интервале времени. Затем процедура повторяется на последующих интервалах до достижения заданного значения износа  $h_3$ . При этом не учитывается, каким образом изменение скорости резания  $V$  и подачи  $S_{об}$  отразится на выходных параметрах процесса обработки.

В.В. Полтавец [69] исследовал процесс шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов с учетом его нестационарности. Д.В. Ардашев в докторской диссертации [3] исследовал вопрос повышения эффективности процесса шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов. Он рассматривает процесс шлифования как динамическую систему. Методика прогнозирования эксплуатационных показателей шлифовальных кругов учитывает вариабельность величины площадки затупления единичного зерна во времени.

Анализ вышеприведённых работ показывает, что задача коррекции режима является актуальной. Перспективным направлением является разработка методики коррекции режима резания, которая позволяет учесть изменение параметров модели процесса механической обработки с увеличением времени наработки режущего инструмента [132]. Применение подобных моделей на этапе технологической подготовки производства позволяет повысить производительность и качество обработки.

### 1.3. Анализ зависимостей для расчета выходных параметров процесса точения

Погрешность обработки традиционно определяют по следующей формуле [53, 119]:

$$\omega = 1,2 \cdot \sqrt{\omega_y^2 + \omega_j^2 + \omega_n^2} + \omega_{И} + \omega_{\Theta} + \omega_{\Phi}, \quad (21)$$

где *случайные погрешности*:

$\omega_y$  – установки заготовки,  $\omega_j$  – вызванная упругими деформациями элементов технологической системы,  $\omega_n$  – настройки станка на размер;

*переменные систематические (функциональные) погрешности*:

$\omega_{И}$  – обусловленная размерным износом режущего инструмента (резца),

$\omega_{\Theta}$  – вызванная температурными деформациями технологической системы;

*постоянная систематическая погрешность*:

$\omega_{\Phi}$  – сумма погрешностей обработанной заготовки, обусловленных геометрическими неточностями станка.

Формула (21) учитывает влияние на параметр  $\omega$  случайных и систематических погрешностей и будет использована для дальнейших расчётов.

Для расчёта составляющих силы резания применяют аналитические зависимости вида [12, 59, 129, 138]:

$$P_x = (F \cdot \cos\gamma - N \cdot \sin\gamma + N_1) \cdot \sin\psi; \quad (22)$$

$$P_y = (F \cdot \cos\gamma - N \cdot \sin\gamma + N_1) \cdot \cos\psi + N_2; \quad (23)$$

$$P_z = (F \cdot \sin\gamma - N \cdot \cos\gamma + F_1), \quad (24)$$

где  $\psi$  – угол между диагональю сечения срезаемого слоя и направлением подачи (рис. 11), град.;  $F$ ,  $N$  – сила трения и сила нормального давления на передней поверхности инструмента, Н;  $F_1$ ,  $N_1$  – то же на задней поверхности инструмента, Н;  $N_2$  – сила на участке зачищающей кромки инструмента, Н;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – осевая, радиальная, тангенциальная составляющие силы резания, Н.

Схема действия сил при точении приведена на рис. 11.

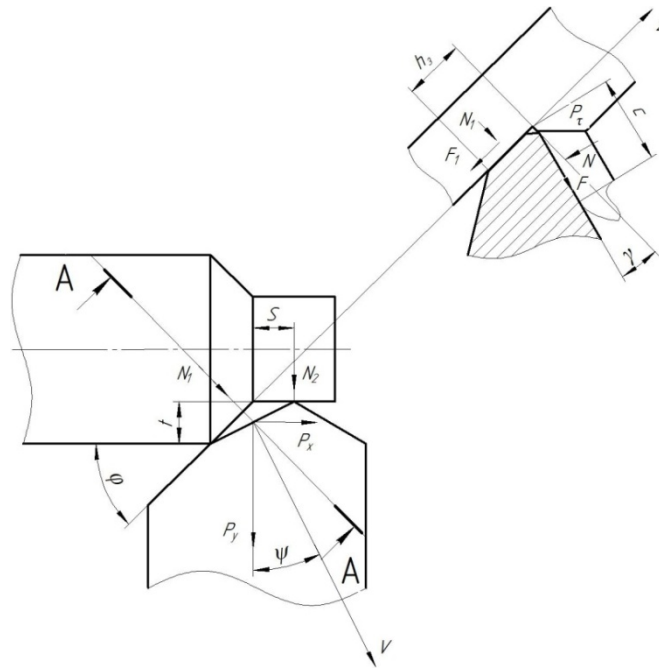


Рисунок 11 – Схема действия сил при точении [59]

В справочнике технолога-машиностроителя [89] приведены эмпирические зависимости для определения составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  следующего вида:

$$P_{z,y,x} = 10 \cdot C_p \cdot t_r^x \cdot S_{об}^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (25)$$

где  $C_p$  – постоянная;  $x$ ,  $y$ ,  $n$  – показатели степени для конкретных условий обработки;  $K_p$  – поправочный коэффициент.

Недостатком данной зависимости является то, что для некоторых групп материалов (серый и ковкий чугун, алюминий, жаропрочные стали) при наружном продольном точении степенной показатель  $n = 0$ . Следовательно, зависимость не учитывает влияние скорости резания  $V$  на значения составляющих силы резания, что не соответствует действительности.

В справочнике [6] представлены эмпирические зависимости для расчёта составляющей силы резания  $P_z$  при обработке жаропрочных, высокопрочных и коррозионно-стойких сплавов. Например, при точении заготовок из высокопрочной стали составляющую силы резания  $P_z$  рассчитывают по следующей формуле:

$$P_z = C_p \cdot V^{-0,1} \cdot S_{об}^{0,75} \cdot t_r^{0,9}. \quad (26)$$

При этом в справочнике [6] отсутствуют зависимости для расчёта осевой и радиальной составляющих силы резания  $P_x$  и  $P_y$ .

В диссертации [113] для расчёта составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  были предложены следующие зависимости:

$$P_x = 118,3 \cdot E_{пр}^{0,664} \cdot t_r^{0,712} \cdot S_{об}^{0,516} \cdot V^{0,165}; \quad (27)$$

$$P_y = 700,3 \cdot E_{пр}^{0,408} \cdot t_r^{0,551} \cdot S_{об}^{0,886} \cdot V^{0,097}; \quad (28)$$

$$P_z = 4681,5 \cdot E_{пр}^{-0,102} \cdot t_r^{0,609} \cdot S_{об}^{0,649} \cdot V^{-0,035}, \quad (29)$$

где  $E_{пр}$  – термо-ЭДС пробного прохода.

Для определения параметра  $E_{пр}$  необходимо предварительно выполнить пробный рабочий ход.

Расчёт составляющей силы резания  $P_z$  можно выполнить по зависимости [19, 21]:

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2k_c} \right] \cdot \cos \gamma + \right. \quad (30)$$

$$\left. + \frac{k_c}{4u \cdot \cos \gamma} + \mu \cdot \sin \gamma + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot S_{об} \cdot \sin \varphi} + \frac{k_c \cdot S_{об} \cdot \sin^2 \varphi}{4u \cdot t_r \cdot \cos \gamma} \right\}.$$

где  $\sigma_{St}$  – среднее значение напряжения текучести обрабатываемого материала, в области пластической деформации, Па;  $S_{об}$  – подача, м/об;  $t_r$  – глубина резания, м;  $\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести ( $\mu=0,5$  и  $\mu=0,3$  при отсутствии и наличии СОТС в зоне контакта соответственно);  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты трения стружки о переднюю поверхность резца и задней поверхности резца о заготовку;  $\gamma$  – передний угол резца, град.;  $u$  – коэффициент ( $u = 1$  при  $\gamma \geq 0$ ;  $u = 1 - \sin \gamma$  при  $\gamma < 0$ );  $\varphi$  – главный угол резца в плане, град.;  $l_2$  – длина контакта задней поверхности резца с заготовкой, м;  $k_c$  – коэффициент утолщения стружки.

Данная зависимость (30) учитывает влияние не только режимных параметров, но и свойств обрабатываемого материала (предел текучести  $\sigma_{St}$ ), геометрию режущего инструмента (передний угол  $\gamma$ , главный угол в плане  $\varphi$ ),



длину контакта заготовки с инструментом  $l_2$ , коэффициент утолщения стружки  $k_c$ , коэффициенты трения. Данную зависимость предполагается использовать для расчётов составляющей силы резания  $P_Z$ .

На износ режущего инструмента значительное влияние оказывает температурный фактор. В табл. 1 приведены известные зависимости расчёта износа резца, которые учитывают влияние температуры на износ.

Таблица 1 – Зависимости для расчёта износа резца [80, 81]

№	Формула	Вид износа	Примечание
1	2	3	4
1	$J_{\text{Л}} = \frac{V_n}{V_c} \cdot \frac{D}{3} \cdot \frac{\sigma_n}{H};$ $J_{\text{П}} = \frac{V_2}{V_c} \cdot \frac{D}{3} \cdot \frac{\sigma_2}{H}$	Адгезионный износ резцов	$\sigma_n$ и $\sigma_2$ - контактные напряжения на передней и задней поверхностях соответственно; $H$ - твердость более мягкого материала
2	$J_{\text{ФХ}} = K_{\text{ФХ}} \cdot \left(\frac{RT^*}{Q}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{RT^*}{U}\right)^\alpha \cdot L_i^\xi$	Износ с учетом химического модифицирования и сорбционных процессов	$Q$ - теплота адсорбции; $U$ - энергия активации распада межатомных связей; $L_i$ - комплекс временных факторов
3	$J_{\text{ТФ}} = K_{\text{ТФ}} \cdot \left(\frac{T_k}{T_{\text{кр}}}\right)^m \cdot \left[\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\delta_1}{T_{\text{кр}}}\right]^n \cdot \left[\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta \cdot T}{(1 - \mu) \cdot \sigma_{\text{кр}}}\right]^p$	Износ при учете теплофизических процессов	$T_k$ и $T_{\text{кр}}$ - контактная и критическая температуры; $\frac{\partial T}{\partial x} = \text{grad}T$ ; $\delta_1$ - толщина теплового пограничного слоя; $\alpha$ - коэффициент теплового расширения; $\Delta T$ - приращение температуры в поверхностном слое; $\sigma_{\text{кр}}$ - предельное напряжение в твердом слое
4	$T_{\text{П}} = \frac{\sqrt{\pi \cdot K_\alpha \cdot f \cdot G_1}}{2 \cdot G \cdot \frac{m\delta}{m} \cdot C_0 \cdot \sqrt{v \cdot D} \cdot l_{\text{П}}}$	Диффузионный износ резца по передней поверхности	$T_{\text{П}}$ - период стойкости по передней поверхности; $f$ - площадь лунки износа; $G_1$ и $G$ - удельный вес твердого сплава и обрабатываемого материала соответственно; $m\delta$ и $m$ - атомные веса растворенного вещества; $C_0$ - концентрация диффундирующего элемента на границе раздела; $v$ - скорость резания ( $\frac{v}{K_s} = v_c$ - скорость движения стружки); $l_{\text{П}}$ - длина контакта по передней поверхности;
5	$T_3 = \frac{\sqrt{\pi \cdot \text{tg} \alpha \cdot \sqrt{h_3^3} \cdot G_1}}{3 \cdot G \cdot \frac{m\delta}{m} \cdot C_0 \cdot \sqrt{v \cdot D} \cdot (1 - \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \gamma)}$	Диффузионный износ резца по задней поверхности	$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT^*}\right)$ - коэффициент диффузии; $h_3$ - фаска износа по задней поверхности; $\alpha, \gamma$ - задний и передний углы резца

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
6	$h_3 = \left[ (2 - m) \cdot A^m \cdot \frac{v \cdot D_0 \cdot \exp\left(-\frac{v}{RT^*}\right)}{b \cdot \psi \cdot H} \right]^{\frac{1}{2}-m} \cdot t^{\frac{1}{2}-m}$	Диффузионный износ резцов	$h_3$ – износ по задней поверхности; $m$ – показатель, зависящий от тока деформации в зоне контакта; $A = dN/dh_3$ – скорость изменения нормальной нагрузки по величине износа; $v$ – скорость резания; $b$ – ширина среза; $\Psi = \text{tg}\alpha / (1 - \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\gamma)$ ; $t$ – время достижения износа $h_3$ ; $H$ – твердость мягкого материала; $T^*$ – абсолютная температура
7	$J = \frac{\left[ \int_0^{\Delta} \frac{c \cdot \rho \cdot T(x) dx}{\tau} \right]}{v \cdot P[\delta S] \cdot (S_x^i - S_0^i)}$	Энтропийный подход к оценке интенсивности изнашивания	$T$ – температура контакта; $\Delta$ – зона действия температурного градиента; $v$ – скорость трения; $P[\delta S]$ – производство избыточной тепловой энтропии
8	$J = \frac{m \cdot T^n}{(g - 1) \cdot \left[ -\frac{\partial T(0)}{\partial x} \right] \cdot v \cdot (S_* - S_0)}$		$m \cdot T^n = \omega_0$ – плотность объемного источника теплопоглощения; $m, n$ и $g$ – коэффициенты, зависящие от материала и вида изнашивания

Зависимости для расчёта износа содержат эмпирические коэффициенты. Некоторые параметры необходимо определять экспериментальным путём (микротвёрдость поверхностного слоя заготовки, площадь лунки износа на передней поверхности РИ и др.). Для расчёта части параметров сложно найти исходные данные. Приведённые зависимости справедливы лишь при определённых условиях резания. В научной литературе до сих пор нет чётких границ перехода от адгезионного износа к диффузионному. Всё вышеуказанное обуславливает наличие неопределённости исходной информации. Следовательно, по данным зависимостям определять износ инструмента чрезвычайно сложно в производственных условиях.

#### 1.4. Анализ известных моделей расчёта температуры резания

Работоспособность РИ и качество обработанных поверхностей деталей зависят от температуры в зоне резания.

Тепловые процессы при резании исследовали А.Н. Резников [77, 78],

С.С. Силин [86], А.Д. Макаров [49, 50], Н.В. Талантов [96], В.В. Постнов [71] и др. Однако, лишь методы расчёта температур резания А.Н. Резникова и С.С. Силина изложены настолько подробно, что их возможно использовать для расчётов [73].

При аналитическом исследовании теплофизики процесса резания, исходя из принятого маршрута тепловых потоков [16], определяют соответствующие потоки в инструмент, стружку и заготовку, а затем составляют и решают уравнения теплопроводности для каждого объекта. Данные методики имеют следующие недостатки:

1. Малый набор форм объектов, участвующих в теплообмене (не позволяют учесть сменную многогранную пластину, закрепленную в державку резца).

2. Не учитывают зависимость механических и теплофизических параметров материала заготовки и режущей части инструмента от температуры.

3. В методике А.Н. Резникова длительность воздействия источника тепловыделения не рассчитывается, определяется коэффициентом  $D$ . Влияние смазочно-охлаждающей жидкости определяется поправочным коэффициентом, а не коэффициентом теплоотдачи.

Исследования В.А. Пушных и В.Л. Библика показали, что применение метода расчёта А.Н. Резникова целесообразно использовать для материалов, дающих сливную стружку. А при использовании метода С.С. Силина следует следить за тем, чтобы параметр  $B$ , характеризующий степень пластических деформаций материала заготовки, был не менее 0,4 [73].

Термомеханический метод расчёта температуры резания Васина С.А., Кушнера В.С. учитывает зависимость предела текучести материала заготовки от температуры. Однако, для расчёта  $\sigma_{St}$  необходимо знать температуру  $T_g$  в области пластической деформации [12]:

$$T_g = \frac{\tau_{St} \cdot \varepsilon_u}{C_V}, \quad (31)$$

где  $\tau_{St}$  – средние касательные напряжения в условной поверхности сдвига, Па;  $C_V$  – удельная объёмная теплоёмкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\varepsilon_u$  – истинный сдвиг [12]:

$$\varepsilon_u = \frac{\left(k_c + \frac{1}{k_c}\right) - 2\sin\gamma}{\cos\gamma}. \quad (32)$$

Средние касательные напряжения в условной поверхности сдвига [103]:

$$\tau_{St} = \frac{\sigma_{St}}{\sqrt{3}}, \quad (33)$$

зависимость для расчёта  $T_g$  можно представить [102]:

$$T_g = \frac{\sigma_{St} \cdot \left(k_c + \frac{1}{k_c}\right) - 2\sin\gamma}{\sqrt{3} \cdot C_V \cdot \cos\gamma}. \quad (34)$$

Для определения предела текучести, необходимо знать значение температуры в зоне пластической деформации. Непонятно, каким образом авторы решали данный вопрос, если уравнение (34) содержит два неизвестных –  $T_g$  и  $\sigma_{st}$ .

При аналитическом расчёте температур резания появляются проблемы вследствие того, что предварительно невозможно определить, каким образом распределяются плотности тепловых потоков между контактирующими объектами. Также необходимо учитывать изменение положения зон тепловыделения во времени, зависимость теплофизических свойств материалов РИ и заготовки и механических свойств материала заготовки от температуры. Единственный метод, который позволяет решить такую задачу – метод конечных элементов (МКЭ) [123].

Обычно, при определении коэффициентов, показывающих распределение тепловых потоков между контактирующими объектами, применяется формула Ф. Шаррона [17] и аналогичные зависимости. Однако, заранее невозможно определить точные значения теплофизических характеристик материалов, используемых в данных зависимостях, из-за того, что неизвестно значение температуры, от которой они зависят. Перспективным подходом является

решение дифференциальных уравнений теплопроводности объектов вместе с общими граничными условиями в зоне контакта [42, 137].

А.Н. Унянин [106] использовал этот подход для расчета локальных (мгновенных) температур и других параметров процесса шлифования. При построении дискретных аналогов уравнений теплопроводности был использован универсальный метод баланса. Для каждого из компонентов, таких как зерно, заготовка, стружка и шлифовальный круг (ШК), были разработаны соответствующие дискретные аналоги уравнений теплопроводности. Решение уравнений теплопроводности было получено с помощью численных методов моделирования температурных полей [103]. Этот подход позволяет учесть влияние температуры на механические и теплофизические свойства применяемых материалов. Такой подход будем использовать в данной работе при расчёте температур в процессе точения.

В дальнейшем результаты расчёта температур будут использованы для расчёта величин физико-механических свойств материала заготовки, составляющих сил резания, упругих и тепловых деформаций, параметров качества обработанных деталей (шероховатость, точность диаметрального размера), а также для проверки выполнения некоторых технических ограничений, накладываемых на процесс обработки.

### **1.5. Методы моделирования ограничений производительности точения**

В ходе процесса резания возникает ряд ограничений, которые определяются различными факторами, такими как технология, физика и механика процесса [75].

При черновых режимах основными ограничениями являются допустимая сила резания  $P$ , прочность и жёсткость инструмента, деталей и узлов станка, мощность двигателя станка. С увеличением  $P$  возрастают деформации заготовки и инструмента, усиливаются вибрации, снижаются точность и

качество обработки, увеличивается потребляемая мощность.

Наибольшее влияние на силу резания оказывает глубина резания  $t_r$ , в меньшей степени влияет подача  $S_{об}$ , и в наименьшей степени – скорость резания  $V$ . С увеличением скорости  $V$  сила резания может даже несколько снижаться, из-за повышения температуры в зоне резания и уменьшения твердости и прочности материала срезаемого слоя.

При чистовых режимах основная задача заключается в обеспечении необходимого качества поверхностного слоя и точности обработанной детали.

В качестве целевой функции используют максимальную производительность обработки:  $n \cdot S_{об} \rightarrow \max$  (где  $n$  – частота вращения шпинделя станка, об/мин).

Для точения в работах [34, 47, 62, 90] предлагаются следующие ограничения:

1. По предельно допустимой мощности резания  $N_{рез}$ , обусловленной мощностью электродвигателя привода главного движения станка  $N_{дв}$ :

$$N_{рез} \leq N_{дв} \cdot \eta_{ст}. \quad (35)$$

2. По прочности державки резца:

$$\frac{6 \cdot P_Z \cdot l_p}{B \cdot H^2} \leq [\sigma_{и}] \quad (36)$$

где  $l_p$  – вылет резца из резцедержки, мм;  $B$  – ширина державки резца, мм;  $H$  – высота державки резца, мм;  $[\sigma_{и}]$  – допустимое напряжение на изгиб для материала державки резца, МПа.

3. По предельно допустимым диапазонам частоты вращения шпинделя и подачи [62, 90]:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}, \quad S_{min} \leq S_{об} \leq S_{max}. \quad (37)$$

4. Ограничение по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ :

$$Ra \leq Ra^{max}, \quad (38)$$

где  $Ra$  – расчётное значение параметра шероховатости, мкм;  $Ra^{max}$  – заданное

(регламентированное) значение параметра шероховатости, мкм. Расчётное значение шероховатости  $Ra$  определяем по зависимости (157), приведенной в п.3.2.

5. Ограничение по точности обработки [47]:

$$P_y \cdot \left[ \left( \frac{1}{j_{\text{заг}}} + \frac{1}{j_{\text{ст}}} + \frac{1}{j_{\text{п}}} \right) \right] \leq K_{\delta} \cdot \frac{\delta}{2}, \quad (39)$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $j_{\text{заг}}$  – жёсткость заготовки, Н/мм;  $j_{\text{ст}}$  – жесткость станка, Н/мм;  $j_{\text{п}}$  – жесткость инструмента, Н/мм;  $K_{\delta}$  – коэффициент, показывающий в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией заготовки, резца и станка ( $K_{\delta} = 0,7 \dots 0,8$ );  $\delta$  – допуск диаметрального размера обработанной заготовки (детали), мм.

6. Ограничение по допустимой температуре резания:

$$T_{\text{рез}} \leq T_{\text{доп}}, \quad (40)$$

где  $T_{\text{рез}}$  – температура резания, °С;  $T_{\text{доп}}$  – допустимая температура резания, °С ( $T_{\text{доп}}$  можно принять равной теплостойкости материала режущей части РИ).

Максимальная температура при точении возникает на передней поверхности резца. Температуру резания  $\theta_{\text{рез}}$  можно рассчитать по зависимостям расчёта температуры на передней поверхности резца, приведенным в п. 3.3.2.

7. Ограничение по температуре, при которой в поверхностном слое заготовки формируются растягивающие тепловые остаточные напряжения:

$$T_{\text{ОН}} = \frac{\sigma_{\text{St}}}{(\alpha_{\text{п}} \cdot E)} + T_{\text{Н}} \leq T_{\text{заг}}, \quad (41)$$

где  $T_{\text{ОН}}$  – температура нагрева металла поверхностного слоя, в случае превышения которой в нём возникают тепловые остаточные напряжения растяжения, °С;  $\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент линейного расширения материала заготовки,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $E$  – модуль упругости материала заготовки, МПа;  $T_{\text{Н}}$  – начальная температура нагрева, °С;  $T_{\text{заг}}$  – температура поверхностного слоя заготовки, °С.

Для чернового точения особенно важны ограничения по прочности

пластины и прочности державки резца, а для чистового – ограничения по предельно допустимой шероховатости и точности обработки.

Ограничение по точности обработки [47] учитывает лишь влияние упругих деформаций технологической системы, не учитывает влияние температурных деформаций, погрешностей настройки на размер и др.

### **1.6. Выводы. Цель и задачи исследования**

На основе анализа научно-технической информации по вопросу назначения режима резания при точении и управления процессом механической обработки заготовок можно сделать следующие выводы:

1. Эффективным методом назначения режима обработки является его расчёт с использованием зависимостей и математических моделей (формул теории резания). Но стоит отметить, что эти математические модели, описывающие взаимосвязь между выходными и входными параметрами процессов механической обработки, не всегда точно отражают эту связь. Многие модели получены при условии ряда допущений и не учитывают влияние на процесс всех управляемых и неуправляемых факторов. Часто отсутствуют необходимые данные для выбора соответствующих параметров математических моделей. Кроме того, в процессе обработки действует ряд неуправляемых факторов (колебания физико-механических свойств заготовок, припусков и др.). Поэтому режим, рассчитанный с использованием формул теории резания, может быть далёк от оптимального.

Для снижения степени влияния неопределённости технологической информации, обусловленной вышеприведенными факторами, на параметры процесса точения следует разработать методику расчета режима обработки, предусматривающую возможность коррекции элементов режима резания.

2. Перспективным направлением является применение автоматизированных систем управления процессом точения. Однако данные



системы имеют следующие недостатки:

а) ограниченное число управляемых параметров процесса точения (обычно один параметр – подача);

б) эффективное функционирование данных систем возможно только при номинальных значениях контролируемых показателей и управляемых факторов, обеспечивающих режим обработки, близкий к оптимальному.

в) в некоторых системах для определения наиболее эффективных режимов резания применяется предварительная обработка заготовки с целью сбора необходимой информации для внесения поправок в программу обработки.

3. Известные методики расчёта температур резания не учитывают следующие факторы: зависимость механических свойств материала заготовки и теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента от температуры; длину контакта резца с заготовкой; условия охлаждения контактирующих объектов.

4. Наиболее достоверными являются модели для расчета параметров процесса механической обработки, учитывающие нестационарность процесса резания. Анализ научно-технической литературы показал, что процесс резания следует рассматривать как динамическую систему, т.к. на выходные параметры процесса обработки значительное влияние оказывают факторы, изменяющиеся с увеличением наработки инструмента (износ инструмента, сила резания, температура, вибрации и др.). Перспективными являются системы, которые позволяют управлять величиной выходных параметров (таких как шероховатость поверхности и размер детали) с учетом изменяющихся во времени параметров обработки.

**Целью исследования** является разработка методики коррекции режима точения, использование которой позволит повысить производительность процесса точения при обеспечении заданного качества обработанных деталей в условиях неопределённости технологической информации.

В ходе выполнения данной работы предполагается решить следующие **задачи**:

1. Разработать методики коррекции режима течения при различных соотношениях предельных и фактических значений выходных параметров и план варьирования управляемыми факторами с целью приближения их к оптимальным значениям.

2. Разработать математические модели для расчёта выходных и текущих параметров процесса течения и полей их рассеивания.

3. Разработать методику определения изменяющихся во времени выходных параметров и текущих показателей процесса течения.

4. Разработать модели, алгоритмы и программное обеспечение для коррекции назначенного режима течения.

5. Оценить эффективность разработанных методик коррекции режима на основе анализа результатов их функционирования.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ

### 2.1. Модель процесса механической обработки

Процесс механической обработки определяется как выходными и текущими параметрами  $Y_i$ , так и входными (см. рис. 12). Входные параметры включают в себя управляемые контролируемые параметры  $X_j$ , неуправляемые контролируемые параметры (факторы)  $Z_k$  и неуправляемые неконтролируемые параметры (факторы)  $W_n$ .

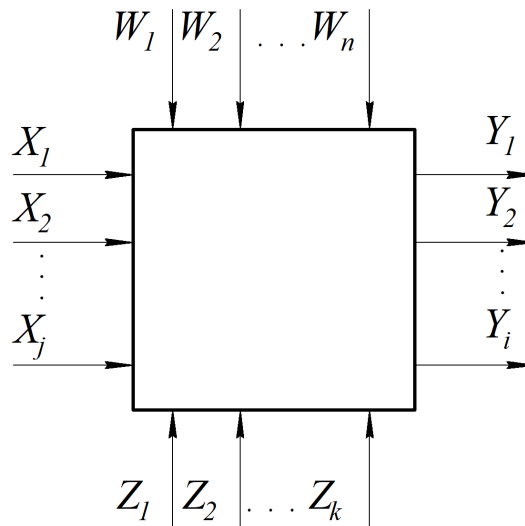


Рисунок 12 – Параметры процесса механической обработки

К управляемым контролируемым параметрам относятся параметры инструмента, элементы режима, состав СОЖ, техника ее подачи и др. Под текущими параметрами понимаем показатели процесса обработки (интенсивность изнашивания режущего инструмента, силы резания, температуры), которые оказывают непосредственное влияние на выходные параметры, в том числе параметры качества обработанной детали (шероховатость, точность размеров и др.). Следует иметь в виду, что выходные параметры процесса резания зависят от различных факторов, в том числе от входных и текущих показателей. Например, текущие параметры (показатели), такие как сила и температура, влияют на качество обработки. В

то же время текущие показатели зависят один от другого (рис. 13) и от входных параметров (элементы режима резания, физико-механические и теплофизические свойства материалов заготовки и инструмента, конструктивно-геометрические параметры инструмента).

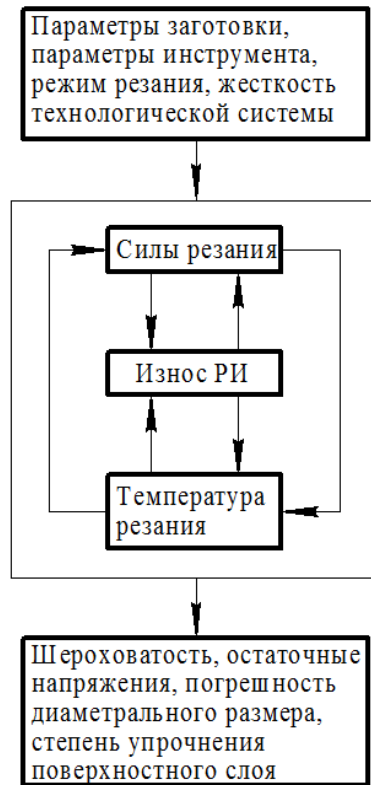


Рисунок 13 – Схема, иллюстрирующая взаимное влияние параметров процесса обработки

С увеличением времени работы инструмента изменяется (увеличивается) его износ, что вызывает изменение силы и температуры. С другой стороны, показатели состояния инструмента напрямую зависят от параметров обработки, таких как сила и температура (рис. 13). Следовательно, взаимное влияние параметров процесса приводит к недостатку информации при расчёте выходных параметров по известным моделям. Для того, чтобы рассчитать величину параметра обработки в конкретный момент времени, предлагаем следующий подход.

Время функционирования процесса обработки разбивается на интервалы  $\Delta t$  (рис.14):

$$\Delta\tau = \frac{\tau_c}{n_{p.t.}}, \quad (42)$$

где  $n_{p.t.}$  – число расчётных точек.

Выходные и текущие параметры процесса определяются для моментов времени  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{max}$  ( $\tau_{max}$  – максимальное время функционирования процесса) [98, 117].

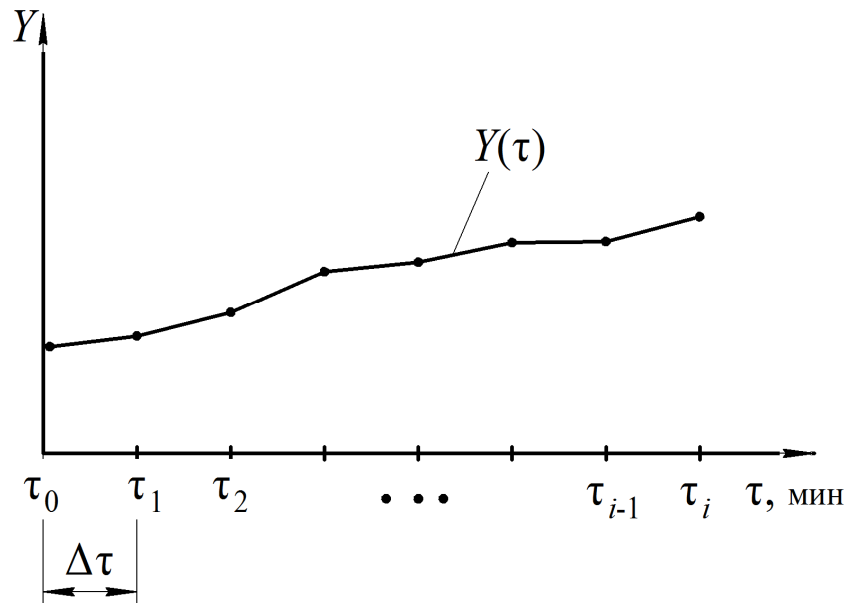


Рисунок 14 – Кривая изменения выходного параметра  $Y$  в зависимости от времени  $\tau$

При расчёте температуры в начальный момент времени  $\tau_0$  принимаем, что износ инструмента  $h_{и0} = 0$ . Рассчитанное значение температуры используется для определения физико-механических свойств материала заготовки, составляющих силы резания и величины выходных контролируемых параметров на отрезке времени  $\tau_0 \dots \tau_1$ . Затем определяется износ инструмента в момент времени  $\tau_1$ :

$$h_{и1} = U_{0,1} \cdot \Delta\tau, \quad (43)$$

где  $U_{0,1}$  – интенсивность изнашивания инструмента на отрезке времени  $\tau_0 \dots \tau_1$ , мкм/с;  $\Delta\tau$  – интервал времени, с.

Силы и температуры в момент времени  $\tau_1$  рассчитывают, используя в расчёте значение износа, равное  $h_{и1}$ . Силы и температуры, рассчитанные для момента времени  $\tau_1$ , используем для расчёта интенсивности изнашивания

инструмента  $U_{1,2}$  на отрезке времени  $\tau_1 \dots \tau_2$ , затем рассчитывается износ инструмента в момент времени  $\tau_2$  по формуле:

$$h_{\tau_2} = U_{0,1} \cdot \Delta\tau + U_{1,2} \cdot \Delta\tau. \quad (44)$$

В момент времени  $\tau_k$  износ инструмента:

$$h_{\tau_k} = \sum_{i=1}^{i=k} U_{i-1,i} \cdot \Delta\tau, \quad (45)$$

где  $U_{i-1,i}$  – интенсивность изнашивания инструмента на  $i$ -м отрезке времени, мкм/с ( $i = 1, \dots, k$ ).

Ниже приведена методика, разработанная с целью решения двух задач:

- 1) коррекции (подстройки) математических моделей процесса;
- 2) выбора интервала варьирования управляемыми параметрами с целью назначения рационального режима точения.

Для коррекции режима резания требуется дополнительная информация. Необходимо разработать план варьирования управляемыми параметрами таким образом, чтобы имелась возможность получить дополнительную информацию для коррекции режима резания и приблизить управляемые параметры к оптимальному значению.

При функционировании процесса должны выполняться технические ограничения (35) – (41).

На первом этапе мы используем математические модели процесса, связывающие его выходные параметры  $Y_i$  с управляемыми ( $X_j$ ), а также неуправляемыми ( $Z_k$ ) и неконтролируемыми ( $W_n$ ) параметрами. Затем создаём систему ограничений следующего вида:

$$Y_i^{\max} \geq Y(X_j, Z_k, W_n); \quad Y_i^{\max} \leq Y(X_j, Z_k, W_n), \quad (46)$$

где  $Y_i^{\max}$  – заданное значение выходного параметра;  $Y(X_j, Z_k, W_n)$  – фактическое значение выходного параметра при определённом сочетании элементов режима и условий обработки.

Ограничения могут иметь следующий вид:

$$Ra^{max} \geq Ra(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots; W_1, W_2, \dots, W_i, \dots); \quad (47)$$

$$\omega^{max} \geq \omega(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots; W_1, W_2, \dots, W_i, \dots); \quad (48)$$

$$\tau_c^{max} \leq \tau_c(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots; W_1, W_2, \dots, W_i, \dots), \quad (49)$$

где  $Ra^{max}$  – заданное значение параметра шероховатости, мкм;  $\omega^{max}$  – заданное значение погрешности размера, мм;  $\tau_c^{max}$  – заданный период стойкости режущего инструмента, мин.

Обозначим элементы режима, полученные в результате расчёта или назначенные в соответствии с нормативами, как  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_{j'}^0$ , где  $j'$  – количество переменных, применяемых для управления процессом резания. Для принятия решения о целесообразности проведения коррекции режима, необходимо провести сравнение фактических значений выходных параметров  $Y_i^{0\Phi}$ , которые были зафиксированы при данных элементах режима, с их расчётными значениями  $Y_i^{0P}$  [101, 105]:

$$Y_i^{0P} = f(X_1^0, \dots, X_{j'}^0, \dots, X_j, Z_k, W_n), \quad (50)$$

где  $j$  – число управляемых входных параметров процесса.

Очевидно, что, если  $\frac{Y_{i0}^P - Y_{i0}^\Phi}{Y_{i0}^P} > \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданная величина. Приняли

$\varepsilon = 0,1$ , т. е. если разность между расчётными и фактическими значениями данного параметра превышает 10% , то потребуются коррекция режима резания. Значение  $\varepsilon = 0,1$  приняли с целью компенсации погрешности, вносимой средствами и методами измерения.

Вводим понятия резерв (запас) выходных параметров процесса точения. Резерв (запас) – это разница между заданным значением какого-либо выходного параметра  $Y_i^{max}$  и его расчётным  $Y^P$  либо фактическим значением  $Y^\Phi$ . Разность  $(Y_i^{max} - Y^P)$  – это расчётный резерв, а  $(Y_i^{max} - Y^\Phi)$  – фактический резерв [101, 105].

Если фактическое (расчётное) значение выходного параметра не достигло заданного значения, то резерв считаем положительным; если фактическое (расчётное) значение выходного параметра превышает заданное

значение – отрицательным.

Так для параметра шероховатости  $Ra$ , резерв следует считать положительным, если расчётное либо фактическое значение  $Ra$  меньше его заданного значения  $Ra^{max}$ , т.е., если либо  $Ra^P < Ra^{max}$ , либо  $Ra^\Phi < Ra^{max}$ . В обратном случае резерв считаем отрицательным.

Аналогично определяется понятие положительного и отрицательного резерва и для других текущих показателей и выходных параметров, за исключением периода стойкости режущего инструмента. Для периода стойкости РИ резерв является положительным, если  $\tau^P (\tau^\Phi) > \tau^{max}$  и отрицательным, если наоборот. При оптимальных значениях управляемых параметров один или несколько резервов равны нулю, остальные – не достигают заданного значения.

При обработке возможны следующие ситуации:

- 1) Все фактические резервы положительные.
- 2) Все резервы либо часть резервов окажутся отрицательными.
- 3) Один или несколько фактических резервов будут равны нулю, а остальные все же будут положительными.

Для каждой из вышеперечисленных ситуаций будет разработан план варьирования управляемыми параметрами.

## **2.2. Разработка плана варьирования управляемыми параметрами для различных вариантов соотношений между фактическими и заданными значениями выходных параметров**

### **2.2.1. Коррекция режима резания при положительных значениях резервов**

В точке пространства управляемых переменных  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_k^0$ , следует разложить математические модели процесса механической обработки в ряд



Тейлора и исключить члены второго и более высоких порядков.

Для упрощения расчёта требуется провести линейную аппроксимацию математических моделей и привести их к единому виду, путём исключения членов более высшего порядка. Возможность исключения идёт из того, что расчётные значения управляемых параметров  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_{k'}^0$  как правило, будут близки к их оптимальным значениям.

Математические модели – ограничения примут вид [98, 101]:

$$Y_i = Y_i^{\text{OP}} + \left( \frac{dY_i}{dX_1} + \dots + \frac{dY_i}{dX_{k'}} \right) \cdot (\Delta X_1, \dots, \Delta X_{k'}) \quad (51)$$

или

$$Y_i = Y_i^{\text{OP}} + \frac{dY_i}{dX_1} \cdot \Delta X_1 + \dots + \frac{dY_i}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'}. \quad (52)$$

Используем обозначения [98, 105]:

$$Y_i^{\text{OP}} = b_{i0}; \quad \frac{dY_i}{dX_1} = b_{i1}, \dots, \frac{dY_i}{dX_{k'}} = b_{ik'}. \quad (53)$$

Получим:

$$Y_i = b_{i0} + b_{i1} \cdot \Delta X_1 + \dots + b_{ik'} \cdot \Delta X_{k'}. \quad (54)$$

Таким образом, нелинейные зависимости, описывающие математические модели процесса, с учетом корреляционной независимости параметров, в узкой области, близкой к оптимальному значению, будут заменены линейными уравнениями.

Для обеспечения оптимальных режимов резания необходимо, чтобы один из резервов был равен или близок к нулю, а входные параметры следует изменять таким образом, чтобы на каждой последующей итерации резерв уменьшался и стремился к нулю. Это позволит сузить область вариации управляемых параметров, приближая их к их оптимальным значениям.

Для нахождения коэффициентов линейного уравнения необходимо провести не менее двух экспериментов, в которых изменяются значения каждого управляемого параметра. Так как значения выходных параметров

$Y_i^{0\Phi}$  уже известны в точке с заданными координатами  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_{k'}^0$ , для адаптации моделей необходимо добавить еще одно значение к каждому из управляемых параметров. Это означает, что эксперимент следует провести еще в  $k'$  дополнительных точках.

В процессе варьирования управляемыми параметрами, предполагаемый резерв, который стремится к нулю (равный  $Y_0^{max} - Y_0^{0\Phi}$ ), может быть разделен на  $k'$  интервалов при положительных значениях остальных резервов. Для того, чтобы величина соответствующего выходного параметра изменилась на величину  $(Y_0^{max} - Y_0^{0\Phi})/k'$ , необходимо определить интервал изменения каждого из управляемых параметров  $\Delta X_j$ .

Для достижения этого определяются управляющие воздействия, которые в совокупности приведут к сведению резерва выходного параметра  $Y_1$  к нулю [101, 116]:

$$\Delta X_{j1} = \frac{Y_1^{max} - Y_1^{0\Phi}}{k' \cdot \frac{dY_1}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (55)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса (рекомендуемое значение коэффициента запаса  $k_3$ : при варьировании одним управляемым параметром – 1,1; при варьировании двумя управляемыми параметрами – 1,2);  $dY_1/dX_j$  – частная производная, показывающая степень влияния  $j$ -го управляемого фактора на выходной параметр  $Y_1$ . На данном этапе производные, связывающие выходные параметры с входными, получают дифференцированием математических зависимостей.

Рассмотрим ситуацию, когда в качестве первого выходного параметра используется параметр шероховатости  $Ra$ , а в качестве управляемых параметров – скорость резания  $V$  и подача  $S_{об}$ , т.е.  $k' = 2$ , то интервалы варьирования управляемыми параметрами рассчитывают по зависимостям [101, 109]:

$$\Delta V_{Ra} = \frac{Ra^{max} - Ra^{0\Phi}}{2 \cdot \frac{dRa}{dV} \cdot k_3}; \quad (56)$$

$$\Delta S_{обRa} = \frac{Ra^{max} - Ra^{0\Phi}}{2 \cdot \frac{dRa}{dS_{об}} \cdot k_3}. \quad (57)$$

Затем следует оценить, каким образом изменение значений управляемых параметров отразится на величине второго выходного параметра  $Y_2$ ,

$$\Delta Y_2 = \frac{dY_2}{dX_1} \cdot \Delta X_{j1} + \dots + \frac{dY_2}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'}, \quad (58)$$

и сравнить  $\Delta Y_2$  с резервом этого параметра.

Если  $\Delta Y_2 < (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , то рассчитываем как изменится выходной параметр  $Y_3$ , используя в соответствующем математическом выражении интервал варьирования  $\Delta X_{j1}$ .

Если  $\Delta Y_2 > (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , то следует определить управляющие воздействия, которые сведут к нулю резерв этого параметра:

$$\Delta X_{j2} = \frac{Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi}}{k' \cdot \frac{dY_2}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (59)$$

а при определении интервала изменения параметра  $Y_3$  использовать значения  $\Delta X_{j2}$ .

Если  $\Delta Y_2 = (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , то при расчёте  $\Delta Y_3$  можно использовать как  $\Delta X_{j1}$ , так и  $\Delta X_{j2}$ .

Можно вычислить выходной параметр  $Y_0$  и его расчётный резерв, который сведётся к нулю при положительных резервах других выходных параметров.

Применяемые во время отладки процесса управляющие воздействия, будут определены по зависимости:

$$\Delta X_{j0} = \frac{Y_0^{max} - Y_0^{0\Phi}}{k' \cdot \frac{dY_0}{dX_j} \cdot k_3}. \quad (60)$$

При выборе интервала варьирования управляемыми параметрами необходимо установить, являются ли определённые интервалы (рассчитанные по формуле (60)), приемлемыми.

Расположение точек плана при изменении двух управляемых параметров ( $S_{об}$  и  $V$ ) показано на рис. 15. Перед началом обработки заготовок элементы режима ( $S_{об}^0$  и  $V^0$ ) определяются в соответствии с нормативами, рассчитываются или выбираются из каталога инструмента. После этого контролируются выходные параметры.

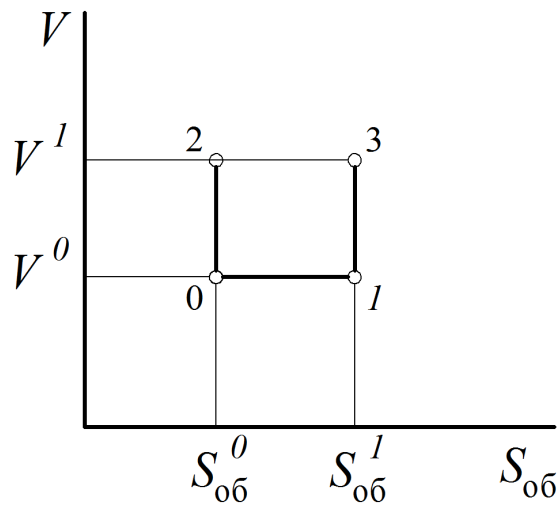


Рисунок 15 – Расположение точек плана варьирования управляемыми параметрами  $S_{об}$  и  $V$  [109]

Если принято решение в процессе коррекции режима изменить подачу  $S_{об}$ , на плане варьирования получим точку 1. Если фактические значения выходных параметров в этой точке значительно отличаются от прогнозируемых значений в сторону увеличения, то обработка заготовок будет проводиться при подаче  $S_{об}^0$  и скорости  $V^1$  (точка 2 на рис. 15). Если значения выходных параметров в точке 1 не превышают прогнозируемых значений, то обработка будет осуществляться при подаче  $S_{об}^1$  и скорости  $V^1$  (точка 3). Скорректированный режим резания будет ближе к оптимальному, чем предварительно назначенный [108].

Если требуется, то выполняют следующие шаги коррекции. На следующих этапах коррекции режима резания для расчёта производных  $dY_i/dX_j$  используют фактические значения выходных параметров. Эти шаги коррекции повторяются, пока один из выходных параметров не приблизится к заданному значению.

Минимальное значение интервала варьирования  $\Delta X_{jmin}$  должно быть таким, чтобы ожидаемое значение выходного параметра  $\Delta Y_i$  было не менее заданного доверительного интервала [4, 63].

Разница между средними арифметическими значениями какого-либо выходного параметра считается достоверной при выполнении условия:

$$\Delta Y_i \geq K_N \cdot \bar{W} / d_n, \quad (61)$$

где  $\Delta Y_i$  – интервал изменения или разность средних арифметических выходного параметра  $Y_i$ ;  $K_N$  и  $d_n$  – коэффициенты [63];  $\bar{W}$  – средний размах варьирования по всем совокупностям.

Учитывая зависимость (55):

$$\Delta Y_i = \frac{dY_0}{dX_j} \cdot \Delta X_j \geq K_N \cdot \bar{W} / d_n, \quad (62)$$

или

$$\Delta X_j = \frac{K_N \cdot \bar{W}}{d_n \cdot \frac{dY_0}{dX_j}}. \quad (63)$$

Зависимость (63) определяет минимальный интервал изменения параметра, рассчитанного по формуле (60).

Если это условие выполнено, последовательность дальнейших действий следующая.

Рассчитываем новое значение управляемого параметра  $X_1^1$  [101, 105]:

$$X_1^1 = X_1^0 + \Delta X_1. \quad (64)$$

После этого проводится обработка заготовок при значениях управляемых параметров  $X_1^1, X_2^0, \dots, X_k^0$ . Затем на величину  $\Delta X_2$  изменяется параметр  $X_2$ :

$$X_2^1 = X_2^0 + \Delta X_2. \quad (65)$$

Далее следует обработка заготовок при значениях управляемых параметров  $X_1^1, X_2^1, X_3^0, \dots, X_k^0$ .

Продолжая аналогичные действия, получаем значения параметров  $X_1^1, X_2^1, \dots, X_k^1$ . Расположение точек плана варьирования при двух управляемых параметрах ( $X_1$  и  $X_2$ ) показано на рис. 16.

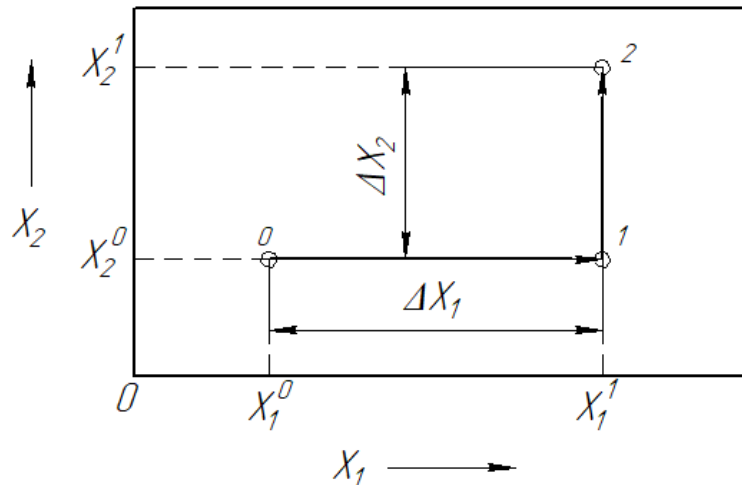


Рисунок 16 – Расположение точек плана при варьировании двумя управляемыми параметрами [101, 105]

Зависимости для расчёта производных, аргументами которых являются фактические значения выходных параметров, будут иметь следующий вид:

$$\frac{dY_0}{dX_j} = \frac{Y_0^{1\phi} - Y_0^{0\phi}}{X_j^{1\phi} - X_j^{0\phi}}. \quad (66)$$

Необходимо иметь в виду, что зависимость (60) включает частные производные, полученные дифференцированием математических зависимостей, поэтому вероятно, что величины  $\Delta Y_i$ , рассчитанные исходя из значений производных, рассчитанных с использованием фактических значений контролируемых параметров, окажутся меньше определённых по зависимости (61). В таком случае необходимо увеличить интервал  $\Delta X_j$  до приемлемой величины.

Если же фактические значения  $\frac{dY_0}{dX_j}$  окажутся большими, чем

ожидаемые, вероятно, что после варьирования  $j$ -м управляемым фактором ( $j < k'$ ) запас (резерв) по параметру  $Y_0$  уменьшится настолько, что окажется меньше величины  $(Y^{max} - Y^{0\Phi})/k'$ .

Поэтому, если в точке  $j+1$  управляемые параметры примут значения  $X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^1, X_{j+1}^1, \dots, X_{k'}^0$ , то есть вероятность получения отрицательного резерва по параметру  $Y_0$ , поэтому обработку заготовок следует выполнить по скорректированному плану при следующих значениях управляемых параметров:

$$\begin{aligned} & X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^1, X_{j+2}^0, \dots, X_{k'}^0; \\ & X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^0, X_{j+2}^1, \dots, X_{k'}^0; \\ & X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^0, X_{j+2}^0, \dots, X_{k'}^1. \end{aligned}$$

Параметр  $Y_0$ , который предположительно будет сведён к нулю при положительных резервах остальных выходных параметров, также определяется на основе расчётов по исходным уравнениям. Если эти уравнения некорректны, то в процессе коррекции режима параметр  $Y_0$  может быть заменён другим выходным параметром, который мы обозначим как  $Y_{0\Phi}$ .

Для предотвращения возникновения брака по  $Y_{0\Phi}$ , необходимо, чтобы резерв  $Y_{0\Phi}$  после изменения  $j$ -го управляемого параметра (где  $j = 1 \dots k' - 1$ ) был больше либо равен значению  $(Y_{0\Phi}^{max} - Y_{0\Phi}^{0\Phi})/k'$ :

$$(Y_{0\Phi}^{max} - Y_{0\Phi}^{j\Phi}) \geq (Y_{0\Phi}^{max} - Y_{0\Phi}^{0\Phi})/k', \quad (67)$$

где  $Y_{0\Phi}^{max}$  – заданное значение параметра  $Y_{0\Phi}$ ;  $Y_{0\Phi}^{j\Phi}$ ,  $Y_{0\Phi}^{0\Phi}$  – значения этого же параметра после варьирования  $j$ -ым управляемым параметром и после расчёта режима (в точке 0 плана по рис.16).

При невыполнении условия (67) рекомендуется отказаться от исходного плана и проводить эксперименты с измененным планом, используя управляемые параметры с порядковым номером  $j+1$  и выше, как было указано ранее.

Для того, чтобы выявить параметр  $Y_{0\Phi}$ , после варьирования параметром  $X_j$ , т.е. в каждой точке плана, следует провести проверки по всем выходным

параметрам:

$$(Y_{i\phi}^{max} - Y_{i\phi}^{j\phi}) \geq ((Y_{i\phi}^{max} - Y_{i\phi}^{0\phi}) \cdot (k' - j)) / k'. \quad (68)$$

Для внесения коррекции в план экспериментов необходимо проверить, соблюдаются ли условия для одного или нескольких параметров, описанных выше. Расположение точек скорректированного плана при двух управляемых параметрах ( $X_1$  и  $X_2$ ) показано на рисунке 17.

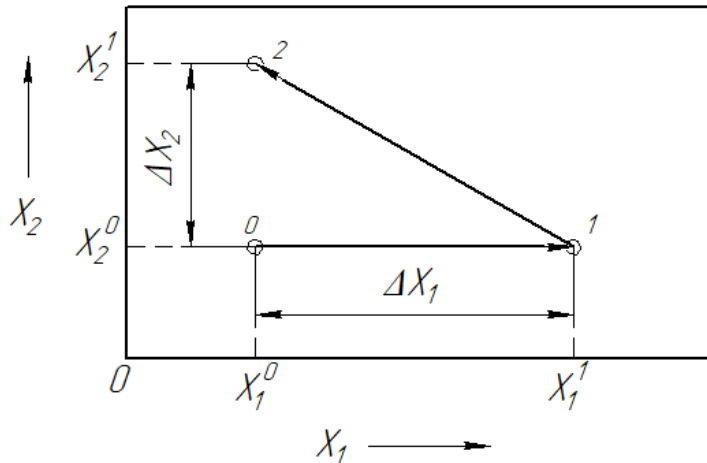


Рисунок 17 – Расположение точек скорректированного плана при отладке процесса и варьировании двумя управляемыми параметрами [105]

Коэффициенты  $b_0, b_1, \dots, b_{k'}$  уравнения (54) рассчитывают, используя фактические значения выходных параметров. Коэффициент  $b_0$  – это среднее арифметическое из значений выходного параметра во всех точках плана:

$$b_0 = \frac{Y^{0\phi} + Y^{1\phi} + \dots + Y^{k'\phi}}{1 + k'}, \quad (69)$$

где  $Y^{0\phi}, Y^{1\phi}, \dots, Y^{k'\phi}$  – фактические (измеренные) значения выходного параметра в точках  $0, 1, \dots, k'$  соответственно.

Определение коэффициентов  $b_1, b_2, \dots, b_{k'}$  возможно только в том случае, если план не испытал корректировок и соблюдены соответствующие зависимости [105]:

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}; \quad (70)$$

$$b_2 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{1\phi}}{X_2^1 - X_2^0}; \quad (71)$$



...

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{k'-1\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0}. \quad (72)$$

После варьирования первым параметром и изменении плана целесообразно использовать зависимости:

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}; \quad (73)$$

$$b_2 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_2^1 - X_2^0}; \quad (74)$$

...

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0}. \quad (75)$$

После варьирования  $j$ -ым управляемым параметром (если план был скорректирован):

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}; \quad (76)$$

$$b_2 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{1\phi}}{X_2^1 - X_2^0}; \quad (77)$$

...

$$b_j = \frac{dY_i}{dX_j} = \frac{Y_i^{j\phi} - Y_i^{j-1\phi}}{X_j^1 - X_j^0}; \quad (78)$$

$$b_{j+1} = \frac{dY_i}{dX_{j+1}} = \frac{Y_i^{j+1\phi} - Y_i^{j\phi}}{X_{j+1}^1 - X_{j+1}^0}; \quad (79)$$

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{j-1\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0}. \quad (80)$$

В работе [109] представлен иной подход, когда определяли величину коррекции  $\Delta X_{ji}$  управляемого параметра (подачи  $S_{об}$  и/или скорости резания  $V$ ), а для реализации принимали его минимальное значение:

$$\Delta X_j = \min[\Delta X_{ji}] \quad (81)$$

Методика коррекции, приведённая в работах [108, 109], предполагает

выполнение меньшего объема расчётов. Однако, она позволяет учесть влияние лишь одного из управляемых параметров, который оказывает наибольшее влияние на контролируемый параметр (шероховатость, погрешность диаметрального размера и др.). Представленная выше методика коррекции позволяет учесть влияние всех управляемых параметров посредством расчёта коэффициентов  $b_i$ .

Аналогичную методику необходимо разработать и для случая, когда часть резервов или все они являются отрицательными.

### 2.2.2. Коррекция режима резания при отрицательных значениях резервов

Ниже приведена последовательность действий при ситуации, когда часть резервов или все они являются отрицательными. Выше отмечалось, что при отладке процесса управляемым параметрам следует придавать значения из области, близкой к их оптимальному значению и исключающие появление брака по любому из выходных параметров.

Воспользовавшись исходными математическими моделями, определим коррекцию, которую необходимо внести в управляемые параметры при отрицательных запасах (резервах).

Предположим, что отрицательные резервы имеют место по выходным параметрам  $Y_1, Y_2, \dots, Y_l$ . Определим интервал изменения управляемого параметра  $X_j$ , применение которых позволит свести к нулю резерв выходного параметра  $Y_1$  [101, 109]:

$$\Delta X_{j1} = \frac{Y_1^{max} - Y_1^{0\Phi}}{k' \cdot \frac{dY_1}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (82)$$

и используем полученные значения  $\Delta X_{j1}$  в математических моделях для расчёта интервала изменения второго выходного параметра  $Y_2$ :

$$\Delta Y_2 = \frac{dY_2}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_2}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'1}, \quad (83)$$

затем сравниваем  $\Delta Y_2$  с отрицательным резервом этого параметра.

Если  $\Delta Y_2 > (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , то управляющее воздействие, определённое по зависимости (82), обеспечит положительный резерв параметра  $Y_2$ , поэтому следует определить интервал изменения выходного параметра  $Y_3$ . Для определения интервала изменения выходного параметра  $Y_3$  необходимо использовать значение  $\Delta X_{j1}$  в соответствующей математической модели:

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_3}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'1}. \quad (84)$$

Если  $\Delta Y_2 < (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , т. е. резерв по этому параметру останется отрицательным, следует рассчитать интервал изменения управляемого параметра, которые сведут к нулю резерв второго параметра:

$$\Delta X_{j2} = \frac{Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi}}{k' \cdot \frac{dY_2}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (85)$$

а при определении  $\Delta Y_3$  использовать значения  $\Delta X_{j2}$ , т. е.:

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{12} + \dots + \frac{dY_3}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'2}. \quad (86)$$

Если  $\Delta Y_2 = (Y_2^{max} - Y_2^{0\Phi})$ , то при определении  $\Delta Y_3$  можно использовать как  $\Delta X_{j1}$ , так и  $\Delta X_{j2}$ .

Продолжая аналогичные действия с остальными параметрами, запасы которых является отрицательным, можно выявить выходной параметр  $Y_0$ , резерв которого вероятно будет равен нулю, в то время как остальные параметры будут иметь положительные значения резервов (запасов), или равные нулю.

Управляющие воздействия  $\Delta X_{j0}$ , которые позволят свести к нулю резерв параметра  $Y_0$ , можно определить по формуле (60). Однако, если использовать эти значения  $\Delta X_{j0}$  в качестве управляющего воздействия, то вследствие того, что фактическое значение  $\Delta Y_0$  может оказаться меньше расчётного значения, при отладке процесса отрицательный запас может

сохраниться. Кроме того, место  $Y_0$  может занять другой параметр  $Y_{0\phi}$ .

Для предотвращения получения бракованных деталей при отладке процесса, управляющие воздействия должны быть такими, чтобы обеспечить положительный запас по параметру  $Y_0$ . Данный положительный запас должен быть таким, чтобы на следующих этапах отладки процесса была возможность варьировать входными параметрами с целью уточнения математических моделей.

Абсолютное значение интервала варьирования управляющего воздействия следует определить по формуле:

$$Abs|\Delta X_{j0}| = Abs \left| \frac{Y_0^{max} - Y_0^{0\phi}}{k' \frac{dY_0}{dX_j}} \right| + Abs \left| \frac{K_N \cdot \bar{W}}{d_n \cdot \frac{dY_0}{dX_j}} \right|. \quad (87)$$

Знак управляющего воздействия совпадает со знаком первого слагаемого.

Если расчётное и фактическое значение  $\Delta Y_0$  существенно отличаются, причём фактическое значение меньше расчётного, после применения управляющего воздействия, определённого по формуле (87), может сохраниться отрицательный запас по одному или нескольким выходным параметрам. Следовательно, в зависимость для расчёта величины управляющего воздействия должна быть внесена поправка, которая позволит исключить отрицательные резервы на последующих этапах отладки процесса.

Ожидаемое (расчётное) изменение параметра  $Y_0$  составит:

$$\Delta Y_0 = \frac{dY_0}{dX_1} \cdot \Delta X_{10} + \dots + \frac{dY_0}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'0}. \quad (88)$$

Фактическое значение изменения параметра  $Y_0$ :

$$\Delta Y_0^\phi = Y_{0_\phi} - Y_{0_\phi}^{0\phi}, \quad (89)$$

где  $Y_{0_\phi}^{0\phi}$  - фактическое значение параметра  $Y_0$  после изменения управляемых факторов на величину, определяемую по формуле (87). Точка плана,

полученная после соответствующего изменения управляемых параметров, обозначена через  $0'$ .

Если отношение этих величин обозначить через  $k_{\pi} = (\Delta Y_0 / \Delta Y_0^{\Phi})$ , то абсолютное значение последующего управляющего воздействия:

$$Abs|\Delta X_{j0}| = Abs \left| \frac{Y_0^{max} - Y_0^{0'\Phi}}{k' \frac{dY_0}{dX_j}} \right| \cdot k_n + Abs \left| \frac{K_N \cdot \bar{W}}{d_n \cdot \frac{dY_0}{dX_j}} \right| \cdot k_n. \quad (90)$$

Следует отметить, что после получения фактических значений выходных параметров в точке  $0'$  место параметра  $Y_0$  может занять другой параметр ( $Y_{0\Phi}$ ), а для его идентификации следует провести вычисления, аналогичные вышеприведённым.

### 2.2.3. Коррекция режима резания при значениях резервов, равных или близких к нулю

Если один или несколько резервов равны нулю при положительных значениях остальных, то управляемые параметры весьма близки к оптимальному значению. Для этого случая необходимо разработать план варьирования управляемыми параметрами с целью адаптации математических моделей. Для обеспечения изменения выходных параметров на величину доверительного интервала необходимо, чтобы интервал варьирования каждого управляемого параметра был достаточным (минимальная величина интервала варьирования рассчитывается по формуле (63)).

Выходные параметры процесса следует контролировать при следующих значениях управляемых параметров:

$$X_1^1, X_2^0, \dots, X_j^0, \dots, X_{k'}^0;$$

$$X_1^0, X_2^1, \dots, X_j^0, \dots, X_{k'}^0;$$

$$X_1^0, X_2^0, \dots, X_j^0, \dots, X_{k'}^1.$$

Для каждого параметра в расчётах используется максимальное значение  $\Delta X$ . Если фактическое изменение какого-либо выходного параметра окажется меньше заданного доверительного интервала (не выполняется условие  $\Delta Y_i \geq K_N \cdot \bar{W} / d_n$ ), то интервал варьирования управляемых параметров, входящих в зависимость для расчёта этого параметра, следует увеличить.

Коэффициенты адаптированных уравнений следует определить по формулам:

$$b_{i0} = \frac{Y_i^{0\phi} + Y_i^{1\phi} + \dots + Y_i^{k'\phi}}{1 + k'}; \quad (91)$$

$$b_{i1} = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}; \quad (92)$$

...

$$b_{ik'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0}. \quad (93)$$

Изложенный выше подход следует использовать в том случае, если расчётные резервы (или один из них) близки к нулю, т.е.:

$$Y_i^{max} - Y^{0p} \leq \varepsilon_1, \quad (94)$$

где  $\varepsilon_1$  – заданная величина;  $Y^{0p}$  – расчётное значение выходного параметра в точке «0».

Если  $(Y_i^{max} - Y^{0p}) > \varepsilon_1$ , то можно прогнозировать следующие две ситуации:

1. Все фактические резервы являются положительными;
2. Все фактические резервов или их часть являются отрицательными.

В первом случае на  $k'$  интервалов следует разделить резерв, который при варьировании управляемыми параметрами станет равным расчётному, а  $\Delta X_j$  должен быть таким, чтобы соответствующий выходной параметр изменился на величину, равную  $(Y_0^{0p} - Y_{0\phi}^{0\phi})/k'$ .

Для данного случая зависимость (55), в частности примет вид:

$$\Delta X_{j1} = \frac{Y_1^{0p} - Y_1^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dY_0}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (95)$$

а значения  $\Delta Y$  следует сравнивать с величинами  $(Y_i^{0p} - Y_i^{0\phi})$ . При положительной разнице между фактическими и расчётными резервами остальных выходных параметров, выявляется такой выходной параметр  $Y_0$ , фактический резерв которого станет равным расчётному. Таким образом, формула (60) будет иметь следующий вид:

$$\Delta X_{j0} = \frac{Y_0^{0p} - Y_0^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dY_0}{dX_j} \cdot k_3}. \quad (96)$$

Если все или некоторые из фактических резервов станут отрицательными, следует, в первую очередь, выявить управляющее воздействие, применение которого позволит сравнить фактический и расчётный резервы параметра  $Y_1$ :

$$\Delta X_{j1} = \frac{Y_1^{0p} - Y_1^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dY_1}{dX_j} \cdot k_3}. \quad (97)$$

Последовательность дальнейших действий не отличается от изложенной выше для случая, когда  $(Y_i^{max} - Y_i^{0p}) \leq \varepsilon_1$ .

В результате выявляется выходной параметр  $Y_0$ , фактический резерв которого сравнивается с расчётным при положительных резервах остальных параметров.

Зависимость (96) для расчёта интервала изменения управляемого параметра примет вид:

$$Abs|\Delta X_{j0}| = Abs \left| \frac{Y_0^{0p} - Y_0^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dY_0}{dX_j}} \right| \cdot k_n + Abs \left| \frac{K_N \cdot \bar{W}}{d_n \cdot \frac{dY_0}{dX_j}} \right|. \quad (98)$$

Была разработана методика коррекции режима обработки и план варьирования управляемыми параметрами для различных ситуаций.

Методики, представленные в пунктах 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3, применимы лишь для случая малой наработки инструмента, когда его износом можно пренебречь. При значительной наработке инструмента (обработка большой партии заготовок) необходимо учитывать изменение во времени текущих и выходных параметров процесса.

### **2.3. Методика коррекции режима резания, учитывающая с изменение параметров процесса обработки с увеличением времени наработки инструмента**

Систематические и случайные факторы вызывают изменение параметров процесса обработки с течением времени. Для определения этих параметров в любой момент времени используется методика расчёта взаимосвязанных выходных и текущих показателей процесса обработки, основанная на разработке алгоритма его функционирования. Однако, данная методика не позволяет получить в явном виде уравнение, которое связывает выходные параметры процесса с временем работы инструмента и входными параметрами режима обработки. Поэтому мы подбираем зависимости, описывающие изменение расчётного значения  $i$ -го выходного параметра  $Y_{pi}$  в зависимости от времени  $\tau$  [105]:

$$Y_{pi}(\tau) = A_{0pi} + A_{1pi} \cdot \tau + \dots + A_{Spi} \cdot \tau^S, \quad (99)$$

где  $A_{0pi}, \dots, A_{Spi}$  – коэффициенты;  $\tau$  – время.

Полином первой степени имеет вид:

$$Y_{pi}(\tau) = A_{0pi} + A_{1pi} \cdot \tau. \quad (100)$$

В начальный момент времени  $\tau_0$  расчётное значение  $i$ -го параметра представлено коэффициентом  $A_{0pi}$ , а интенсивность изменения этого параметра во времени характеризует коэффициент  $A_{1pi}$ . При определении режима резания обычно стремятся обеспечить минимальное значение периода стойкости инструмента  $\tau_c$  [102]. Если в момент времени  $\tau = \tau_c$  при назначенных режимах  $X_j^{0p}$  значение хотя бы одного расчётного значения



выходного параметра превышает заданное значение этого параметра  $Y_i^{max}$ , то следует скорректировать режим обработки (рис. 18, а). Режим обработки может быть интенсифицирован, если расчётные величины выходных параметров не достигают заданных значений (рис. 18, б). Оказать воздействие на выходные параметры возможно за счёт изменения входных.

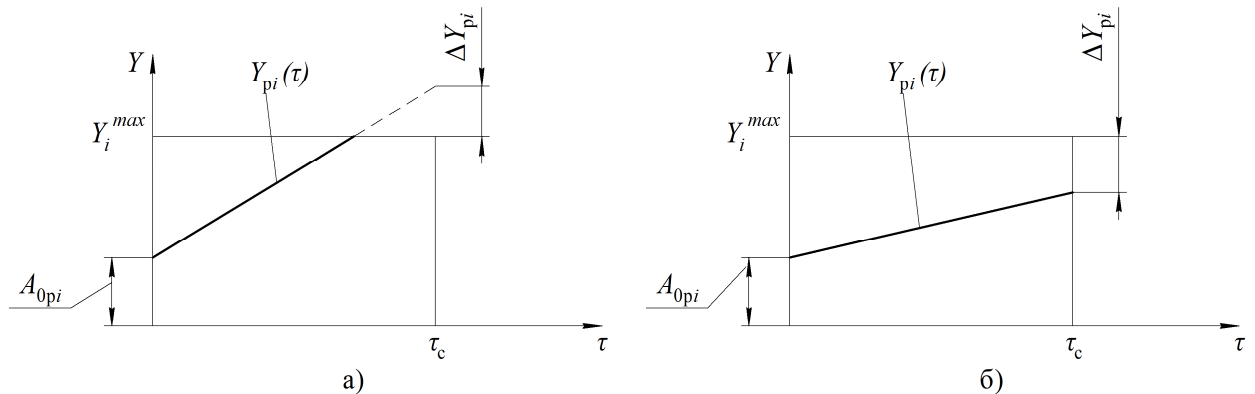


Рисунок 18 – График зависимости расчётного значения выходного параметра процесса  $Y_{pi}$  от времени  $\tau$ : а – расчётное значение выходного параметра превышает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$ ; б – расчётное значение выходного параметра не превышает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$  [102]

Рассчитаем интервал варьирования управляемыми параметрами, позволяющими изменить выходные параметры в момент  $\tau_c$  на величину  $\Delta Y_{pi}$  (см. рис. 18) [105]:

$$\Delta Y_{pi} = Y_{pi}^{\tau_c} - Y_i^{max} \quad (101)$$

или

$$\Delta Y_{pi} = Y_i^{max} - Y_{pi}^{\tau_c}, \quad (102)$$

где  $Y_{pi}^{\tau_c}$  – расчётное значение выходного параметра в момент времени  $\tau_c$ .

Изменять управляемые параметры следует так, чтобы значения выходных параметров изменились в начальный момент  $\tau = 0$ . При варьировании управляемыми параметрами изменится и интенсивность изменения выходных параметров в зависимости от времени  $\tau$  (коэффициент  $A_{1pi}$  уравнения (100)). Однако, определить интенсивность изменения выходных параметров при изменении входных возможно только в результате

моделирования процесса.

Рассчитаем интервалы варьирования управляемыми параметрами [102]:

$$\Delta X_{ji} = \frac{\Delta Y_{pi}}{k' \cdot \frac{dY_{pi}}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (103)$$

где  $k'$  – коэффициент, равный количеству управляемых параметров;  $k_3$  – коэффициент запаса (рекомендуемое значение коэффициента запаса  $k_3$ : при варьировании одним управляемым параметром – 1,8; при варьировании двумя управляемыми параметрами – 2,0);  $\Delta Y_{pi}$  – значение, на которое следует изменить  $i$ -й выходной параметр в момент времени  $\tau_c$ ;  $X_j$  – значение  $j$ -го управляемого параметра.

Рассчитывая производные  $dY_{pi}/dX_j$ , используем аналитические зависимости, позволяющие вычислить выходные параметры в определенный момент времени  $\tau_0$ .

Предварительно следует определить приоритетный выходной параметр, ориентируясь на значения которого рассчитываются величины управляющих воздействий.

Выбор приоритетного выходного параметра зависит от результата сравнения заданных и расчетных значений параметров. В результате сравнения возможно появления трех сценариев:

1. Если один из выходных параметров имеет отрицательный запас, то он автоматически выбирается в качестве приоритетного параметра. В таком случае, значения управляющих воздействий ( $\Delta V$ ,  $\Delta S_{об}$  и др.) рассчитываются таким образом, чтобы минимизировать отрицательный запас приоритетного параметра и приблизить его к нулю.

2. Если все выходные параметры имеют отрицательный запас, то в качестве приоритетного параметра выбирается тот, у которого относительный отрицательный запас больше.

3. Если все выходные параметры имеют положительный запас, то в качестве приоритетного параметра выбирается тот, у которого

относительный положительный запас меньше.

Затем следует оценить, каким образом изменение управляющих параметров (скорости резания  $V$ , подачи  $S_{об}$  и др.) отразится на величинах остальных контролируемых выходных параметров [102]:

$$\Delta Y_2 = \frac{dY_2}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_2}{dX_k} \cdot \Delta X_{k1}, \quad (104)$$

и сравнить  $\Delta Y_2$  с запасом данного параметра.

Если  $\Delta Y_2 > (Y_2^{max} - Y_2^{0ф})$ , то следует определить изменение выходного параметра  $Y_3$ , применив в соответствующей математической модели значение  $\Delta X_{j1}$ :

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_3}{dX_k} \cdot \Delta X_{k1}. \quad (105)$$

Если  $\Delta Y_2 < (Y_2^{max} - Y_2^{0ф})$ , то следует интервалы изменения управляемых параметров, которые сведут к нулю резерв второго параметра:

$$\Delta X_{j2} = \frac{Y_2^{max} - Y_2^{0ф}}{k \cdot k_3 \cdot \frac{dY_2}{dX_j}}, \quad (106)$$

а при определении  $Y_3$  использовать значения  $\Delta X_{j2}$ , т.е.:

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{12} + \dots + \frac{dY_3}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'2}. \quad (107)$$

Если  $\Delta Y_2 = (Y_2^{max} - Y_2^{0ф})$ , то при определении  $\Delta Y_3$  можно использовать как  $\Delta X_{j1}$ , так и  $\Delta X_{j2}$ . Путём проведения аналогичных действий с различными параметрами, возможно обнаружить выходной параметр  $Y_0$ , резерв которого будет сведен или приближен к нулю, в то время как другие параметры будут иметь положительные значения резервов. Моделируя процесс, управляемые параметры  $X_j$  изменяются на величину  $\Delta X_j$  и рассчитывают значения данных управляемых параметров  $X_j^{1p}$  [102]:

$$X_j^{1p} = X_j^{0p} + \Delta X_j, \quad (108)$$

где  $X_j^{0p}$  – начальные значения управляемых параметров, полученные после расчёта или назначения режима обработки.

Если при значениях управляемых параметров  $X_j^{1p}$  значения выходных параметров  $Y_{pi}^{\tau c}$  значительно отличаются от заданных  $Y_i^{max}$  в момент времени  $\tau_c$ , то необходимо повторить процедуру коррекции управляемых параметров. Для оценки влияния изменений управляемых параметров на интенсивность изменения выходных параметров следует сравнить результаты моделирования выходных параметров при начальных значениях управляемых параметров  $X_j^{0p}$  и при значениях  $X_j^{1p}$ . Если при начальных значениях входных параметров  $X_j^{0p}$  были получены коэффициенты  $A_{1pi}$ , а при значениях  $X_j^{1p}$  были получены коэффициенты  $A_{1pi}^1$ , изменение коэффициентов можно рассчитать по формуле:

$$\Delta A_{1pi} = A_{1pi} - A_{1pi}^1. \quad (109)$$

Параметр  $\Delta A_{1pi}$  характеризует изменение интенсивности изменения  $i$ -го выходного параметра от времени при изменении всех входных параметров. Относительное изменение этого коэффициента в зависимости от интервала варьирования  $j$ -ым управляемым параметром:

$$\Delta A_{1pij} = \frac{A_{1pi} - A_{1pij}^1}{X_j^{0p} - X_j^{1p}}, \quad (110)$$

где  $A_{1pij}^1$  – значение коэффициента при варьировании  $j$ -м управляемым параметром при входных параметрах  $X_j^{1p}$ ;  $X_j^{0p}$ ,  $X_j^{1p}$  – значения начального и нового значения входного параметра с номером  $j$ .

Выявление функций, описывающих изменение во времени параметров механической обработки, достигается с помощью методики статистического анализа [110, 111]. Эта методика позволяет определить средние арифметические значения параметров процесса и их изменение во времени.

Зависимость фактических значений выходных параметров от времени можно представить в виде [102]:

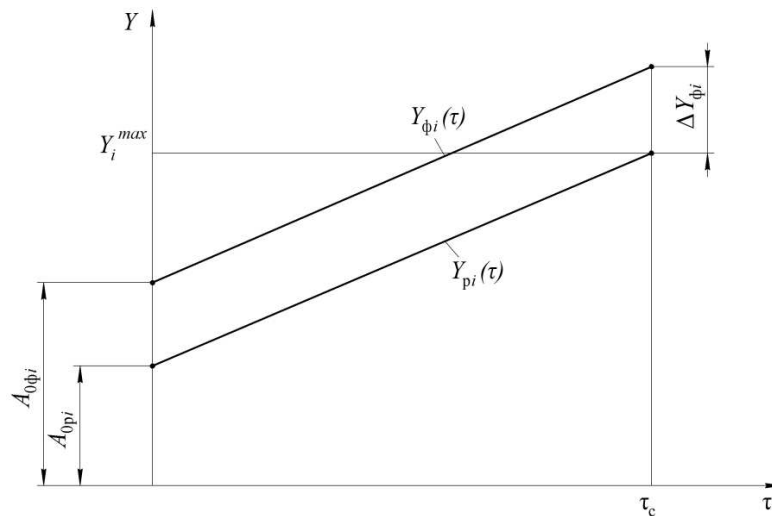
$$Y_{\varphi i}(\tau) = A_{0\varphi i} + A_{1\varphi i} \cdot \tau + \dots + A_{S\varphi i} \cdot \tau^S, \quad (111)$$

где  $A_{0\varphi i}$ ,  $\dots$ ,  $A_{S\varphi i}$  – коэффициенты;  $\tau$  – время обработки, мин.

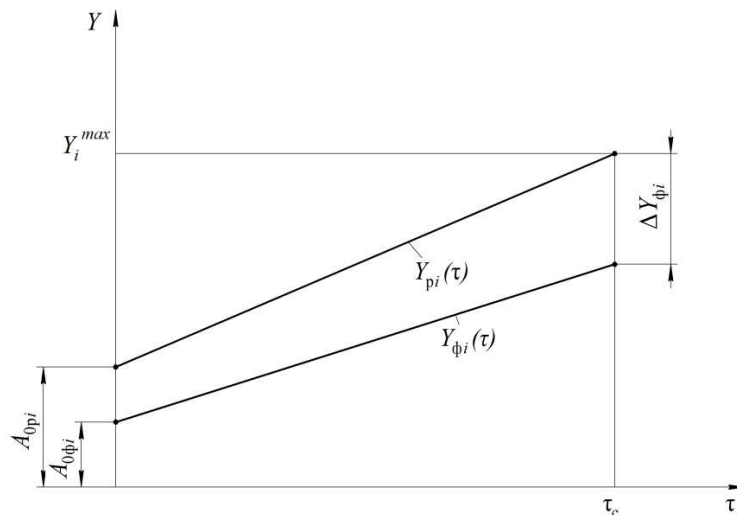
Если ограничиться полиномом первой степени, то [102]:

$$Y_{\phi i}(\tau) = A_{0\phi i} + A_{1\phi i} \cdot \tau. \quad (112)$$

В начальный момент времени  $\tau_0$  фактическое значение  $i$ -го параметра соответствует коэффициенту  $A_{0\phi i}$ , а фактическая скорость изменения  $i$ -го параметра во времени характеризуется коэффициентом  $A_{1\phi i}$  [102]. Вследствие возможной некорректности математических моделей процесса в большинстве случаев кривая изменения фактических значений выходных параметров будет отличаться от расчётной (рис. 19).



а)



б)

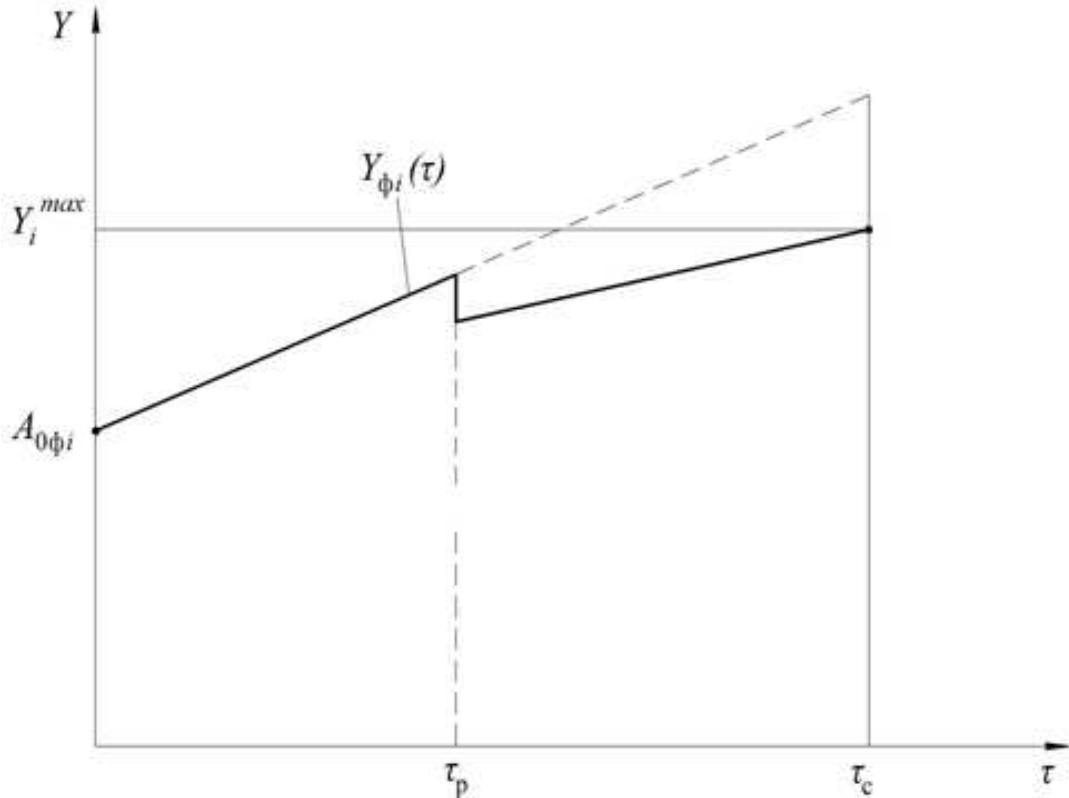
Рисунок 19 – Графики зависимости расчётного  $Y_{pi}$  и фактического  $Y_{\phi i}$  значений выходного параметра процесса от времени  $\tau$  [108]: а – фактическое значение выходного параметра превышает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$ ; б – фактическое значение выходного параметра не достигает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$

Возможны следующие сценарии [102]:

1. В ситуации, когда значение хотя бы одного выходного параметров  $Y_{\phi i}$  в момент времени  $\tau_c$  превышает заданное значение  $Y_i^{max}$ , то необходимо скорректировать режим обработки, назначив менее "жесткий", чтобы избежать появления бракованных изделий.

2. В ситуации, когда фактические значения всех выходных параметров в момент времени  $\tau_c$  не достигают требуемых (регламентированных), то целесообразно внести изменения в режим, с целью повышения производительности.

Для случая, когда экстраполяция функций, отражающих изменение выходных параметров от времени на участке  $0, \dots, \tau_p$ , показывает, что в момент времени  $\tau_c$  расчётные и фактические значения могут значительно отличаться, нецелесообразно производить обработку с назначенным режимом в течении времени  $\tau_c$  (рис. 20).



а)

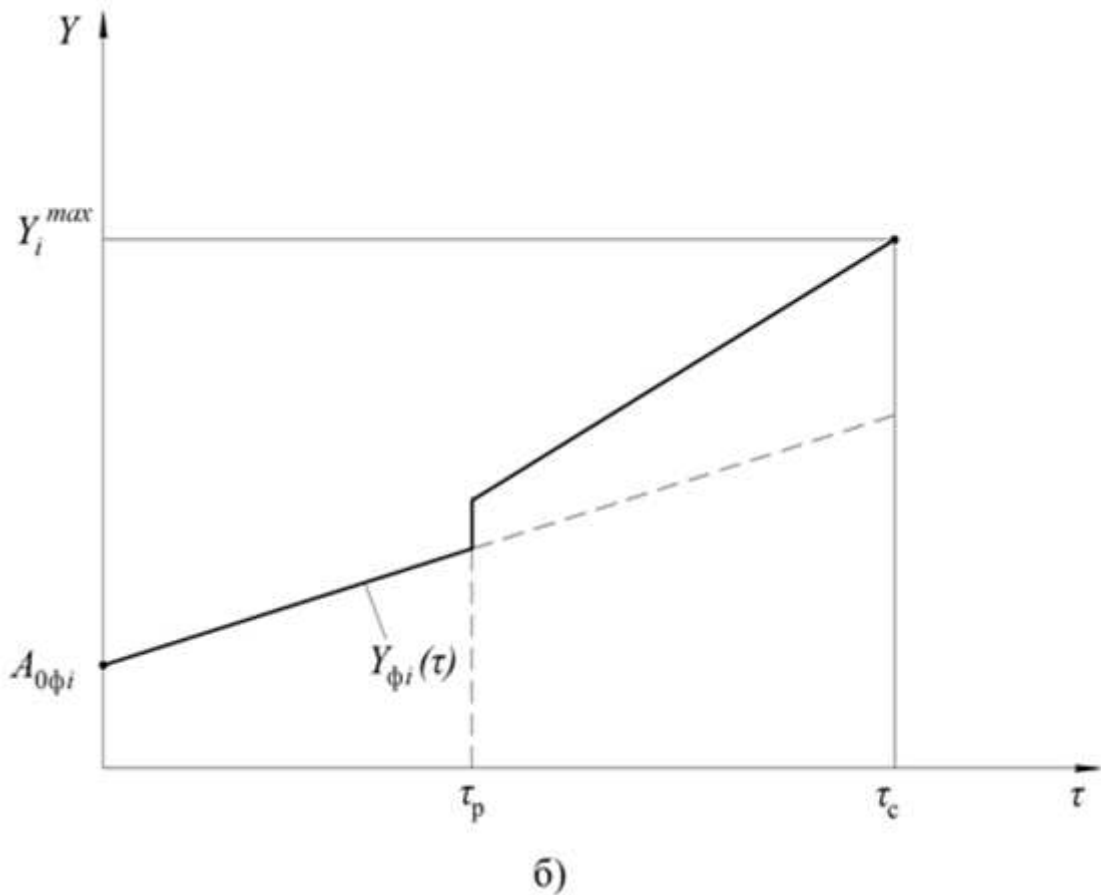


Рисунок 20 – График зависимости фактического значения выходного параметра скорректированного технологического процесса от времени  $\tau$ : а – прогнозируемое значение выходного параметра превышает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$ ; б – прогнозируемое значение выходного параметра не превышает заданное (регламентированное) в момент времени  $\tau_c$

Ниже приведена методика коррекции параметров процесса для случая, когда имеем фактические положительные резервы.

Если фактические значения выходных параметров зафиксированы после обработки партии заготовок, можно определить фактическое значение коэффициента  $A_{1\phi i}$ . [102]:

$$A_{1\phi i} = \frac{Y_{\phi i}^{\tau_c} - A_{0\phi i}}{\tau_c}, \quad (113)$$

где  $Y_{\phi i}^{\tau_c}$  – фактические значения  $i$ -го выходного параметра в момент  $\tau_c$ .

В ходе коррекции режима значения его элементов изменяются незначительно, что влечет за собой незначительные изменения фактических значений коэффициента  $A_{1\phi i}$ . Поэтому значение  $i$ -го выходного параметра

(коэффициента  $A_{0\phi i}^1$ ) в момент времени  $\tau_0$  следует определить как (рис. 21) [102]:

$$A_{0\phi i}^1 = Y_i^{max} - A_{1\phi i} \cdot \tau_c. \quad (114)$$

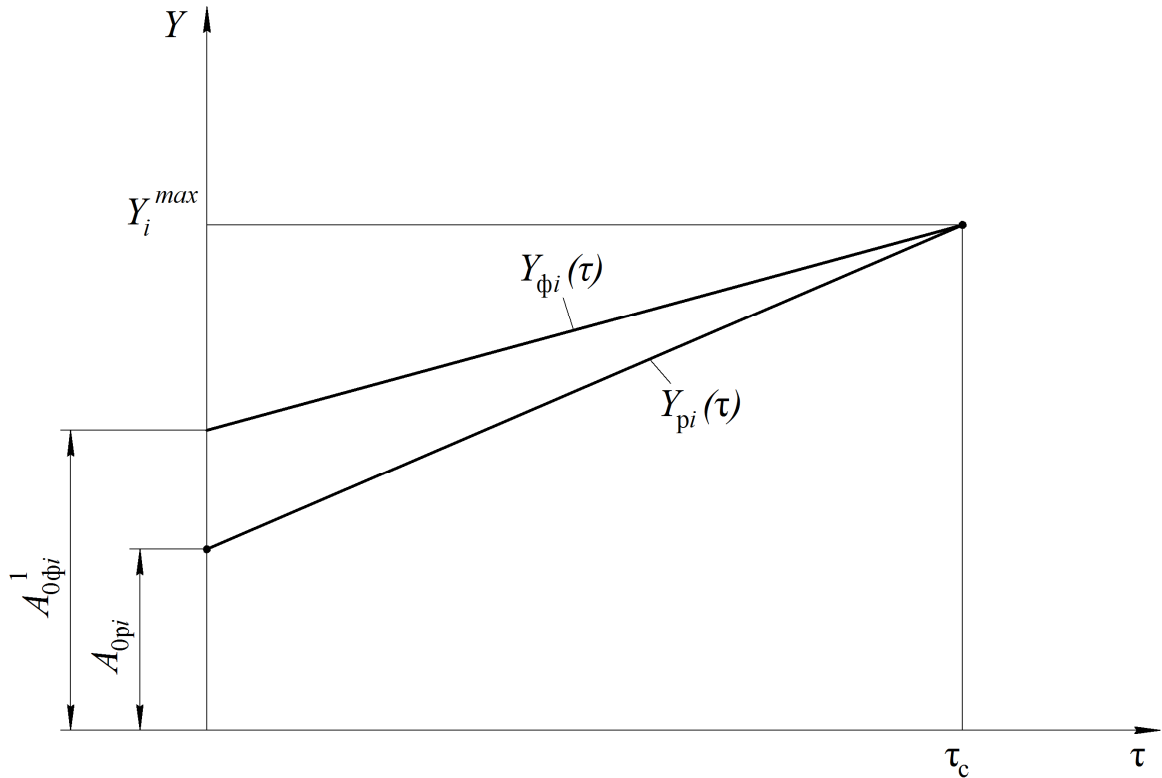


Рисунок 21 – График зависимости фактического значения выходного параметра от времени при коррекции режима в начальный момент времени

Интервалы варьирования управляемыми параметрами, которые позволят в начальный момент времени  $\tau_0$  обеспечить значение  $i$ -го выходного параметра равным  $A_{0\phi i}^1$  [102]:

$$\Delta X_{ji} = \frac{A_{0\phi i}^1 - A_{0\phi i}}{k' \cdot \frac{dY_i}{dX_j}(p) \cdot k_3}. \quad (115)$$

Выбирается приоритетный выходной параметр, ориентируясь на который рассчитываются скорректированные значения управляемых параметров. Затем рассчитывается изменение второго выходного параметра и сравнивается с заданным (предельным) значением. Если все выходные параметры имеют положительный резерв, то режим обработки можно



интенсифицировать. Для приближения назначенного режима к оптимальному уровню рассчитывают интервалы варьирования управляемыми параметрами:

$$\Delta X_j = \frac{Y_i^{max} - Y_i^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dY_i}{dX_j}(\phi) \cdot k_s}, \quad (116)$$

Управляемый параметр  $X_j$  изменяют на величину  $\Delta X_j$  и получают новые значения управляемых параметров, при которых производят обработку заготовок и фиксируют значения выходных параметров:

$$X_j^1 = X_j^0 + \Delta X_j. \quad (117)$$

Если в качестве управляемых параметров выбраны – подача  $S_{об}$  и скорость резания  $V$ , то зависимости для их расчёта имеют вид [102]:

$$S_{об}^1 = S_{об}^0 + \Delta S_{об}; \quad (118)$$

$$V^1 = V^0 + \Delta V. \quad (119)$$

Если период стойкости инструмента является значительным, то целесообразно начать процедуру коррекции после наработки инструмента в течение времени  $\tau_{pl}(l = 1, 2, \dots, q)$  меньшего периода стойкости инструмента. Экстраполяция кривых, характеризующих изменение за время  $0, \dots, \tau_{p1}$  фактических значений выходных параметров, свидетельствует, что после обработки партии заготовок разница между расчётным и фактическим значениями выходного параметра составит величину  $\Delta Y_{\phi i}$  (рис. 22).

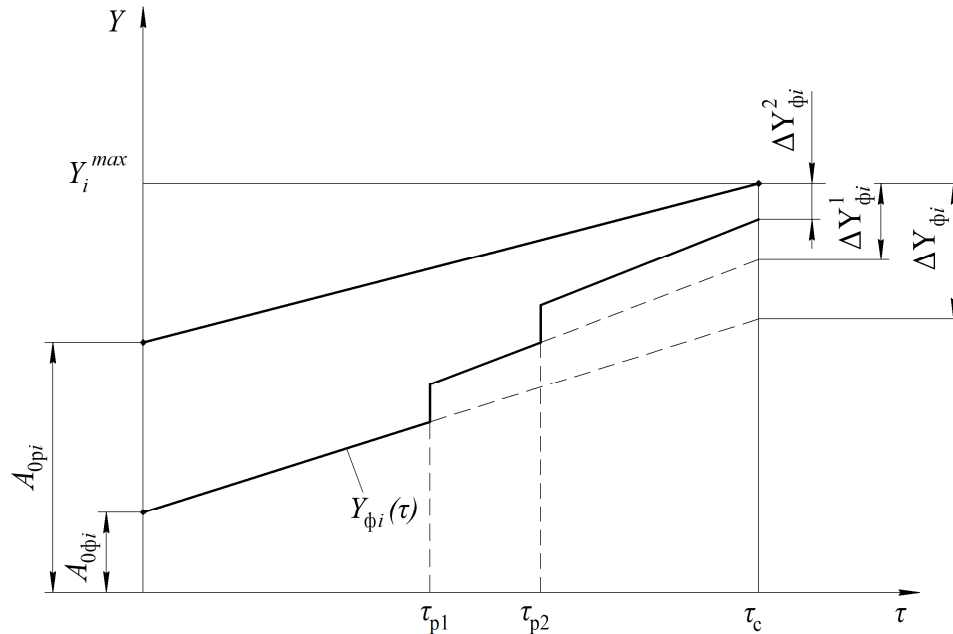


Рисунок 22 – График зависимости фактического значения выходного параметра от времени при коррекции режима после наработки инструмента в момент времени, меньший периода стойкости

Фактическое значение коэффициента  $A_{1\phi i}$  можно рассчитать по формуле:

$$A_{1\phi i} = \frac{Y_{\phi i}^{\tau_{p1}} - A_{0\phi i}}{\tau_{p1}}, \quad (120)$$

где  $Y_{\phi i}^{\tau_{p1}}$  – фактическое значение  $i$ -го выходного параметра в момент времени  $\tau_{p1}$ .

Рассчитать значение  $i$ -го выходного параметра в момент времени  $\tau_{p1}$  можно по зависимости:

$$A_{p1\phi i}^1 = Y_i^{max} - A_{1\phi i} \cdot (\tau_c - \tau_{p1}) \quad (121)$$

Для расчёта величин изменения управляемых факторов, которые обеспечивают достижение значения  $i$ -го выходного параметра, равное  $A_{p1\phi i}^1$ , в момент времени  $\tau_{p1}$ , используется следующая формула:

$$\Delta X_{j1} = \frac{A_{p1\phi i}^1 - A_{0\phi i}}{k' \cdot \frac{dY_{pi}}{dX_j} \cdot k_3}. \quad (122)$$

Определяются новые значения управляемых факторов, при этих

значениях производятся измерения выходных параметров и рассчитываются фактические значения производных  $dY_{\phi i}/dX_j$ .

Необходимый результат может быть не достигнут в момент времени  $\tau_{p1}$ , поскольку при первой коррекции режима используются производные, полученные дифференцированием математических зависимостей. Можно прогнозировать в момент времени  $\tau_{p2}$ , что фактические значения выходных параметров в момент  $\tau_c$  будут отличаться от расчётных значений на величину  $\Delta Y_{\phi i}^1$  (см. рис. 22). Если эта величина является значительной, следует произвести ещё один этап коррекции режима [109].

Уточняется значение коэффициента  $A_{1\phi i}$ :

$$A_{1\phi i} = \frac{Y_{i\phi}^{\tau_{p2}} - Y_{i\phi}^{\tau_{p1}}}{\tau_{p2} - \tau_{p1}}, \quad (123)$$

где  $Y_{i\phi}^{\tau_{p2}}$  – фактические значения  $i$ -го выходного параметра в момент времени  $\tau_{p2}$ .

Рассчитать необходимое значение  $i$ -го выходного параметра в момент времени  $\tau_{p2}$  можно с помощью зависимости:

$$A_{p2\phi i}^1 = Y_i^{max} - A_{1\phi i} \cdot (\tau_c - \tau_{p2}) \quad (124)$$

Для определения величин управляющих воздействий необходимо предварительно определить приоритетный выходной параметр и относительные значения, на основе которых они рассчитываются. Выбор приоритетного выходного параметра подробно описан в п. 2.2. Затем следует оценить, каким образом изменение управляющих параметров (скорость резания  $V$ , подача  $S_{об}$  и др.) отразится на величинах второго и последующих контролируемых выходных параметров (формула (83)).

Для возможности практического использования методик коррекции режима необходимо разработать математические модели для расчёта выходных параметров процесса течения. Необходимо разработать алгоритм функционирования процесса обработки. На основе алгоритма будет разработано программное обеспечение для коррекции режима течения.

## 2.4. Выводы

1. Представлена методика определения взаимосвязанных текущих показателей, выходных и входных параметров процесса обработки.

2. Введено понятие резерва выходных параметров процесса обработки, которое представляет собой разницу между заданным значением выходного параметра и его фактическим или расчётным значением.

3. Разработана методика коррекции режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации, предусматривающая варьирование управляемыми параметрами по определённому плану с целью приближения их значений к оптимальному уровню и подстройку (коррекцию) моделей, связывающих выходные и входные параметры процесса обработки.

4. Разработана методика коррекции режима в условиях неопределенности информации с учетом изменяющихся во времени параметров процесса.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ

### 3.1. Выбор контролируемых выходных параметров процесса точения при коррекции режима резания

Требования, указываемые конструктором на чертежах деталей, обычно относятся к точности размеров, твердости и шероховатости поверхностей. Шероховатость оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики деталей и их соединений (контактная жёсткость, износостойкость и коррозионная стойкость) [53, 123]. Точность размеров непосредственно влияет на качество готового изделия, собираемость сборочной единицы или узла машины. Твёрдость поверхности детали определяется ее материалом и видом термообработки. Силы и температуры, возникающие в процессе обработки, как правило, не контролируются в производственных условиях, однако они влияют на выходные параметры (качество поверхности, точность размеров) и стойкость режущего инструмента.

Исходя из вышеизложенных причин, для апробации методик коррекции режима выбираем в качестве выходных контролируемых параметров:

1. Параметр, характеризующий микрогеометрию поверхностного слоя –  $Ra$ , мкм;
2. Погрешность диаметрального размера  $\omega$ , мм.

Входными параметрами процесса точения являются глубина резания  $t_r$ , подача  $S_{об}$  и скорость резания  $V$ . Глубина резания  $t_r$  определяется припуском на обработку и не всегда имеется возможность варьировать этим параметром. На выходные и текущие параметры глубина резания  $t_r$  влияет в меньшей степени, чем подача  $S_{об}$  и скорость резания  $V$ . Поэтому в качестве управляемых параметров были выбраны подача  $S_{об}$  и скорость резания  $V$ .

Необходимо подобрать математические зависимости для каждого контролируемого параметра, которые связывают их с входными параметрами.

## **3.2. Математическое моделирование выходных и текущих параметров процесса точения**

### **3.2.1. Погрешность размера детали**

В данном пункте изложена методика расчёта погрешности диаметральных размеров заготовок валов при точении.

Производственная погрешность при механической обработке заготовок обусловлена влиянием случайных и систематических факторов, причем последние могут быть постоянными и переменными (функциональными).

Выполнение расчёта производственной погрешности при токарной обработке на настроенных станках может быть осуществлено с использованием формулы (21). При обработке на токарных станках с ЧПУ дополнительно возникают погрешности позиционирования суппорта  $\omega_{п.с.}$  и резцедержателя (инструментальной головки или блока)  $\omega_{п.р.}$ , а также погрешность отработки коррекции  $\omega_{кор}$  (в случае работы с корректорами). Погрешность позиционирования резцедержателя  $\omega_{п.р.}$  в современных станках с ЧПУ составляет 6...8 мкм. Погрешности позиционирования суппорта  $\omega_{п.с.}$  и отработки коррекции  $\omega_{кор}$  принимают равными двум дискретам привода подач по соответствующим осям. При работе с корректором из расчета  $\omega$  может быть исключена систематическая погрешность от размерного износа инструмента  $\omega_{и}$ , т.к. в программу можно ввести периодическую коррекцию положения режущего инструмента; при расчёте погрешности размерной настройки  $\omega_{н}$  можно исключить составляющую  $\omega_{рег}$ , т.к. эта составляющая учитывается погрешностью коррекции  $\omega_{кор}$  [1].

Сумма погрешностей базирования, закрепления и положения заготовки формирует погрешность установки заготовки  $\omega_{у}$ . Точность диаметрального

размера при токарной обработке не зависит от погрешностей базирования и положения заготовки. При консольном закреплении жесткой заготовки в патроне можно не учитывать погрешность закрепления.

Погрешность настройки станка  $\omega_H$  обусловлена погрешностью регулирования  $\omega_{\text{рег}}$  положения РИ и отдельных узлов станка относительно установленного инструмента и влиянием неточностей измерений пробных заготовок  $\omega_{\text{изм}}$ , на основе которых производится настройка станка [53]:

$$\omega_H = 1,2 \cdot \sqrt{\omega_{\text{рег}} + \omega_{\text{изм}}}. \quad (125)$$

Точность регулирования положения РИ зависит от погрешности используемых для настройки регулировочных средств, таких как лимбы, индикаторы и линейки. При расчёте можно принять, что точность равна цене деления регулировочного устройства или предельной погрешности мерительного инструмента, используемого для регулировки положения РИ. При обработке на станке с ЧПУ  $\omega_{\text{рег}}$  определяется точностью системы управления станком. Для современных станков с ЧПУ  $\omega_{\text{рег}} = 0,001 \dots 0,002$  мм. Погрешность  $\omega_{\text{изм}}$  можно принять равной предельной погрешности используемого мерительного инструмента [53]. Предельную погрешность мерительного инструмента определяют по стандартам [76].

Упругие деформации элементов технологической системы вызывают погрешность  $\omega_j$  при точении. На неё оказывают влияние два фактора: упругое перемещение резца относительно оси патрона ( $\omega_{j1}$ ) и отклонения формы заготовки в продольном сечении ( $\omega_{j2}$ ).

Относительное упругое перемещение резца относительно оси патрона:

$$y = \frac{P_y}{j_y}, \quad (126)$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $j_y$  – жёсткость технологической системы, Н/м.

Составляющую  $P_y$  силы определяем по зависимости, полученной путём преобразования зависимостей, приведенных в работе [21]:

$$P_y = 1,155 \cdot \sigma_{st} \cdot S_{об} \cdot t_r \left( \left( 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right) \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right), \quad (127)$$

где  $\sigma_{st}$  – среднее по области пластической деформации напряжение текучести обрабатываемого материала, Па;  $S_{об}$  – подача, мм/об;  $t_r$  – глубина резания, м;  $\mu_1$  – коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца;  $\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести;  $u$  – коэффициент ( $u = 1$  при  $\gamma \geq 0^\circ$ ,  $u = 1 - \sin \gamma$  при  $\gamma < 0^\circ$ );  $k_c$  – коэффициент утолщения стружки [21];  $\gamma$  – передний угол резца, град;  $l_2$  – длина контакта задней поверхности резца с обработанной поверхностью заготовки, м;  $a$  – толщина срезаемого слоя заготовки, м.

Напряжение текучести  $\sigma_{st}$ :

$$\sigma_{st} = \sigma_s \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{пл}} \right), \quad (128)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести при нормальной температуре (20°C), Па;  $T_g$  – температура в области пластической деформации, К;  $T_{пл}$  – плавления материала заготовки, К. Температура плавления материала заготовки  $T_{пл}$  определяется по справочным данным [114].

Коэффициент утолщения стружки  $k_c$  определяем по зависимости [20]:

$$k_c = u \cdot \left\{ 2 \cdot \mu_1 \cdot \cos^2 \gamma \cdot (1 - tg\gamma) + \sqrt{\left[ 2 \cdot \mu \cdot \cos^2 \gamma \cdot (1 - tg\gamma) \right]^2 + \left[ 4 \cdot \mu \cdot \left( \frac{1}{u \cdot \cos \gamma} - 1 \right) + 1 + 2 \cdot \mu \right] \cdot \cos^2 \gamma} \right\}. \quad (129)$$

Погрешность диаметра цилиндрической шейки, обусловленная упругими перемещениями резца относительно оси патрона ( $\omega_{j1}$ ), определяется как амплитуда колебаний упругих перемещений  $y$ :

$$y = \frac{1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{пл}} \right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y}. \quad (130)$$

Колебания всех параметров, являющихся аргументами данной зависимости, оказывают влияние на рассеивание переменной  $y$ . Колебания напряжения текучести  $\Delta \sigma_s$ , глубины резания  $\Delta t_r$  и длины контакта резца с



заготовкой  $\Delta l_2$  считаются факторами, оказывающими преобладающее влияние на рассеивание  $y$ . Углы инструмента  $\gamma$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  остаются постоянными при неизменных условиях и режиме обработки. При неизменных условиях и режиме обработки углы инструмента  $\gamma$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  можно считать постоянными.

Параметр  $\Delta\sigma_S$  характеризует нестабильность механических свойств материала обрабатываемой заготовки. Выбор значений этого параметра следует производить, ориентируясь на технические условия или ГОСТы.

При работе резцом с площадкой затупления параметр  $l_2$  можно рассчитать по формуле (рис. 23):

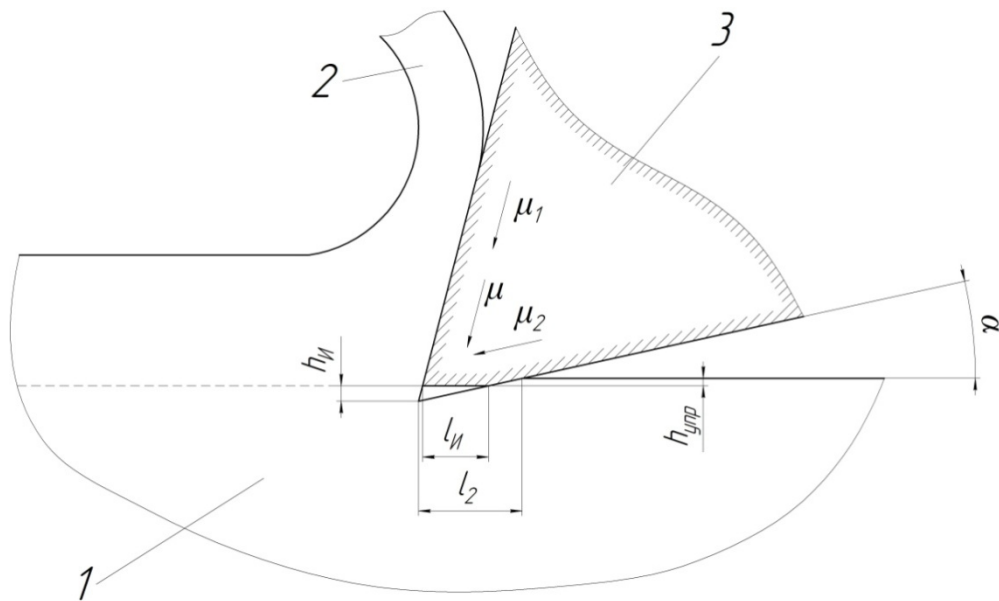


Рисунок 23 – Схема контакта инструмента с заготовкой [135, 136]:  
1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – резец

$$l_2 = l_{и} + \frac{h_{упр}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (131)$$

где  $\alpha$  – задний угол резца, град;  $l_{и}$  – размер площадки износа режущего инструмента, м;  $h_{упр}$  – высота упругого поднятия металла заготовки [19]:

$$h_{упр} = 1,155 \cdot \frac{\sigma_S}{E} \cdot h \cdot \left[ \sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{0,5 + \mu}{k_c} - \mu \sin 2\gamma \right], \quad (132)$$

где  $E$  – модуль упругости материала обрабатываемой заготовки, Па;  $h$  – размер заготовки, м (при токарной обработке  $h=d/2$ , где  $d$  – диаметр обрабатываемой поверхности, м).

Радиальный износ резца  $h_{\text{н}}$  [123]:

$$h_{\text{н}} = \frac{l_{\text{н}}}{(\text{ctg}\alpha - \text{tg}\gamma) \cdot (\text{ctg}\varphi - \text{tg}\varphi_1) \cdot \sin \varphi}, \quad (133)$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы резца в плане, град.

Износ резца  $h_{\text{н}}$ , влияющий на погрешность обработки:

$$h_{\text{н}} = \frac{U_0 \cdot L}{1000}, \quad (134)$$

где  $U_0$  – относительный износ резца, мкм/м;  $L$  – путь резания, мм.

При токарной обработке путь резания  $L$  рассчитывают по зависимости:

$$L = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{S_{\text{об}}}, \quad (135)$$

где  $l$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $d$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Следовательно, параметр  $h_{\text{н}}$  можно определить как:

$$h_{\text{н}} = \frac{U_0 \cdot \pi \cdot d \cdot l}{1000 \cdot S_{\text{об}}}. \quad (136)$$

Выразив из зависимости (133) параметр  $l_{\text{н}}$ , с учетом (132) и (136) получим формулу для расчёта  $l_2$  в виде:

$$l_2 = \frac{U_0 \cdot \pi \cdot d \cdot l_{\text{н}} \cdot (\text{ctg}\alpha - \text{tg}\gamma) \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1) \cdot \sin \varphi}{1000 \cdot S_{\text{об}}} + \\ + 1,155 \cdot \frac{\sigma_s}{2 \cdot \text{tg}\alpha \cdot E} \cdot d \cdot \left[ \sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \text{tg}\gamma) + \frac{0,5 + \mu}{k_c} - \mu \sin 2\gamma \right], \quad (137)$$

где  $l_{\text{н}}$  – размер (длина) поверхностей заготовок, обработанных между последовательными подналадками инструмента, мм.

Если заготовки имеют несколько поверхностей, обрабатываемых одним инструментом, то зависимость (137) примет вид:

$$l_2 = \sum_{i=1}^l \frac{U_{0i} \cdot \pi \cdot d_i \cdot l_{\text{ни}} \cdot (\text{ctg}\alpha - \text{tg}\gamma) \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1) \cdot \sin \varphi}{1000 \cdot S_{\text{оби}}} + \\ + 1,155 \cdot \frac{\sigma_s}{2 \cdot \text{tg}\alpha \cdot E} \cdot d_i \cdot \left[ \sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \text{tg}\gamma) + \frac{0,5 + \mu}{k_c} - \mu \sin 2\gamma \right], \quad (138)$$

где  $U_{0i}$ ,  $d_i$ ,  $l_{\text{ни}}$  и  $S_{\text{оби}}$  – параметры при обработке  $i$ -ой поверхности.

Полагаем, что переменные значения в зависимости (137) принимают параметры  $\sigma_s$  и  $E$ . Возможность учёта рассеивания параметра  $E$  оказалась невозможной из-за отсутствия необходимой справочной информации.

Используя зависимость для приращения функции нескольких переменных, была получена формула для расчёта поля рассеивания параметра  $l_2$ :

$$\Delta l_2 = \left( 1,155 \cdot \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot E} \cdot d \cdot \left[ \sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{0,5 + \mu}{k_c} - \mu \sin 2\gamma \right] \right) \cdot \Delta \sigma_s. \quad (139)$$

Колебание глубины резания  $\Delta t_r$  определяется путем суммирования допусков размера для предшествующего и выполняемого переходов:

$$\Delta t_r = T_{i-1} + T_i, \quad (140)$$

где  $T_i$  и  $T_{i-1}$  – допуски размера для выполняемого и предшествующего перехода (операции). Если обработка производится на различных станках, следует учесть разброс жёсткостей различных станков (допуск по нормам жесткости)  $\Delta j_y$ .

С использованием зависимости для приращения функции нескольких переменных выводим зависимость для расчета  $\omega_{j1}(\Delta y)$ , полагая, что переменными величинами в зависимости (130) являются параметры  $\sigma_s$ ,  $t_r$  и  $l_2$ :

$$\omega_{j1} = \Delta y = \frac{\partial f}{\partial \sigma_s} \cdot \Delta \sigma_s + \frac{\partial f}{\partial t_r} \cdot \Delta t_r + \frac{\partial f}{\partial l_2} \cdot \Delta l_2, \quad (141)$$

где  $f$  – функция, описывающая зависимость параметра  $U$  от аргументов (зависимость (130)):

$$\begin{aligned} \omega_{j1} = & \frac{1,155 \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}} \right) \cdot S_{\text{об}} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta \sigma_s + \\ & + \frac{1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}} \right) \cdot S_{\text{об}} \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta t_r + \\ & + \frac{1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}} \right) \cdot S_{\text{об}} \cdot t_r \cdot \left( \frac{1}{u \cdot a} \right)}{j_y} \cdot \Delta l_2. \end{aligned} \quad (142)$$

Поскольку зависимость для расчёта  $\omega_{j1}$  содержит в качестве аргумента параметр  $l_2$ , который увеличивается с увеличением времени наработки инструмента, то мгновенное поле рассеивания размеров также будет увеличиваться с увеличением времени.

Упругие деформации консольно-закреплённой заготовки в сечениях А и Б, расположенных на расстоянии  $l_{31}$  и  $l_{32}$  от торца патрона (рис. 24):

$$y_1 = \frac{P_y}{j_{31}}; \quad (143)$$

$$y_2 = \frac{P_y}{j_{32}}; \quad (144)$$

где  $j_{31}$  и  $j_{32}$  – жёсткость заготовки в сечениях А и Б.

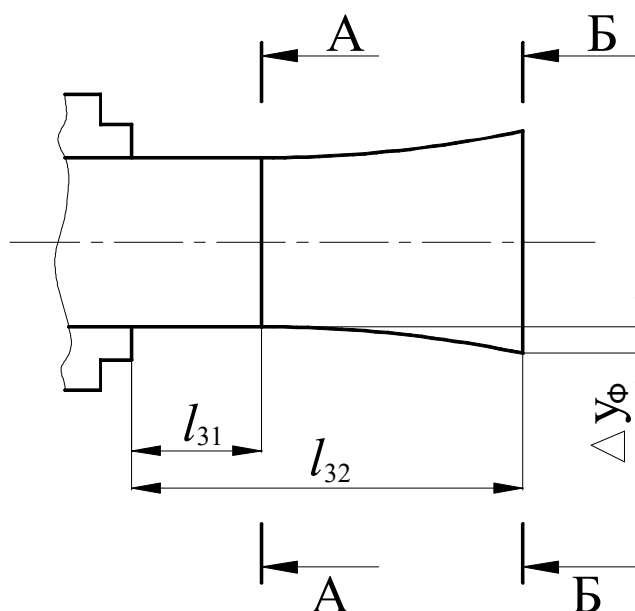


Рисунок 24 – Эскиз обработанной заготовки [107]

Жёсткость заготовки при закреплении её в токарном патроне (консольное закрепление):

$$j_{31} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l_{31}^3}; \quad (145)$$

$$j_{32} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l_{32}^3}; \quad (146)$$

где  $E$  – модуль упругости материала заготовки, Н/м<sup>2</sup>;  $I$  – момент инерции поперечного сечения заготовки, м<sup>4</sup>.

Изменение формы заготовки при точении:

$$\Delta y_{\phi} = y_2 - y_1 = \frac{P_y}{3 \cdot E \cdot I} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3) \quad (147)$$

Учитывая, что  $I=0,05 \cdot d^4$ , а  $\omega_{j2}=2 \cdot \Delta y_{\phi}$ , запишем зависимость для расчёта  $\omega_{j2}$  в виде:

$$\omega_{j2} = \frac{2 \cdot P_y}{3 \cdot E \cdot 0,05 d^4} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3). \quad (148)$$

Таким образом зависимость для расчёта погрешности  $\omega_j$  примет вид:

$$\omega_j = \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_{Тс}} \cdot \Delta\sigma_s \right. \\ + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_{Тс}} \cdot \Delta t_r \\ \left. + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a} \right\}}{j_{Тс}} \cdot \Delta l_2 + \frac{2 \cdot P_y}{3 \cdot E \cdot 0,05 d^4} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3) \right). \quad (149)$$

Погрешность от износа инструмента  $\omega_{и}$ , исходя из зависимости (135):

$$\omega_{и} = \frac{U_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{п}}{1000 \cdot S_{об}}, \quad (150)$$

Размер (длину) поверхностей заготовок, обработанных между двумя последовательными подналадками  $l_{п}$  можно определить как:

$$l_{п} = l \cdot n_{д}, \quad (151)$$

где  $n_{д}$  — число заготовок, обработанных между подналадками.

Составляющую  $\omega_{\phi}$  можно рассчитать по формуле:

$$\omega_{\phi} = \frac{\Delta \cdot l}{1000}, \quad (152)$$

где  $\Delta$  — отклонение от параллельности направляющих станка относительно оси патрона, мм/1000мм, которую можно определить по данным [89], или по паспортным данным станка.

Если принять допущение, что инструмент остывает в перерывах между работой до температуры окружающей среды, что имеет место при его обильном охлаждении, то максимальная погрешность, вызванная

превышением температурных деформаций инструмента над начальным износом, имеет место при обработке первой заготовки (выполнении первого технологического перехода):

$$\omega_{\theta} = \Delta_T. \quad (153)$$

Погрешность вследствие температурных деформаций технологической системы составляет от 10 до 15% от общей суммы остальных погрешностей [107]:

$$\omega_{\theta} = 0,125 \cdot (\omega_y + \omega_j + \omega_n + \omega_{и} + \omega_{\phi}). \quad (154)$$

Из параметров, входящих в зависимость (21), зависят от времени наработки инструмента следующие: сила резания, изменяющаяся, главным образом, вследствие увеличения износа инструмента; модуль упругости, предел текучести материала заготовки и длина контакта заготовки с резцом имеют переменные значения вследствие изменения температуры.

Математическое ожидание размера наружной цилиндрической поверхности в момент времени  $\tau_0 = 0$  можно принять равным настроечному размеру, который можно определить по следующей формуле (рис. 25):

$$d_0 = d_{min} + \omega_{и} + \frac{\omega_{\tau_0}}{2}, \quad (155)$$

где  $d_{min}$  – наименьший предельный размер вала, мм;  $\omega_{и}$  – погрешность измерения, которую можно принять равной погрешности измерительного прибора, мм;  $\omega_{\tau_0}$  – мгновенное поле рассеивания размеров в начальный момент времени работы инструмента, мм.

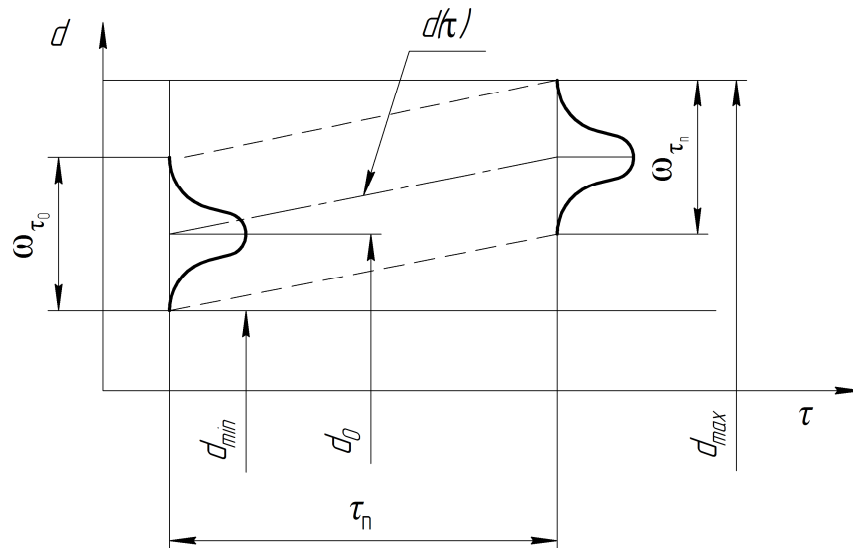


Рисунок 25 – Изменение размера заготовки  $d$  от времени наработки инструмента  $\tau$

Математическое ожидание размера  $d$  в момент времени  $k$ :

$$d_k = d_0 + h_{ик}, \quad (156)$$

где  $h_{ик}$  – износ инструмента в момент времени  $k$ , мм.

В результате получен комплекс математических зависимостей, позволяющих рассчитать производственную погрешность диаметральных размеров деталей  $\omega$ , обработанных точением.

### 3.2.2. Микрогеометрия обработанной поверхности

Для оценки микрогеометрии обработанной поверхности часто применяются высотные параметры шероховатости, такие как среднее арифметическое отклонение профиля ( $Ra$ ) и другие. Ряд факторов влияет на образование шероховатости в процессе механической обработки, в том числе при точении: геометрия инструмента, траектория его движения, колебательные движения инструмента, деформация материала заготовки. Однако, не менее важным фактором является шероховатость самой рабочей части инструмента и вырывы обрабатываемого материала.

Рассчитать параметры шероховатости поверхности возможно можно благодаря множеству аналитических зависимостей. Однако, не все эти

зависимости учитывают полное влияние всех вышеупомянутых факторов на шероховатость обработанной поверхности.

Для расчёта шероховатости используем зависимость А.Г. Сулова [35, 92]:

$$Ra = 0,2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4), \quad (157)$$

где  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – составляющие профиля шероховатости, обусловленные геометрией и кинематикой перемещения рабочей части режущего инструмента, относительными колебаниями инструмента и заготовки, пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, шероховатостью рабочих поверхностей инструмента соответственно.

Составляющая  $h_1$  (при условии, что главный  $\varphi$  и вспомогательный  $\varphi_1$  углы в плане РИ составляют  $\varphi \geq \arcsin \frac{S_{об}}{2 \cdot r}$  и  $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{S_{об}}{2 \cdot r}$ ) [35, 92]:

$$h_1 = \frac{S_{об}^2}{8 \cdot r}, \quad (158)$$

где  $S_{об}$  – подача на оборот, мм/об;  $r$  – радиус при вершине режущего клина инструмента, мм.

Составляющая  $h_2$  [35, 92]:

$$h_2 = \frac{10 \cdot C_p \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_{p1} \cdot \left( \left( \frac{\sigma_b^{max}}{750} \right)^m \cdot t^x - \left( \frac{\sigma_b^{min}}{750} \right)^m \cdot (t - Rz_{И})^x \right)}{j_{т.с.}}, \quad (159)$$

где  $C_p, y, n, x, m$  – эмпирические коэффициенты;  $K_{p1}$  – поправочный коэффициент;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $t_r$  – глубина резания, мм;  $Rz_{И}$  – средняя высота неровностей профиля по десяти точкам обрабатываемой поверхности, мм;  $\sigma_b^{min}, \sigma_b^{max}$  – минимальный и максимальный пределы прочности материала заготовки, МПа;  $j_{т.с.}$  – жёсткость технологической системы, Н/мм.

Зависимость (159), приведенная в источниках [35, 92], является эмпирической. Интервал рассеивания упругих перемещений резца  $y$  обусловлен амплитудой колебаний вершины резца относительно обрабатываемой поверхности, следовательно:



$$h_2 = \Delta y = \omega j_1; \quad (160)$$

$$h_2 = \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{\text{об}} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta \sigma_s +$$

$$+ \frac{1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{\text{об}} \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta t_r +$$

$$+ \frac{1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{\text{об}} \cdot t_r \cdot \left(\frac{1}{u \cdot a}\right)}{j_y} \cdot \Delta l_2. \quad (161)$$

Составляющая  $h_3$  (при  $\varphi \geq \arcsin \frac{S_{\text{об}}}{2 \cdot r}$  и  $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{S_{\text{об}}}{2 \cdot r}$ ) [35, 92]:

$$h_3 = \frac{b_{\text{сдв}} \cdot (2S_{\text{об}} + b_{\text{сдв}})}{32 \cdot r}, \quad (162)$$

где  $b_{\text{сдв}}$  – величина пластического оттеснения материала заготовки, мм.

При точении величина пластического оттеснения определяется как [35, 92]:

$$b_{\text{сдв}} = 0,5 \cdot \rho_k \cdot \left( 1 - \frac{\tau_{\text{сдв}}}{\sqrt{\tau_{\text{сдв}}^2 + \sigma_s^2}} \right), \quad (163)$$

где  $\tau_{\text{сдв}}$  – прочность на сдвиг материала заготовки, МПа;  $\sigma_s$  – предел текучести материала заготовки, МПа;  $\rho_k$  – радиус вспомогательной режущей кромки, мм.

Прочность материала на сдвиг рассчитывается по зависимости [104]:

$$\tau_{\text{сдв}} = \frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}. \quad (164)$$

Следовательно, зависимость (162) примет следующий вид:

$$h_3 = \frac{0,5 \cdot \rho_k \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + \sigma_s^2}} \right) \cdot \left( 2 \cdot S + 0,5 \cdot \rho_k \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + \sigma_s^2}} \right) \right)}{32 \cdot r}. \quad (165)$$

Параметры  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$  зависят от температуры деформируемого слоя материала заготовки и будут определены в зависимости от этой температуры (см. п. 3.2.6).

Составляющая  $h_4$  при точении определяется средней высотой профиля шероховатости вершины резца  $Rz_{вр}$ , т.е.[35, 92]:

$$h_4 = Rz_{вр}. \quad (166)$$

Т.к. переменным параметром в зависимостях (158), (160) – (178) является  $\sigma_s$ , то используя зависимость для приращения функции нескольких переменных, получим зависимость для расчёта мгновенного поля рассеивания параметра шероховатости  $Ra$ :

$$\omega_{\tau_k Ra} = \Delta Ra, \quad (167)$$

где  $\omega_{\tau_k Ra}$  – величина поля рассеивания параметра  $Ra$  в  $k$ -й момент времени:

$$\Delta Ra = \frac{df}{d\sigma_s} \cdot \Delta\sigma_s, \quad (168)$$

где  $f$  – функция, описывающая зависимость параметра  $Ra$  от аргументов.

Выполнив преобразования, получим:

$$\Delta Ra = \left( \begin{array}{l} \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta t_r + \\ + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta l_2 \\ + \frac{0,5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2\sigma_s}} \right) \cdot \left( 2 \cdot S + 0,5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2\sigma_s}} \right) \right)}{32 \cdot r} \end{array} \right) \cdot \Delta\sigma_s. \quad (169)$$

Значительное влияние на изменение шероховатости оказывают изменения длины контакта задней поверхности РИ с заготовкой  $l_2$  и предела текучести материала заготовки  $\sigma_s$ . Однако, важно отметить, что на изменения данных параметров значительное влияние оказывает температура в зоне

резания. Чем выше температура, тем интенсивнее изменяются эти параметры и, следовательно, поверхность обрабатываемого материала.

### 3.2.3. Износ режущего инструмента

Тепловой фактор, а именно температура в зонах контакта инструмента со стружкой и заготовкой, оказывает значительное воздействие на интенсивность износа режущего инструмента в процессе механической обработки. Температура также является одним из основных факторов, которые определяют преобладающий вид износа [74]. В процессе резания, по мнению ряда исследователей, преобладает механизм адгезионно-усталостного разрушения [14, 95].

При эксплуатации твердосплавного инструмента, особенно при высокой температуре резания в пределах  $900 \dots 950^\circ\text{C}$ , возникает интенсивный износ, обусловленный адгезией и усталостью материала [48, 53]. При температуре выше  $900 \dots 950^\circ\text{C}$  преобладает диффузионный износ.

Известные зависимости для оценки характеристик трения и износа при резании приведены в работах [80, 81]. Однако, расчет по данным зависимостям вести затруднительно, т.к. они включают в себя ряд параметров, которые следует определять экспериментальным путем.

Размерный износ резца  $U$  будем определять по следующей зависимости [53]:

$$U = \frac{U_0 \cdot L}{1000}, \quad (170)$$

где  $U$  – размерный износ режущего инструмента, мкм;  $U_0$  – относительный износ, мкм/км ( $U_0$  предполагается определять по справочным данным [53, 89] и результатам экспериментальных исследований);  $L$  – путь резания, м:

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{1000 \cdot S_{об}}. \quad (171)$$

Размерный износ резца  $U$  связан с износом по задней поверхности следующей зависимостью:

100

$$U = h_3 \cdot tg\alpha; \quad (172)$$

$$h_3 = \frac{U}{tg\alpha}. \quad (173)$$

Зависимость (170) для расчёта размерного износа  $U$  справедлива лишь для участка нормального износа режущего инструмента. Для определения износа нового РИ следует учитывать повышение интенсивности износа в период приработки инструмента. Зависимость для расчета  $U$ , которая учитывает начальный износ, имеет следующий вид [53]:

$$U = \frac{U_0 \cdot (L + L_{\text{доп}})}{1000}, \quad (174)$$

где  $L_{\text{доп}}$  – дополнительный путь резания, м ( $L_{\text{доп}} = 500 \dots 1500$  м).

Для режущих пластин с износостойкими покрытия следует определить коэффициенты, показывающие их влияние на коэффициенты трения и износ, по сравнению с твердосплавной основой. По данным исследователей стойкость режущего инструмента с покрытием  $TiN$  в 1,1...2,0 и более раз выше, чем у инструмента без покрытия [57, 95]. При точении конструкционной углеродистой стали резцом с покрытием коэффициенты трения на контактных площадках снижаются по сравнению с резцом без покрытия (на передней поверхности на 5 ... 14%, на задней поверхности – на 21 ... 44%) [94].

При обработке углеродистых конструкционных сталей инструментом с покрытием  $TiAlN$  стойкость увеличивается в 2 раза по сравнению с инструментом с покрытием  $TiN$ , коррозионно-стойких сталей – в 1,6...1,8 раза [93]. Для инструмента с покрытием принимаем понижающие коэффициенты для коэффициентов трения  $\mu_1$  ( $K\mu_1 = 0,95$ ) и  $\mu_2$  ( $K\mu_2 = 0,79$ ), а также для износа режущей пластины –  $Kh_3 = 0,36$ .

### 3.3. Разработка математических моделей и программного обеспечения для расчета температур. Численное моделирование температур.

#### 3.3.1. Разработка математических моделей для расчета температур

Качество обработки и производительность зависят от температуры, которая влияет на износ и прочность инструмента, а также на рабочие поверхности режущего инструмента и поверхностный слой заготовки [29]. Для разработки технологических операций и определения рационального режима обработки необходимо знать значения температур. Для расчёта выходных параметров процесса точения (погрешность диаметрального размера, шероховатость) также необходимы сведения о температурном поле.

Теплота при точении выделяется в трёх зонах: в области стружкообразования и на поверхностях контакта резца со стружкой и заготовкой (рис. 26).

Суммарная мощность тепловыделения при точении [103]:

$$W = W_g + W_{1T} + W_{2T}, \quad (175)$$

где  $W_g$ ,  $W_{1T}$ ,  $W_{2T}$  – мощности источников тепловыделения, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования  $W_g$ , работы сил трения на передней  $W_{1T}$  и задней  $W_{2T}$  поверхностях режущего клина, Вт.

Мощности источников тепловыделения можно определить как [77, 78]:

$$W_{1T} = F_1 \cdot V_1; \quad (176)$$

$$W_{2T} = F_2 \cdot V; \quad (177)$$

$$W_g = P_z \cdot V - (W_{1T} + W_{2T}), \quad (178)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – силы трения в зонах контакта резца со стружкой и заготовкой соответственно, Н;  $V$  – скорость резания, м/с;  $V_1$  – скорость перемещения стружки относительно передней поверхности инструмента, м/с:  $V_1 = V/k_c$ , где  $k_c$  – коэффициент утолщения стружки;  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

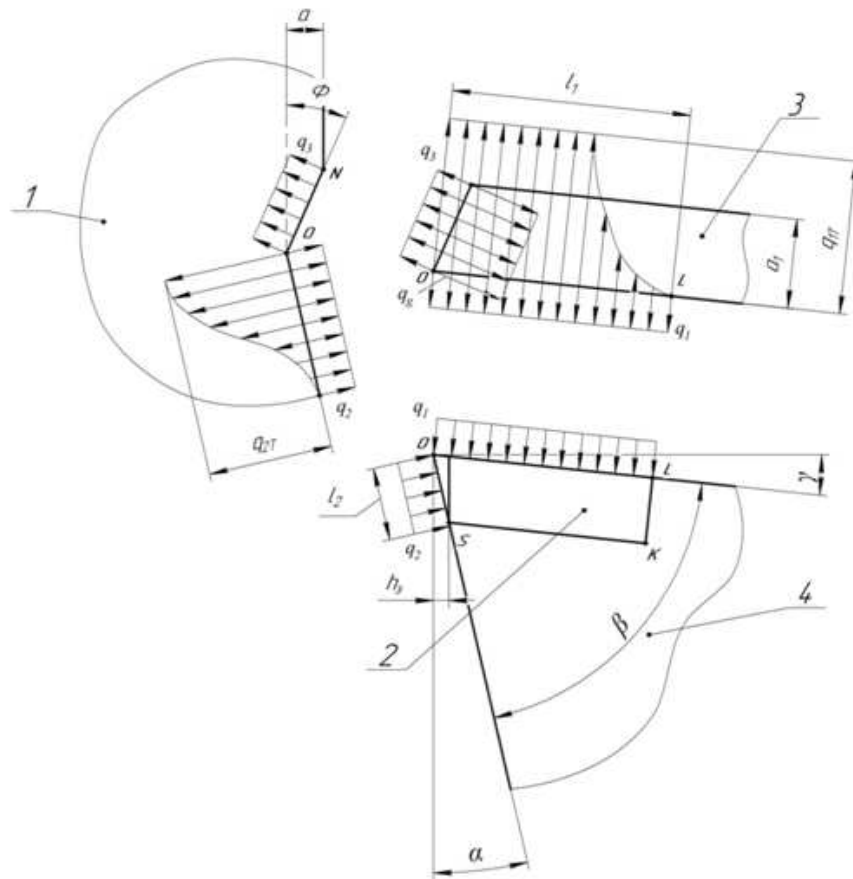


Рисунок 26 – Структурная схема теплообмена в зоне резания [135]:  
1- заготовка; 2 – режущая пластина; 3 – стружка; 4 – корпус резца

Плотность источника тепловыделения, воздействующего на плоскость сдвига  $q_g$ , считается равномерно распределенной, исходя из проведенных исследований [77, 78]. В зоне контакта передней поверхности резца со стружкой, плотность источника тепловыделения  $q_{1T}$  распределена в соответствии с комбинированным законом, а плотность источника тепловыделения, действующего в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой  $q_{2T}$  – по несимметричному нормальному закону.

Принимаем допущение, что материалы заготовки и резца изотропны.

Температура в области пластической деформации рассчитывается в процессе численного моделирования температурного поля и используется для расчета напряжения текучести  $\sigma_{St}$ . Это позволяет учесть зависимость напряжения текучести материала заготовки от температуры.

Расчёт тангенциальной составляющей силы резания выполним по зависимости [19, 21]:

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2k_c} \right] \cdot \cos\gamma + \right. \\ \left. + \frac{k_c}{4u \cdot \cos\gamma} + \mu \cdot \sin\gamma + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot S_{об} \cdot \sin\varphi} + \frac{k_c \cdot S_{об} \cdot \sin^2\varphi}{4u \cdot t_r \cdot \cos\gamma} \right\}. \quad (179)$$

Считаем, что источник  $q_g$ , распределён равномерно [103]:

$$q_g = \frac{W_g \cdot \sin\phi}{t_r \cdot S_{об}}, \quad (180)$$

где  $\phi$  – угол сдвига, град. [103]:

$$\sin\phi = \frac{\cos\gamma}{\sqrt{k_c^2 - 2 \cdot k_c \sin\gamma + 1}}. \quad (181)$$

Плотность источника тепловыделения  $q_{1T}$  [103]:

$$q_{1T} = \frac{3 \cdot W_{1T} \cdot \sin\varphi}{2 \cdot t_r \cdot l_1}, \quad (182)$$

где  $l_1$  – длина контакта стружки с передней поверхностью резца [78]:

$$l_1 = t_r \cdot k_c^{0,1} \cdot [k_c \cdot (1 - tg\gamma) + sec\gamma]. \quad (183)$$

Плотность источника тепловыделения  $q_{2T}$  [78]:

$$q_{2T} = \frac{2 \cdot W_{2T} \cdot \sqrt{k_0} \cdot \sin\varphi}{t_r \cdot \sqrt{\pi} \cdot erf[l_2 \cdot \sqrt{k_0}]}, \quad (184)$$

где  $k_0 = \frac{3}{l_2^2}$  – коэффициент;  $erf$  – интеграл вероятности [103]:

$$erf[l_2 \cdot \sqrt{k_0}] = \sqrt{1 - exp[-1,26 \cdot (l_2 \cdot \sqrt{k_0})^2]}, \quad (185)$$

или

$$erf[l_2 \cdot \sqrt{k_0}] = \sqrt{1 - exp[-3,78]}. \quad (186)$$

Распределение температуры во внутренних точках объектов теплообмена, таких как заготовка, РИ и стружка, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое для

нестационарного трёхмерного температурного поля в декартовой системе координат можно записать в виде [103]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (187)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);  $\tau$  – время, с.

Полагаем, что в начальный момент времени температура любой точки заготовки, режущей пластины и корпуса резца равна температуре окружающей среды  $T_0$ :

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (188)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, К.

Взаимодействие поверхностей заготовки, режущей пластины, стружки, корпуса резца и окружающей среды описывают граничные условия:

– в пределах зоны контакта заготовки 1 с режущей пластиной 2 (см. рис. 27):

$$\frac{\partial T_1}{\partial y} = -\frac{q'_{2T}}{\lambda_1}; \quad \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\frac{q''_{2T}}{\lambda_2}; \quad T_1 = T_2; \quad q'_{2T} + q''_{2T} = q_{2T}; \quad (189)$$

– в пределах зоны контакта заготовки 1 со стружкой 3:

$$\frac{\partial T_1}{\partial n} = -\frac{q'_D}{\lambda_1}; \quad \frac{\partial T_3}{\partial n} = -\frac{q''_D}{\lambda_1}; \quad T_1 = T_3; \quad q'_D + q''_D = q_D; \quad (190)$$

– в пределах зоны контакта стружки 3 с режущей пластиной 2:

$$\frac{\partial T_2}{\partial n} = -\frac{q'_{1T}}{\lambda_2}; \quad \frac{\partial T_3}{\partial n} = -\frac{q''_{1T}}{\lambda_1}; \quad T_2 = T_3; \quad q'_{1T} + q''_{1T} = q_{1T}. \quad (191)$$

В данных зависимостях одним и двумя штрихами обозначены тепловые потоки, поступающие в контактирующие объекты.

Учесть распределение тепловых потоков между объектами можно с помощью решения дифференциальных уравнений теплопроводности режущей пластины, корпуса, заготовки и стружки с общими граничными условиями в зоне контакта [42, 137].



Считаем, что термическое сопротивление зоны контакта режущей пластины и корпуса резца ничтожно мало, поэтому температуры сопрягаемых поверхностей режущей пластины  $T_{\text{СМП}}$  и корпуса инструмента  $T_{\text{кор}}$  равны [135]:

$$T_{\text{СМП}} = T_{\text{кор}}. \quad (192)$$

На границах заготовки, инструмента и стружки, взаимодействующих с охлаждающими или смазочными жидкостями, а также с воздухом, происходит процесс передачи тепла, определяющийся согласно закону Ньютона-Рихмана

$$-\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial n} = \alpha_j \cdot (T_z - T_0), \quad (193)$$

где  $z$  – номер объекта ( $z = 1, 2, 3, 4$  для заготовки, режущей пластины, стружки и корпуса резца соответственно);  $j$  – номер поверхности;  $\alpha_j$  – коэффициент теплоотдачи от  $j$ -ой поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $n$  – нормаль к поверхности объекта.

СОЖ вступает в контакт с поверхностями, нагретыми заготовкой, стружкой и резцом. В зависимости от температуры этих поверхностей, происходит конвективный теплообмен [78, 100]. Температурное поле рассчитывается на основе разностных сеток, охватывающих контактирующие объекты. Разностные сетки контактирующих объектов, температурного поля, представлены на рис. 27.

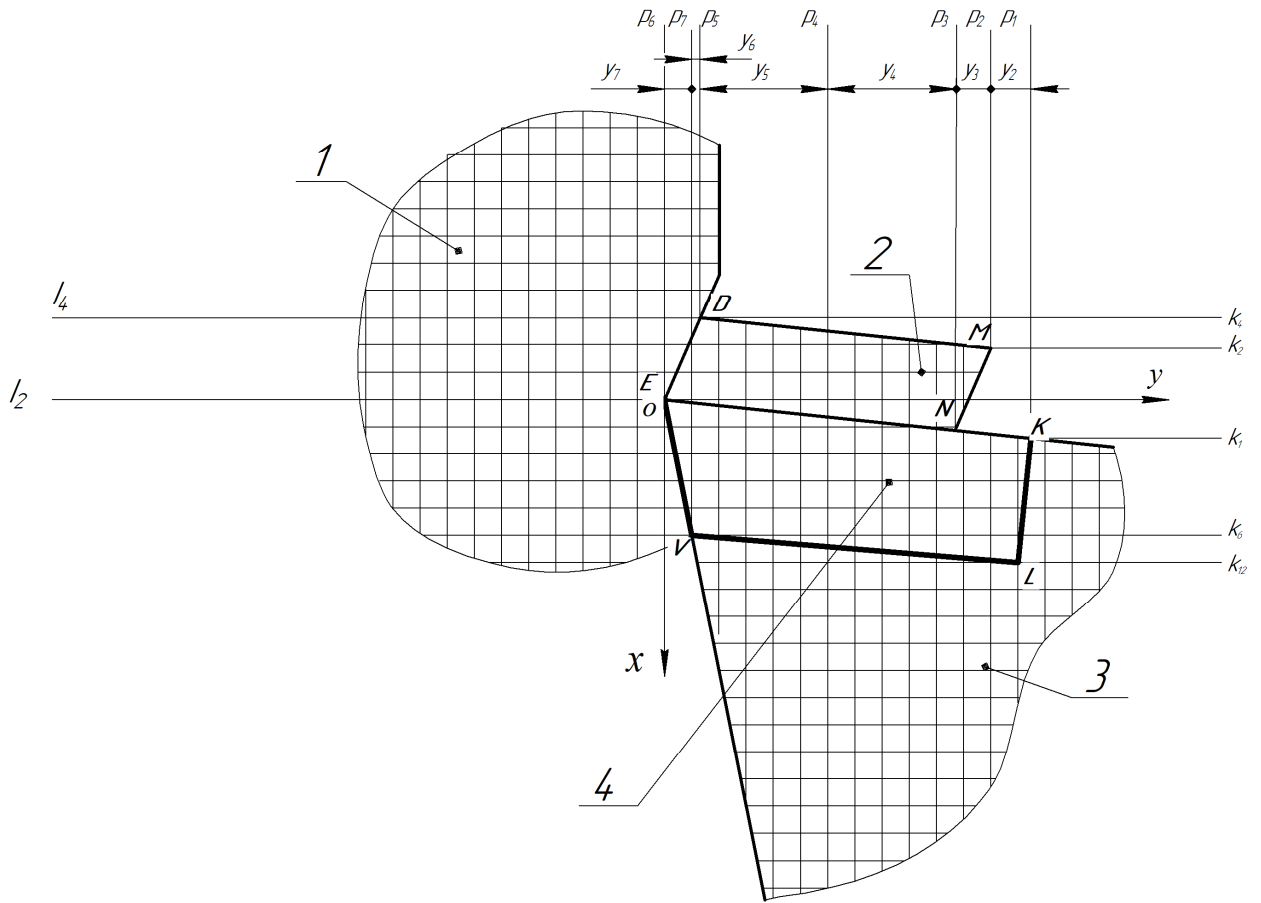


Рисунок 27 – Разностная сетка объектов теплообмена при точении:  
1 – заготовка; 2 – режущая пластина; 3 – стружка; 4 – корпус резца

Заготовку считаем неподвижной 1, а режущая пластина 2, корпус резца 4, стружка 3 и плоскость сдвига  $DE$  перемещаются относительно заготовки со скоростью  $V$ . Система координат  $xoy$  связана с режущей пластиной 2 и она перемещается относительно заготовки в направлении оси  $ox$  со скоростью  $V$ .

Уравнения теплопроводности для заготовки 1, режущей пластины 2, стружки 3 и корпуса резца 4 имеют следующий вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{1}{c_1 \cdot \rho_1} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) \right] - V \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x}; \quad (194)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{1}{c_2 \cdot \rho_2} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) \right]; \quad (195)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{1}{c_3 \cdot \rho_3} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) \right] - V_1 \\ \cdot \frac{\partial T_3}{\partial y} \cdot \cos \gamma - V_1 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \cdot \sin \gamma; \end{aligned} \quad (196)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \frac{1}{c_4 \cdot \rho_4} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial y} \right) \right], \quad (197)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К);  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – теплоёмкости, Дж/(кг · К);  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  – плотности, кг / м<sup>3</sup>;  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – температуры контактирующих объектов, К (индексы 1 – 4 относятся к заготовке, режущей пластине, стружке и корпусу резца соответственно).

Для различных элементов расчёта, таких как заготовка, режущая пластина, стружка и корпус резца, были построены дискретные аналоги дифференциальных уравнений теплопроводности с использованием универсального метода баланса. Для идентификации каждого элемента ему был присвоен двухкомпонентный номер  $i, j$ , где  $i$  – номер расчётной точки по оси  $Ox$  (см. рис. 28), а  $j$  – номер расчётной точки по оси  $Oy$ .

Сумма всех входящих и выходящих за время  $\Delta\tau$  тепловых потоков, согласно закона сохранения энергии, (см. рис. 28) равна изменению энтальпии данного компонента (конечного объёма) [103]:

$$Q_{\text{вх}x} - Q_{\text{вых}x} + Q_{\text{вх}y} - Q_{\text{вых}y} = m_{zi,j} \cdot c_{zi,j} \cdot \frac{T_{zi,j,k+1} - T_{zi,j,k}}{\Delta\tau}, \quad (198)$$

где  $Q_{\text{вх}x}, Q_{\text{вых}x}$  – тепловой поток, входящий в элемент  $(i, j)$  и выходящий из него в направлении оси  $Ox$  соответственно, Вт;  $Q_{\text{вх}y}, Q_{\text{вых}y}$  – то же в направлении оси  $Oy$ ;  $m_{zi,j}$  – масса расчётного элемента, кг;  $c_{zi,j}$  – удельная теплоёмкость объекта, Дж/(кг·К);  $T_{zi,j,k+1}$  – температура расчётного элемента объекта в рассматриваемый момент времени, К;  $T_{zi,j,k}$  – то же в предыдущий момент времени, К;  $z$  – номер рассматриваемого объекта (от 1 до 4 соответственно для заготовки, режущей пластины, стружки и корпуса резца). Подстрочный индекс, содержащий двухкомпонентный номер расчётного элемента, указывает принадлежность соответствующего параметра к этому расчётному элементу.

Тепловой баланс может быть определён на основе следующих взаимосвязей и зависимостей:

$$Q_{\text{вх } x} = \lambda_{z, i+\frac{1}{2}, j} \cdot \frac{T_{z, i+1, j, k} - T_{z, i, j, k}}{\Delta x} \cdot \Delta y; \quad (199)$$

$$Q_{\text{вых } x} = \lambda_{z, i-\frac{1}{2}, j} \cdot \frac{T_{z, i, j, k} - T_{z, i-1, j, k}}{\Delta x} \cdot \Delta y; \quad (200)$$

$$Q_{\text{вх } y} = \lambda_{z, i, j+\frac{1}{2}} \cdot \frac{T_{z, i, j+1, k} - T_{z, i, j, k}}{\Delta y} \cdot \Delta x; \quad (201)$$

$$Q_{\text{вых } y} = \lambda_{z, i, j-\frac{1}{2}} \cdot \frac{T_{z, i, j, k} - T_{z, i, j-1, k}}{\Delta y} \cdot \Delta x; \quad (202)$$

$$m_{z, i, j} = \rho_{z, i, j} \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (203)$$

где  $\lambda_z$  – теплопроводность  $z$ -го объекта, Вт/(м·К);  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – расстояние между расчётными точками в направлении оси  $Ox$  и  $Oy$  соответственно, м.

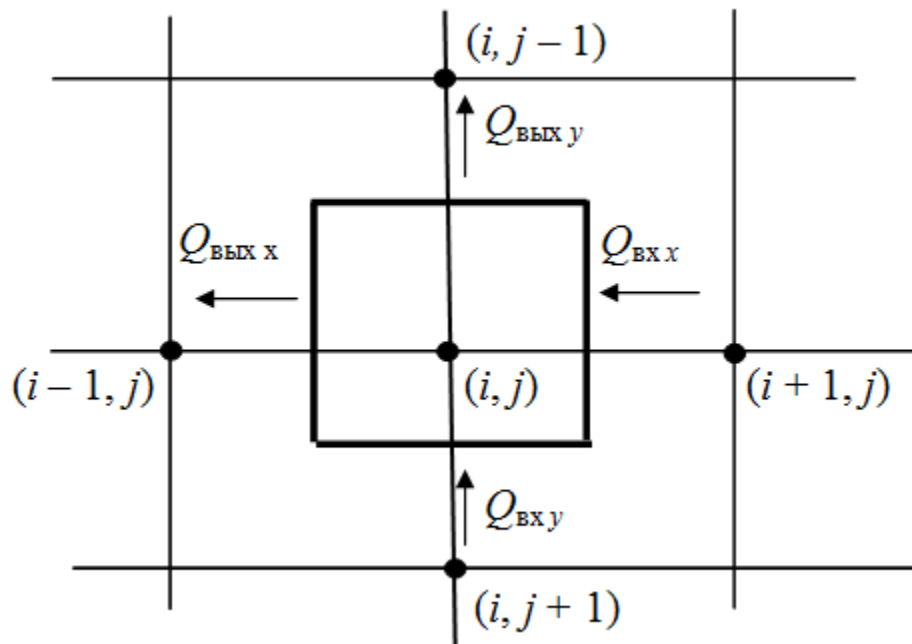


Рисунок 28 – Баланс тепла типового расчетного элемента [103]:

- – расчётные точки, задействованные в тепловом балансе;  $Q_{\text{вх } x}$ ,  $Q_{\text{вых } x}$  – тепловой поток, соответственно входящий в элемент  $(i, j)$  и выходящий из него в направлении оси  $Ox$ ;  $Q_{\text{вх } y}$ ,  $Q_{\text{вых } y}$  – то же в направлении оси  $Oy$

Дискретный аналог уравнения теплопроводности  $z$ -го объекта для типового расчётного элемента с внутренней расчётной точкой выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
T_{z i, j, k+1} = T_{z i, j, k} \cdot & \left( 1 - \frac{\Delta \tau}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_{z i, j} \cdot c_{z i, j}} \cdot \left( \lambda_{z i-\frac{1}{2}, j} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} + \lambda_{z i+\frac{1}{2}, j} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \lambda_{z i, j-\frac{1}{2}} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} + \lambda_{z i, j+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \right) + \\
& T_{z i-1, j, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2 \cdot \rho_{z i, j} \cdot c_{z i, j}} \cdot \lambda_{z i-\frac{1}{2}, j} + \\
& + T_{z i+1, j, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2 \cdot \rho_{z i, j} \cdot c_{z i, j}} \cdot \lambda_{z i+\frac{1}{2}, j} + T_{z i, j-1, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta y^2 \cdot \rho_{z i, j} \cdot c_{z i, j}} \cdot \lambda_{z i, j-\frac{1}{2}} + \\
& + T_{z i, j+1, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta y^2 \cdot \rho_{z i, j} \cdot c_{z i, j}} \cdot \lambda_{z i, j+\frac{1}{2}} .
\end{aligned} \tag{204}$$

Для всех остальных расчётных элементов зон контакта объектов и их поверхностей были разработаны дискретные аналоги дифференциальных уравнений теплопроводности, соответствующие описанным выше [106].

Для определения температуры в расчётных точках контакта между поверхностью сменной металлической пластины (СМП) и корпусом режущего инструмента (обозначена как граница  $KL$  на рисунке 27), используется следующая формула:

$$\begin{aligned}
T_{2i, p1, k+1} = T_{2i, p1, k} \cdot & \left[ 1 - \frac{2\Delta \tau}{\Delta x \cdot \Delta y (\rho_2 \cdot c_2 + \rho_4 \cdot c_4)} \cdot \left( \left( \lambda_{2i-\frac{1}{2}, p1} + \lambda_{4i-\frac{1}{2}, p1} \right) \frac{\Delta y}{2\Delta x_1} + \left( \lambda_{2i+\frac{1}{2}, p1} + \lambda_{4i+\frac{1}{2}, p1} \right) \frac{\Delta y}{2\Delta x_2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left( \lambda_{4i, p1-\frac{1}{2}} + \lambda_{2i, p1+\frac{1}{2}} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \right] + \\
& T_{2i-1, p1, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x \cdot \Delta x_1 \cdot (\rho_2 \cdot c_2 + \rho_4 \cdot c_4)} \cdot \left( \lambda_{2i-\frac{1}{2}, p1} + \lambda_{4i-\frac{1}{2}, p1} \right) + \\
& + T_{2i+1, p1, k} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x \cdot \Delta x_2 \cdot (\rho_2 \cdot c_2 + \rho_4 \cdot c_4)} \cdot \left( \lambda_{2i+\frac{1}{2}, p1} + \lambda_{4i+\frac{1}{2}, p1} \right) +
\end{aligned} \tag{205}$$

$$\begin{aligned}
& + T_{2i,p1-1,k} \cdot \frac{2\Delta\tau}{\Delta y^2 \cdot (\rho_2 \cdot c_2 + \rho_4 \cdot c_4)} \cdot \lambda_{4i,p1-\frac{1}{2}} + \\
& T_{2i,p1+1,k} \cdot \frac{2\Delta\tau}{\Delta y^2 \cdot (\rho_2 \cdot c_2 + \rho_4 \cdot c_4)} \cdot \lambda_{4i,p1+\frac{1}{2}} \cdot \\
& i = k_1 + 1 \dots k_{12} - 1; j = p_1.
\end{aligned}$$

Сложной задачей является решение уравнений теплопроводности вместе с граничными условиями при учёте перемещения контактирующих объектов, зависимости теплофизических свойств и предела текучести материала заготовки от температуры, и аналитическими методами решить её невозможно. Для решения этой проблемы был применен численный метод конечных элементов (МКЭ). Методика расчёта температур реализована в оригинальных программах.

Программное обеспечение, написано на языке программирования Basic [85]. Программа позволяет рассчитать температуру в различных точках объектов (узлах сетки) через интервал времени, определяемый устойчивостью шага интегрирования по времени [44].

В качестве исходных данных для расчёта применяем такие параметры, как размеры заготовки, режущей пластины и корпуса резца; геометрические параметры резца (передний угол  $\gamma$ , главный угол в плане  $\phi$ ); элементы режима точения (скорость резания  $V$ , подача  $S_{об}$ , глубина резания  $t_r$ ); теплофизические параметры материалов режущей части резца, корпуса резца и заготовки; число циклов обработки (число оборотов заготовки); параметры расчётной сетки. На основе этих данных программа осуществляет расчёт составляющей силы резания  $P_z$  и температур в узлах сетки.

Температура, зафиксированная в определённый момент времени, используется для расчёта теплофизических характеристик объектов и механических свойств материала заготовки в следующий момент. При расчёте интенсивности нормальных и тангенциальных напряжений на плоскости сдвига учитывается температура деформируемого слоя материала заготовки.

Фиксировали температуры в точках, расположенных на площадках контакта передней поверхности режущей пластины с образующейся стружкой и задней поверхности пластины с заготовкой, а также в заготовке на различном расстоянии от обрабатываемой поверхности.

Программа «Расчет температуры резания при точении с наложением вибраций» зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ (Приложение 3).

### 3.3.2. Численное моделирование температур

Для проведения численного моделирования были использованы различные материалы заготовок: Сталь 45, Сталь 40X и 12X18H10T. Выбор данных марок материалов обусловлен тем, что они относятся к разным группам материалов по обрабатываемости резанием. Численное моделирование температурного поля выполнили при следующих условиях: материал заготовки – сталь 40X; материал режущей части резца – твердый сплав марки T15K6; углы инструмента  $\gamma = -4^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ; скорость резания  $V = 50, 100, 150$  и  $200$  м/мин; подача  $S_{об} = 0,21$  мм/об; глубина резания  $t_r = 1$  мм; коэффициенты трения  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ . Механические и теплофизические характеристики материалов заготовки и резца в зависимости от температуры определяли по данным [12, 51].

Проведена проверка адекватности моделей путём сравнения результатов расчёта температур при точении с экспериментальными результатами, приведенными в [18]. Результаты, полученных расчётным и экспериментальным [18] методами, показывают расхождение не более 10% (табл. 2), что свидетельствует об адекватности разработанной методики [99].

Таблица 2 – Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента [99]

Скорость резания $V$ , м/мин	Температура резания расчетная $T$ , °C	Температура резания экспериментальная $T_z$ , °C[18]	Расхождение расчетной и экспериментальной температур $\delta$ , %
50	755	750	0,7
100	961	880	8,4
150	992	980	1,2
200	1086	1060	2,4

Установленному допуску процентного содержания в стали различных химических элементов, в частности углерода, а также легирующих компонентов соответствует достаточно широкий разброс механических свойств. В углеродистых, конструкционных и низколегированных сталях он достигает 20%, в высоколегированных до 30 ... 40% [13, 28, 51, 88]. Вышеуказанные причины ведут к разбросу значений температуры. Для оценки влияния колебаний физико-механических свойств материала заготовки на температуру выполнены численные эксперименты. Принимаем допущение, что предел текучести материала заготовки изменяется в пределах  $\pm 10\%$ .

Численное моделирование температурного поля выполнили при следующих условиях [134, 135]: материал заготовки – сталь 45 и 12X18H10T; материал режущей части резца – твердый сплав марки T15K6; углы инструмента  $\gamma = -4^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ; скоростью резания  $V$  и подачей  $S_{об}$  варьировали; глубина резания  $t_r = 0,5$  мм; коэффициенты трения  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ . Моделирование температур при точении заготовок из стали 45 выполнили при номинальном значении предела текучести  $\sigma_S = 355$  МПа, а также при максимальном и минимальном значениях, равных  $\sigma_S + 0,1 \cdot \sigma_S = 391$  МПа и  $\sigma_S - 0,1 \cdot \sigma_S = 319$  МПа. Результаты расчёта представлены в табл. 3.



Таблица 3 – Результаты расчёта силы резания и контактных температур резания при варьировании параметром  $\sigma_S$ : материал заготовки – сталь 45 [134]

Напряжение текучести $\sigma_S$ , МПа	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $S_{об}$ , мм/об	Температура на передней поверхности $T_1$ , °С	Температура на задней поверхности $T_2$ , °С	Тангенциальная составляющая силы резания $P_z$ , Н
1	2	3	4	5	6
391	60	0,15	357	331	70
	240	0,15	749	520	68
	60	0,3	392	430	111
	240	0,3	1156	809	106
355	60	0,15	326	304	63
	240	0,15	680	476	62
	60	0,3	358	393	101
	240	0,3	1059	740	97
319	60	0,15	298	278	57
	240	0,15	611	431	56
	60	0,3	324	355	91
	240	0,3	961	670	88

Из результата расчёта видно, что при изменении параметра  $\sigma_S$  стали 45 в пределах  $\pm 10\%$  колебания температуры на передней поверхности составляют  $20\%$  ( $T_1 \pm 10\%$ ), на задней поверхности –  $18\%$  ( $T_2 \pm 9\%$ ). Колебания тангенциальной составляющей силы резания  $\Delta P_z = 20\%$  ( $P_z \pm 10\%$ ). Температура на передней поверхности инструмента  $T_1$  при варьировании подачей  $S_{об}$  от 0,1 до 0,3 мм/об изменяется на 9 ... 10% при скорости резания  $V = 60$  м/мин и 54 ... 57% при скорости резания  $V = 240$  м/мин [134, 135]. С увеличением подачи в вышеуказанном диапазоне температура на задней поверхности инструмента изменяется на 29% при скорости резания  $V = 60$  м/мин и 55% при скорости резания  $V = 240$  м/мин. Варьирование скоростью резания от 60 до 240 м/мин способствует повышению температур  $T_1$  в 2,1 ... 3,0 раза,  $T_2$  – в 1,6 ... 1,9 раза. Аналогичное исследование провели и для контактной пары 12X18H10T – Т15К6. Результаты представлены в табл. 4.

При изменении параметра  $\sigma_S$  стали 12X18H10T в пределах  $\pm 10\%$  колебания температуры на рабочих поверхностях резца составляют 18%

( $T_1 \pm 9\%$ ), ( $T_2 \pm 9\%$ ), колебания тангенциальной оставляющей силы резания  $\Delta P_z = 20\%$  ( $P_z \pm 10\%$ ). При изменении подачи  $S_{об}$  с 0,1 до 0,3 мм/об контактные температуры  $T_1$  возрастают на 48% [134, 135]. При скорости резания  $V = 60$  м/мин, изменение подачи также оказывает влияние на температуру на задней поверхности инструмента  $T_2$ , увеличивая ее на 38%. При более высокой скорости резания  $V = 240$  м/мин изменение подачи приводит к росту температуры  $T_2$  на 64%.

Таблица 4 – Результаты расчёта силы резания и контактных температур резания при варьировании параметром  $\sigma_s$ : материал заготовки – сталь 12X18H10T [134]

Напряжение текучести $\sigma_s$ , МПа	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $S_{об}$ , мм/об	Температура на передней поверхности $T_1$ , °C	Температура на задней поверхности $T_2$ , °C	Тангенциальная составляющая силы резания $P_z$ , Н
216	60	0,1	292	250	39
	240	0,1	925	598	37
	60	0,3	434	346	61
	240	0,3	1370	981	60
196	60	0,1	269	230	36
	240	0,1	855	553	34
	60	0,3	398	318	56
	240	0,3	1267	907	55
176	60	0,1	245	209	31
	240	0,1	783	506	31
	60	0,3	362	289	50
	240	0,3	1161	830	49

Варьирование скоростью резания от 60 до 240 м/мин приводит к увеличению температур  $T_1$  в 3,2 раза,  $T_2$  – в 2,4 ... 2,9 раза.

В процессе численного моделирования величиной износа  $h_z$  варьировали в пределах  $h_z = 0,1 \dots 0,5$  мм [134]. Износ, равный 0,3 ... 0,5 мм, соответствует предельному износу инструмента в процессе чистовой обработки [37]. Результаты исследования приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта силы резания и контактных температур при варьировании величиной износа  $h_3$ :  $V = 240$  м/мин;  $S_{об} = 0,3$  мм/об;  $t_r = 0,5$  мм [134]

Материал заготовки	Износ по задней поверхности резца $h_3$ , мкм	Температура на передней поверхности $T_1$ , °С	Температура на задней поверхности $T_2$ , °С	Тангенциальная составляющая силы резания $P_z$ , Н
Сталь 45	0,1	982	683	85
	0,2	1059	740	97
	0,3	1121	802	109
	0,4	1371	853	120
	0,5	1394	847	133
Сталь 12Х18Н10Т	0,1	1292	881	48
	0,2	1267	907	55
	0,3	1229	932	62
	0,4	1366	955	69
	0,5	1391	964	77

При точении заготовок из стали 45 увеличение износа по задней поверхности  $h_3$  на 0,1 мм в диапазоне  $h_3 = 0 \dots 0,3$  мм приводит к увеличению тангенциальной силы резания в среднем на 12%, а контактные температуры увеличиваются на 6 ... 8%. При достижении величины  $h_3 = 0,4$  мм контактные температуры значительно увеличивается. Увеличение износа резца по задней поверхности от 0,1 до 0,3 мм приводит к увеличению силы резания на 22%, контактных температур  $T_1$  и  $T_2$  на 12 и 15 %. При увеличении износа от 0,1 до 0,5 мм силы резания увеличиваются на 56%, а температуры  $T_1$  и  $T_2$  на 42 и 24% [134].

При точении заготовок из стали 12Х18Н10Т с увеличением износа по задней поверхности  $h_3$  на 0,1 мм в диапазоне  $h_3 = 0 \dots 0,3$  мм тангенциальная сила резания увеличивается в среднем на 14%, контактная температура  $T_1$  не изменяется, а  $T_2$  увеличивается на 3%. При достижении величины  $h_3 = 0,4$  мм температура  $T_1$  значительно увеличивается [134].

При изменении напряжения текучести материала заготовки в пределах 20% диапазон рассеивания силы резания и контактных температур составляет 18 ... 20%.

С помощью проведенных исследований определена степень влияния величины износа инструмента по задней поверхности на силы резания и контактные температуры.

Программное обеспечение позволяет также рассчитать контактные температуры с наложением колебаний [85, 99].

Вышеприведенная методика расчёта температурного поля процесса точения [88] не позволяет получить в явном виде зависимости, связывающие температуры с элементами режима резания и износом инструмента. Для получения подобных зависимостей температуры на передней  $T_1$  и задней  $T_2$  поверхностях инструмента и в зоне пластической деформации  $T_g$  рассчитали с использованием разработанного программного обеспечения и, выполнив обработку результатов расчёта, получили регрессионные зависимости вида:

$$T_{1,2,g} = f(V, S_{об}, t_r, h_3). \quad (206)$$

Полученные зависимости для различных обрабатываемых и инструментальных материалов приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Регрессионные зависимости для расчета контактных температур

Материал заготовки	Инструментальный материал	Температура на передней поверхности инструмента $T_1$ , °C	Температура на задней поверхности инструмента $T_2$ , °C	Температура в зоне пластической деформации $T_g$ , °C
1	2	3	4	5
Сталь 45	T15K6	$-347,13+4,06*V$ $+1943,75*S_{об}$ $6*t_r+540,5*h_3$	$-68,63+$ $1,63*V+1083,18*S_0$ $ε-5.25*t_r+252,25*h_3$	$7,13+0,22*V+30*S_{об}$ $-1,00*t_r+144,50*h_3$
12X18H10T		$-248,29+3,80*V$ $+1581,88*S_{об}$ $1.25*t_r+347.75*h_3$	$-239,46+$ $2,17*V+1541,88*S_0$ $ε-0.75*t_r+211.75*h_3$	$16,04+0,17*V-$ $13,75*S_{об} -1*t_r+85.$ $5*h_3$
Сталь 40X		$-446,38+6,00*V$ $+2966,88*S_{об}+81,75*t_r$ $+891,75*h_3$	$-114,5+2,80*V$ $+2113,75*S_{об}+5,$ $5*t_r+474*h_3$	$50,5+0,25*V+43,13*$ $S_{об}-$ $1,25*t_r+229,75*h_3$
Сталь 45	T5K10	$-880,75+5,31*V$ $+3056,67*S_{об}$ $7*t_r+205,67*h_3$	$-291,33+2,10*V$ $+1431,67*S_{об}$ $9*t_r+291,67*h_3$	$1,67+0,23*V$ $+76,67*S_{об}$ $4,67*t_r+105,33*h_3$
12X18H10T		$-777,92+3,91*V$ $+2326,67*S_{об}$ $4,33*t_r+496,33*h_3$	$-480,75+2,42*V$ $+1676,67*S_{об}$ $2,67*t_r+98,67*h_3$	$-7,25+0,23*V$ $+38,33*S_{об}$ $2,67*t_r+98,67*h_3$
Сталь 45	BK8	$-418,67+4,07*V$ $+2058,33*S_{об}$ $179*t_r+351*h_3$	$-242+$ $2,05*V+1275*S_{об}$ $18.33*t_r+287,67*h_3$	$2,42+0,25*V-$ $51,67*S_{об}$ $4,33*t_r+96,33*h_3$
12X18H10T		$-578,17+2,96*V$ $+1583,33*S_{об}+103,33*$ $t_r+454*h_3$	$-517,08+$ $2,31*V+1661,67*S_0$ $ε+59*t_r+235,67*h_3$	$-52,58+0,30*V-$ $140*S_{об}$ $+19,33*t_r+69,33*h_3$

Данные зависимости использовали для расчёта температур в программах для коррекции режима обработки «Коррекция режима точения» и «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации» [83, 84].

Для учёта зависимостей предела прочности  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_S$  и модуля упругости  $E$  материала заготовки от температуры в зоне пластической деформации использовали следующий подход. По данным [51, 68, 88] определили изменение данных параметров ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_S$  и  $E$ ) в зависимости от температуры (рис. 29) и рассчитали коэффициенты их изменения с повышением температуры на 1°C. Данные для построения графиков и расчета коэффициентов (табл. 7) были взяты из источников [51, 68, 88].

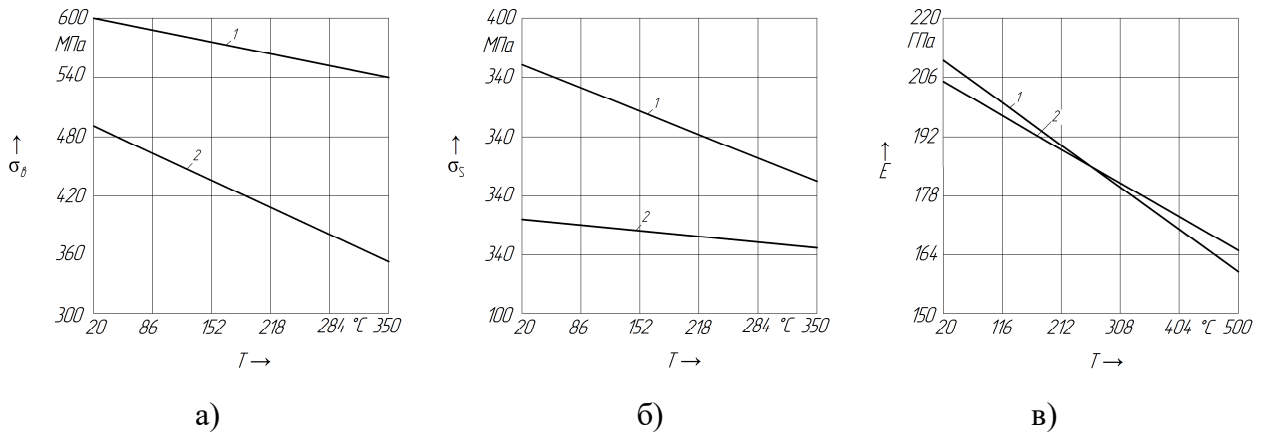


Рисунок 29 – Графики, иллюстрирующие изменения предела прочности  $\sigma_b$ (а), предела текучести  $\sigma_s$ (б) и модуля упругости  $E$ (в) материала заготовки от температуры:  
1 – сталь 45; 2 – 12X18H10T

Результаты расчета коэффициентов приведены в табл.7.

Таблица 7 – Коэффициенты, характеризующие изменения механических свойств материала заготовки в зависимости от температуры

Материал заготовки	Коэффициент, характеризующий изменение предела прочности $K_{\sigma_b}$	Коэффициент, характеризующий изменение предела текучести $K_{\sigma_s}$	Коэффициент, характеризующий изменение модуля упругости $K_E$
Сталь 45	-0,176	-0,376	-0,104
12X18H10T	-0,418	-0,088	-0,083

Моделирование температур позволяет оценить параметры, связанные с работоспособностью инструмента, и осуществить моделирование параметров процесса течения, зависящих от температур. Это позволяет рассчитать значения выходных параметров процесса течения в любой момент времени.

Методика расчёта выходных параметров процесса обработки приведена выше (см. п. 3.2).

Для анализа изменения экспериментальных (фактических) значений параметров процесса обработки во времени необходимо применить статистический подход, позволяющий определить изменяющиеся во времени показатели процесса.

### 3.4. Статистический анализ параметров процесса механической обработки

Фактические значения выходных параметров могут быть определены на основе измерений. Каждое измерение представляет собой случайную величину, поэтому требуется статистический анализ полученных результатов.

Различные факторы систематического и случайного характера влияют на значения и разброс выходных и текущих параметров. К систематическим факторам относятся погрешности изготовления и износа технологического оборудования и инструментов. К случайным факторам относятся колебания механических свойств материала и припуска на обработку. Результирующая величина рассеивания параметра представляет сумму систематической и случайной составляющих.

Методика статистического анализа фактических значений выходных параметров основана на разделении величины (поля) рассеивания параметров на систематическую и случайную составляющие. Для выделения этих составляющих параметров использован дисперсионный метод [111].

В статистическом анализе используется понятие "мгновенного поля рассеивания" параметров, определяемое на основе небольших выборок, собранных за короткие промежутки времени  $\Delta t$  [8]. При этом считают, что систематические переменные погрешности изменяются незначительно и их изменениями можно пренебречь [111].

Зная функции изменения среднего арифметического значения  $\bar{Y}(\tau)$  и границ мгновенного рассеивания параметров  $\omega_y$  (верхнюю  $Y_v(\tau)$  и нижнюю  $Y_n(\tau)$  границы мгновенных полей рассеивания) во времени (рис. 30), можно рассчитать фактическое время подналадки [110, 111].

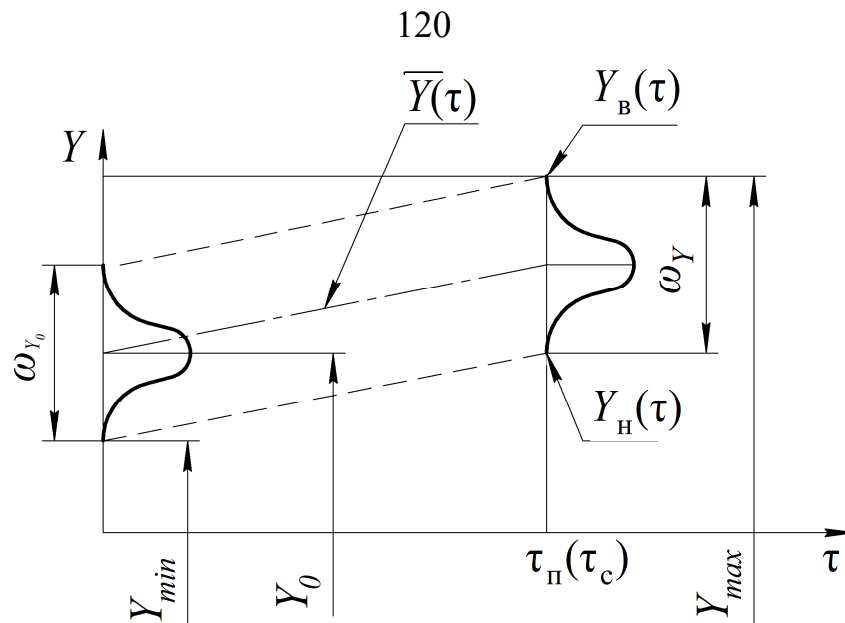


Рисунок 30 – График для определения времени подналадки или периода стойкости инструмента [111]

Время подналадки  $\tau_{п}$  (период стойкости  $\tau_c$ ) равно меньшему из рассчитанных значений  $\tau_B$  и  $\tau_H$ :

$$\tau_{п}(\tau_c) = \min(\tau_B; \tau_H), \quad (207)$$

где  $\tau_B$  и  $\tau_H$  рассчитывают как:

$$Y_i^{max} = \bar{Y}(\tau) + \omega_y(\tau)/2; \quad (208)$$

$$Y_i^{min} = \bar{Y}(\tau) - \omega_y(\tau)/2, \quad (209)$$

где  $Y_i^{max}$  и  $Y_i^{min}$  – наибольшее и наименьшее предельное значение выходного параметра.

Для выявления характеристик изменения среднего значения параметра  $\bar{Y}(\tau)$ , верхней границы  $Y_B(\tau)$  и нижней границы  $Y_H(\tau)$  мгновенных полей рассеивания следует обработать результаты экспериментов.

В начале рассчитывают мгновенные поля рассеивания выходных параметров и их средние значения. Далее проводят корреляционно-регрессионный анализ и выводят математические функции для расчёта  $\bar{Y}(\tau)$ ,  $Y_B(\tau)$  и  $Y_H(\tau)$ .

Ниже приведена последовательность статистического анализа параметров технологического процесса.



1. Проверяют гипотезу о нормальном распределении поля мгновенного рассеивания параметра, используя критерий Пирсона или  $w_i$  – критерий [63]:

$$w_i = \frac{\left[ \sum_{i=1}^q a_{n-i+1} (Y_{u,(n-i+1)} - Y_{ui}) \right]^2}{\left( \sum_{i=1}^n Y_{ui} \right)^2 - \frac{\sum_{i=1}^n Y_{ui}^2}{n}}, \quad (210)$$

где  $a_{n-i+1}$  – коэффициент, значение которого для  $n = 3 \dots 36$  и  $i = 1, 2, \dots, q$  приведено в работе [63];  $q = n/2$  – при нечётном числе параллельных опытов;  $q = (n-1)/2$  – при чётном числе параллельных опытов;  $Y_{u,(n-i+1)}$ ,  $Y_{ui}$  – величины из ранжированной выборки значений параметра ( $Y_{u1} \leq Y_{u2} \leq Y_{u3}$ ).

2. Рассчитывают среднее значение параметра  $\bar{Y}_i$  и дисперсию  $\sigma_i^2$  на  $i$ -м интервале работы инструмента:

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^S Y_{ij}}{S}; \quad (211)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^S (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{S-1}, \quad (212)$$

где  $S$  – количество значений параметра, зафиксированных на  $i$ -ом интервале работы инструмента;  $j$  – порядковый номер параметра.

3. Определяют среднее значение  $\bar{Y}$  всей совокупности параметров  $Y_i$  и дисперсия суммарного поля рассеивания параметра  $\sigma^2(Y)$ :

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j}{m}; \quad (213)$$

$$\sigma^2(Y) = \frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2}{m-1}, \quad (214)$$

где  $m$  – количество значений параметра, зафиксированных за рассматриваемый период работы инструмента.

4. Рассчитывают дисперсию  $\sigma^2 \bar{Y}(\tau)$ , вызванную изменением функции среднего значения параметра  $\bar{Y}(\tau)$ :

$$\sigma^2(\bar{Y}(\tau)) = \frac{\sum_{j=1}^n (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2}{n-1}, \quad (215)$$

где  $n$  – число интервалов времени  $\Delta\tau$ , которое определяется:

$$n = \frac{\tau_{\Sigma}}{\Delta\tau}, \quad (216)$$

где  $\tau_{\Sigma}$  – рассматриваемый период работы инструмента.

5. Определяют среднее значение  $\bar{\sigma}(\tau)$  средних квадратических отклонений  $\sigma_i$  и дисперсию  $\sigma^2(\sigma_y(\tau))$ , вызванную изменением во времени функции среднего квадратического отклонения:

$$\bar{\sigma}(y(\tau)) = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}; \quad (217)$$

$$\sigma^2(\sigma_y(\tau)) = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_y(\tau))^2}{n-1}. \quad (218)$$

6. Дисперсия, вызванная постоянной составляющей функции  $\sigma_y(\tau)$ , принимается равной минимальной из дисперсий  $\sigma_i^2$ , рассчитанных для различных интервалов времени работы инструмента:

$$M^2(\sigma_y(\tau)) = \min\{\sigma_i\}. \quad (219)$$

Определяется дисперсия суммарной погрешности параметра [89]:

$$\sigma^2(y) = \sigma^2(\bar{y}(\tau)) + \sigma^2(\sigma_y(\tau)) + M^2(\sigma_y(\tau)). \quad (220)$$

7. Подбирают эмпирические зависимости, описывающие изменение средних значений параметров  $\bar{Y}_l$ , верхней и нижней границ мгновенного поля рассеивания  $Y_b(\tau)$  и  $Y_n(\tau)$  во времени. При подборе эмпирических формул можно использовать полиномы типа:

$$y = A_0 + A_1 \cdot \tau + A_2 \cdot \tau^2, \quad (221)$$

где  $A_0, A_1, A_2$  – коэффициенты;  $\tau$  – время.

Если установлено, что рассеивание параметра подчиняется закону нормального распределения, то мгновенное поле рассеивания на  $i$ -ом интервале:

$$\omega_i = 6\sigma_i. \quad (222)$$

8. Рассчитывают координаты верхней и нижней границ мгновенных полей рассеивания для различных интервалов времени по формулам:

$$Y_{vi} = \bar{Y}_i + \frac{\omega_i}{2}; \quad (223)$$

$$Y_{ni} = \bar{Y}_i - \frac{\omega_i}{2}. \quad (224)$$

9. Подбирают эмпирические зависимости, описывающие изменения параметров  $Y_{vi}$  и  $Y_{ni}$  во времени.

10. По зависимости (207) рассчитывается время подналадки и/или период стойкости инструмента.

### 3.5. Выводы

1. Выбраны контролируемые выходные и управляемые параметры процесса токарной обработки. Получен комплекс математических зависимостей, позволяющих рассчитать выходные параметры: производственную погрешность диаметральных размеров деталей, обработанных точением (21), (125) – (154); шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$  (157), (158), (160) – (166). Получены зависимости (167) – (169) для расчёта рассеивания параметра  $Ra$ .

2. Разработана методика расчёта температур резания. В отличие от известных, данная методика, позволяет учесть выделение теплоты в области стружкообразования и на поверхностях контакта резца с заготовкой и стружкой, взаимное перемещение контактирующих объектов (заготовки и

стружки относительно резца), зависимость теплофизических характеристик материалов контактирующих объектов (режущей части инструмента и заготовки) и механических свойств материала заготовки от температуры. Разработано программное обеспечение для расчёта температур.

3. Исследовано влияние износа резца на контактные температуры и тангенциальную составляющую силу резания при точении заготовок из стали 45 и 12X18Н10Т. При достижении величины износа резца  $h_3 = 0,4$  мм контактные температуры резко возрастают.

4. При разбросе значений напряжения текучести материала заготовки в пределах 20% диапазон рассеивания силы резания и контактных температур составляет 18 ... 20%. Это дает возможность определить поле рассеивания контактных температур при точении в зависимости от величины предела текучести материала заготовки  $\sigma_s$ .

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта функций, характеризующих изменение во времени средних арифметических значений и границ мгновенных полей рассеивания фактических значений выходных параметров и текущих показателей процесса точения.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА ТОЧЕНИЯ

### 4.1. Разработка программного обеспечения для коррекции режима точения

#### 4.1.1. Разработка программного обеспечения для коррекции режима точения в условиях неопределенности технологической информации

Алгоритм коррекции режима точения в условиях, когда влиянием износа инструмента на параметры процесса можно пренебречь, представлен на рис. 31.

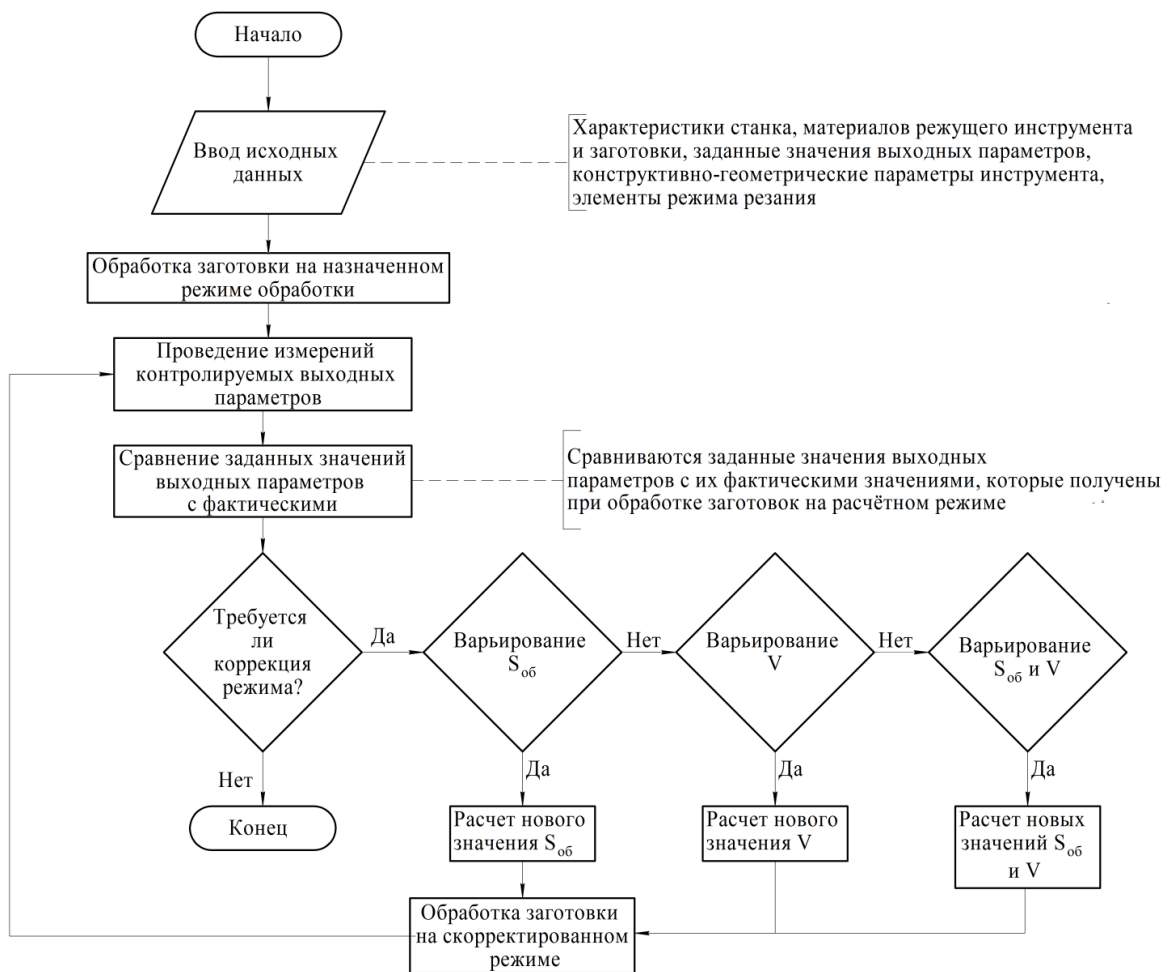


Рисунок 31 – Алгоритм коррекции режима резания

Предварительно рассчитывается режим обработки, либо назначается по нормативам или каталогу режущего инструмента. В программу вводятся исходные данные: элементы режима резания; параметры станка (мощность и КПД двигателя, жёсткость станка, диапазоны частот вращения шпинделя и подач); конструктивные параметры резца (передний угол  $\gamma$ , главный  $\varphi$  и вспомогательный  $\varphi_1$  углы в плане, радиус при вершине режущей кромки  $r$ , вылет резца из резцедержателя); размеры и материалы заготовки, режущей части инструмента и державки резца. Значения мощности, КПД двигателя главного привода, жесткости станка определяются по паспорту станка или по справочным данным [89]. Физико-механические характеристики материалов заготовки и державки резца определяем по справочникам [22, 51, 88].

Далее производится обработка партии заготовок на заданном (расчётном) режиме обработки. Измеряются фактические значения выходных параметров (шероховатость  $Ra$  и диаметр обработанной поверхности  $d$ ).

Рассчитываются значения выходных параметров и текущих показателей процесса обработки (составляющие силы резания –  $P_y$ ,  $P_z$ ). Среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$  рассчитывается по зависимости (157), погрешность диаметрального размера  $\omega$  по зависимости (21), составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_z$  по зависимостям (127) и (30) соответственно.

По результатам сравнения заданных (регламентированных) и фактических значений выходных параметров принимается решение о целесообразности коррекции режима резания (зависимости (55) – (57)). Возможны различные сценарии:

- 1) Все фактические резервы могут быть положительными.
- 2) Возможны случаи, когда часть или все фактические резервы окажутся отрицательными.

3) Появление ситуации, когда один или несколько фактических резервов будут равны нулю, при этом остальные параметры будут иметь положительные значения.

Если фактические значения выходных параметров превышают или равны заданным значениям, то режим обработки следует подвергнуть коррекции с целью снижения вероятности получения брака.

Когда по всем выходным параметрам имеет место положительный резерв, коррекция режима необходима, если:

$$\frac{Y_i^{max} - Y_i^{0\Phi}}{Y_i^{max}} > \varepsilon, \quad (225)$$

где  $Y_i^{0\Phi}$  – фактическое значение  $i$ -го выходного параметра, полученное при обработке на первоначально назначенном режиме;  $\varepsilon$  – заданная величина (например, если  $\varepsilon = 0,1$ , то разность между заданными и фактическими значениями данного параметра превышает 10%). Если условие (225) не выполняется, то коррекцию режима можно не проводить.

Если хотя бы по одному из выходных параметров имеется отрицательный фактический резерв, то режим резания корректируется с целью предотвращения получения бракованных деталей.

Выбирается приоритетный выходной параметр (шероховатость  $Ra$  или погрешность диаметрального размера  $\omega$ ). Алгоритм выбора приоритетного параметра приведен в п.2.2.

Затем необходимо выбрать план варьирования управляемыми параметрами (скоростью резания  $V$ , либо подачей  $S_{об}$ , либо одновременно скоростью резания  $V$  и подачей  $S_{об}$ ).

Для приближения назначенного режима к оптимальному уровню определяют интервалы варьирования управляемыми параметрами  $\Delta X_j$  (скорость резания  $V$  или (и) подача  $S_{об}$ ) по зависимости (55).

Рассмотрим пример реализации методики коррекции режима резания при варьировании одним управляемым параметром (подачей  $S_{об}$ ) и

измерении двух выходных параметров (параметр шероховатости  $Ra$  и погрешность диаметрального размера  $\omega$ ).

На первом этапе рассчитывается режим резания или назначается по каталогу режущего инструмента. На расчётном (назначенном) режиме обработки проводится обработка партии заготовок и фиксируются значения выходных параметров. Рассмотрим ситуацию, когда все измеряемые параметры имеют положительный резерв.

Выявляют выходной параметр, имеющий меньшее значение относительного положительного резерва (запаса), и определяют величину изменения управляемого параметра (в данном случае подачи), которая сведёт к нулю резерв этого параметра. Предположим, что меньший положительный резерв имеет параметр шероховатости  $Ra$ , то значение управляемого фактора (подачи) следует изменить на величину  $\Delta S_{об}$ :

$$\Delta S_{об} = \frac{Ra^{max} - Ra^{0\phi}}{k' \cdot \frac{dRa}{dS_{об}}(p) \cdot k_3}, \quad (226)$$

где  $Ra^{max}$  – заданное (регламентированное) значение параметра шероховатости;  $Ra^{0\phi}$  – фактическое значение выходного параметра шероховатости, полученное на назначенном режиме обработки;  $k'$  – число входных управляемых параметров (в данном случае  $k' = 1$ );  $k_3$  – коэффициент запаса ( $k_3 = 1,1 \dots 2,0$ );  $\frac{dRa}{dS_{об}}(p)$  – частная производная, показывающая степень влияния подачи  $S_{об}$  на выходной параметр  $Ra$ .

Производные получают дифференцированием математических зависимостей. Затем значения  $\Delta S_{об}$  используем для оценки изменения второго контролируемого параметра  $\omega$ :

$$\Delta \omega = \frac{d\omega}{dS_{об}}(p) \cdot \Delta S_{об}, \quad (227)$$



где  $\frac{d\omega}{dS_{об}}(p)$  – частная производная, показывающая степень влияния подачи  $S_{об}$  на выходной параметр  $\omega$ .

Если резерв параметра  $\omega$  является положительным, то управляемый параметр  $S_{об}$  изменяют на величину  $\Delta S_{об}$  и получают новое значение подачи  $S_{об}^1$ :

$$S_{об}^1 = S_{об} + \Delta S_{об}. \quad (228)$$

Проводят обработку заготовок на скорректированном режиме, измеряют значения выходных параметров и принимают решение о целесообразности дальнейшей коррекции режима.

Для определения интервала варьирования управляемыми параметрами на первом этапе коррекции режима используются производные, полученные в результате дифференцирования аналитических зависимостей. Зависимости для вычисления производных, демонстрирующих степень влияния управляемых параметров  $V$  и  $S_{об}$  на выходные параметры  $Ra$  и  $\omega$ , приведены в прил. 1.

Вследствие возможной некорректности математических моделей, используемых для расчёта производных, необходимый результат может быть не достигнут. Поэтому при необходимости реализуются последующий этап (этапы) коррекции режима резания, при этом для расчёта производных используются фактические (измеренные) значения выходных параметров (66).

В частном случае зависимость (66) принимает вид [108]:

$$\frac{d\omega}{dS_{об}}(\phi) = \frac{\omega^{1\phi} - \omega^{0\phi}}{S_{об}^{1\phi} - S_{об}^{0\phi}}; \quad (229)$$

$$\frac{d\omega}{dV}(\phi) = \frac{\omega^{1\phi} - \omega^{0\phi}}{V^{1\phi} - V^{0\phi}}; \quad (230)$$

$$\frac{dRa}{dS_{об}}(\phi) = \frac{Ra^{1\phi} - Ra^{0\phi}}{S_{об}^{1\phi} - S_{об}^{0\phi}}; \quad (231)$$

$$\frac{dRa}{dV}(\phi) = \frac{Ra^{1\phi} - Ra^{0\phi}}{V^{1\phi} - V^{0\phi}}, \quad (232)$$

где  $\frac{d\omega}{dS_{об}}(\phi)$ ,  $\frac{d\omega}{dV}(\phi)$ ,  $\frac{dRa}{dS_{об}}(\phi)$ ,  $\frac{dRa}{dV}(\phi)$  – частные производные, показывающие степень влияния управляемых параметров ( $V$  и  $S_{об}$ ) на выходные параметры ( $Ra$  и  $\omega$ );  $S_{об}^{0\phi}$ ,  $V^{0\phi}$  – начальные (рассчитанные или назначенные) значения скорости резания  $V$  и подачи  $S_{об}$ ;  $V^{1\phi}$ ,  $S_{об}^{1\phi}$  – скорректированные значения скорости резания  $V$  и подачи  $S_{об}$ ).

На основе разработанного алгоритма коррекции режима резания разработана программа «Коррекция режима точения» [83]. Программа разработана на языке программирования Delphi.

Методики коррекции режима резания при различных ситуациях подробно рассмотрены в п. 2.2.

В коде программы прописан ряд технических ограничений (35) – (41), которые представлены в п. 1.5, а также следующие условия:

$$\phi \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}; \quad (233)$$

$$\phi_1 \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}. \quad (234)$$

Если не выполняются вышеуказанные условия, то программа дает сигнал пользователю о том, что необходимо скорректировать исходные данные. Например, при невыполнении условия (40), то программа выдает предупреждение пользователю программы (рис. 32).

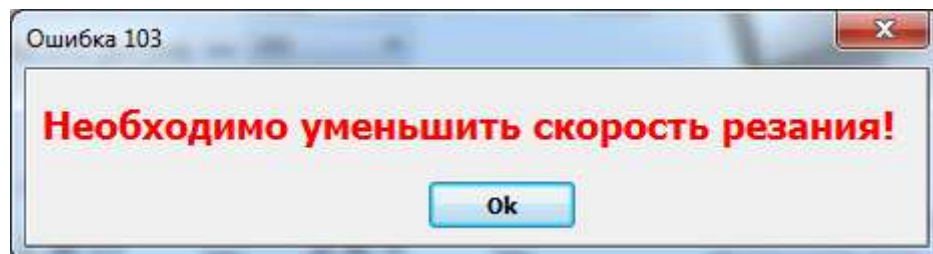


Рис. 32. Рекомендации по коррекции исходных данных при невыполнении условия (40)

Аналогичные предупреждения появляются и при невыполнении остальных условий (ограничений).

Для удобства пользователя программы (технолога) предусмотрены 3 варианта расчёта:

- 1) варьирование только подачей  $S_{об}$ ;
- 2) варьирование только скоростью резания  $V$ ;
- 3) варьирование подачей  $S_{об}$  и скоростью резания  $V$ .

Классификатор ошибок приведен в табл.8.

Таблица 8 – Классификатор ошибок

Номер ошибки	Описание ошибки	Рекомендация
101	Не выполняется условие по предельно допустимым диапазонам частоты вращения и подачи	Скорректировать исходные данные
102	Мощность привода главного движения станка не достаточна для осуществления процесса резания	Скорректировать исходные данные
103	Не выполняется ограничение по допустимой температуре резания	Скорректировать исходные данные
104	Размер (длина) обрабатываемой поверхности заготовки превышает длину ее вылета	Увеличить длину вылета заготовки
105	Не выполняется условие по обеспечению прочности державки резца	Скорректировать исходные данные
106	Не выполняется условие по значениям главного и вспомогательного углов в плане	Применить РИ с другой геометрией (углы $\varphi$ и $\varphi_1$ )
107	На заданном режиме резания в поверхностном слое заготовки температура резания достигает значения, при котором образуются растягивающие тепловые остаточные напряжения	Скорректировать исходные данные
108	На заданном режиме резания не обеспечивается требуемая точность обработки	Скорректировать исходные данные

Программа также генерирует вкладку «Помощь», в которой даны рекомендации по работе с данной программой (рис. 33).

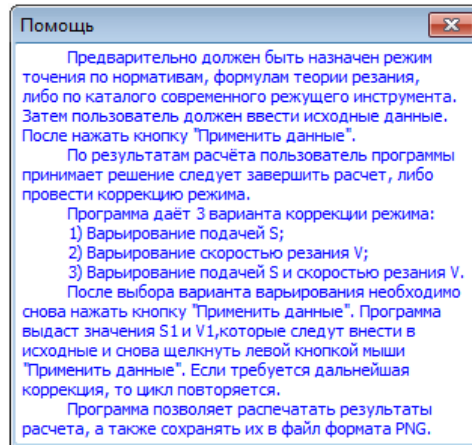


Рисунок 33 – Вкладка «Помощь» программы «Коррекция режима точения»

Программа позволяет выводить результаты расчёта на печать, а также сохранять их в файл формата PNG. Интерфейс программы приведен на рис. 34.

Коррекция режима точения

Файл Справка

**Параметры станка**

Мощность двигателя, кВт

КПД двигателя

$n_{min}$  =  об/мин  $n_{max}$  =  об/мин

$S_{min}$  =  мм/об  $S_{max}$  =  мм/об

**Параметры процесса точения**

$V$  =  м/мин  $S$  =  мм/об

$t$  =  мм  $d$  =  мм

Требуемая шероховатость  $R_a$ , мкм

Стойкость резца, мин

Длина обработки, мм

Длина вылета заготовки, мм

Материал заготовки

Допуск на диаметральный размер, мм

Допуск на черновой проход, мм

Количество заготовок в партии, шт.

Обработка с СОЖ

**Параметры резца**

$r$  =  мм  $\varphi$  =  град.  $\varphi_1$  =  град.

$\gamma$  =  град.  $\alpha$  =  град.

Материал режущей части

Ширина державки резца, мм

Высота державки резца, мм

Вылет резца, мм

Материал державки резца

Фактическая шероховатость  $R_a$ , мкм

Фактическая погрешность diam. размера, мм

Кoeffициент запаса

1-й параметр

$R_a$ , мкм

$w$ , мм

**Скорректированные значения**

$S1$ , мм/об

$V1$ , м/мин

РАСЧЁТ    Расчет по ФП

Рисунок 34 – Интерфейс программы «Коррекция режима точения»

Данная программа разработана для коррекции режима точения при малой наработке инструмента, когда влиянием износа на параметры процесса можно пренебречь. Программа «Коррекция режима точения» зарегистрирована в государственном Реестре программ для ЭВМ (Приложение 4).

В данном случае считаем, что физико-механические свойства материала заготовки (предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_s$ , модуль упругости  $E$ ), силы резания ( $P_z$ ,  $P_y$ ), выходные параметры (погрешность

диаметрального размера  $\omega$  и параметр шероховатости  $Ra$ ) не изменяются с увеличением времени работы РИ.

Для обработки большей партии заготовок, когда имеет место значительный износ РИ, необходимо учитывать факт изменения параметров процесса резания с увеличением времени наработки инструмента.

#### **4.1.2. Разработка программного обеспечения для коррекции режима течения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса резания с течением времени**

Алгоритм коррекции режима резания, который учитывает изменение параметров процесса обработки с увеличением времени наработки инструмента, представлен на рис. 35.

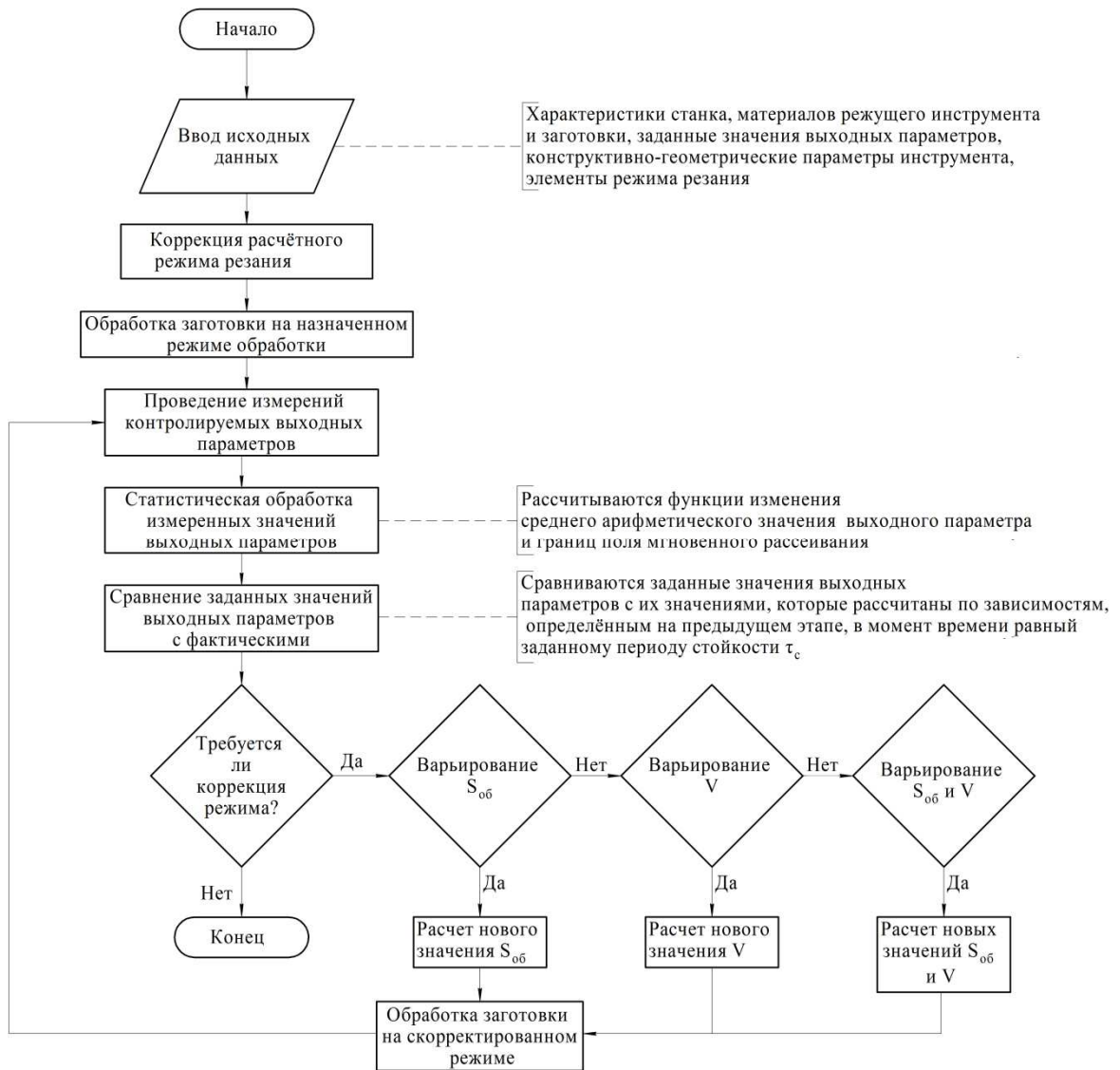


Рисунок 35 – Алгоритм коррекции режима резания, который учитывает изменение параметров процесса обработки с увеличением времени наработки инструмента

Предварительно необходимо рассчитать режим обработки, либо назначить его по каталогу режущего инструмента или нормативам. В программу вводятся исходные данные и рассчитываются интервалы варьирования управляемыми параметрами (скорость резания  $V$  и подача  $S_{об}$ ). В качестве исходных данных для расчёта используют те же исходные данные, что и программа «Коррекция режима точения». Также добавляется такой параметр как число расчётных точек  $n_{р.т.}$ . Значения мощности, КПД двигателя главного привода, жесткости станка определяются по паспорту станка или по справочным данным [89]. Физико-механические свойства

материалов заготовки и державки резца принимаются по справочникам [22, 51, 88].

При необходимости производится коррекция назначенного (расчётного) режима с целью обеспечения заданного качества обработанных деталей при максимальной производительности процесса обработки. Целью коррекции является обеспечение в заданный момент времени (заданный период стойкости инструмента  $\tau_c$ ) расчётного резерва, как минимум одного из выходных параметров, равного нулю при положительном расчётном резерве второго выходного параметра. Для этого определяются расчётные функции изменения выходных параметров во времени. Это возможно путем применения методики определения взаимосвязанных выходных и текущих параметров процесса обработки, приведенной в п.2.1.

Расчёты выходных и текущих параметров процесса выполняются для моментов времени  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{max}$ . При расчёте контактной температуры и температуры заготовки в момент времени  $\tau_0 = 0$  предполагается, что износ инструмента по задней поверхности в этот момент времени  $h_{и0} = 0$ . Эта температура используется для определения физико-механических свойств материала заготовки, таких как предел прочности  $\sigma_{b0}$ , предел текучести  $\sigma_{s0}$ , модуль упругости  $E_0$ , а также для определения составляющих силы резания и выходных параметров на отрезке времени  $\tau_0 \dots \tau_1$ . Затем рассчитывают износ инструмента  $h_{и1}$  в момент времени  $\tau_1$ . Износ резца определяется по зависимостям (170) – (174).

Контактная температура  $T_1$  в момент времени  $\tau_1$  рассчитывается, ориентируясь на износ инструмента, равный  $h_{и1}$ . Эта температура используется для определения физико-механических свойств материала заготовки (предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_s$ , модуль упругости  $E$ ) на отрезке времени  $\tau_1 \dots \tau_2$ :

$$\sigma_{b1} = \sigma_{b0} + K_{\sigma_b} \cdot (T_{g1} - 20^\circ\text{C}); \quad (235)$$



$$\sigma_{s1} = \sigma_{s0} + K_{\sigma_s} \cdot (T_{g1} - 20^\circ\text{C}); \quad (236)$$

$$E_1 = E_0 + K_E \cdot (T_{2-1} - 20^\circ\text{C}), \quad (237)$$

где  $\sigma_{b1}$ ,  $\sigma_{s1}$ ,  $E_1$  – значения предела прочности  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_s$  и модуля упругости  $E$  материала заготовки в момент времени  $\tau_1$ , МПа;  $\sigma_{b0}$ ,  $\sigma_{s0}$ ,  $E_0$  – значения предела прочности  $\sigma_b$  материала заготовки, предела текучести  $\sigma_s$  материала заготовки, модуля упругости  $E$  материала заготовки при температуре  $20^\circ\text{C}$ , МПа (определяется по справочным данным);  $K_{\sigma_b}$  – коэффициент изменения предела прочности  $\sigma_b$  материала заготовки, МПа/ $^\circ\text{C}$ ;  $K_{\sigma_s}$  – коэффициент изменения предела текучести  $\sigma_s$  материала заготовки, МПа/ $^\circ\text{C}$ ;  $K_E$  – коэффициент изменения модуля упругости  $E$  материала заготовки, МПа/ $^\circ\text{C}$ ;  $T_{g1}$  – температура в зоне пластической деформации в момент времени  $\tau_1$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{2-1}$  – температура на задней поверхности резца в момент времени  $\tau_1$ ,  $^\circ\text{C}$ . Значения температур  $T_{g1}$  и  $T_{2-1}$  рассчитываются по зависимостям, приведённым в табл.6, в зависимости от материала заготовки и инструментального материала).

Используя значения  $\sigma_{b1}$ ,  $\sigma_{s1}$ ,  $E_1$  рассчитываются значения выходных (среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$  и погрешность диаметрального размера  $\omega$ ) и текущих параметров процесса обработки (составляющие силы резания -  $P_y$ ,  $P_z$ ) в момент времени  $\tau_1$ . Среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$  рассчитывается по зависимости (157), погрешность диаметрального размера  $\omega$  по зависимости (21), составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_z$  по зависимостям (127) и (30) соответственно.

Далее аналогично рассчитывается износ инструмента в момент времени  $\tau_2$  и т.д.

Сравниваются расчетные значения выходных параметров в момент времени, равный периоду стойкости инструмента, с заданными (регламентированными) значениями соответствующих параметров.

Ниже приведен пример применения методики коррекции режима резания при изменении одного управляемого параметра (скорости резания  $V$ ) и измерении двух выходных параметров ( $Ra$  и  $\omega$ ). Предварительно рассчитывается режим резания или назначается по каталогу режущего инструмента. Далее следует этап коррекции, чтобы в момент времени, равный заданному периоду стойкости инструмента  $\tau_c$ , расчётный резерв одного из выходных параметров был равен нулю, при положительных расчётном резерве второго параметра.

Если при назначенном режиме в момент времени  $\tau_c$  ( $\tau_c$  – период стойкости режущего инструмента) значение одного из выходных параметров превышает заданное значение этого параметра, то необходимо корректировать режим. Как показано на рис. 36, возможны две ситуации: когда выходной параметр  $Ra$  имеет отрицательный резерв (рис. 36, а) и когда этот резерв является положительным (рис. 36, б). Для второго выходного параметра ( $\omega$ ) графики выглядят аналогично.

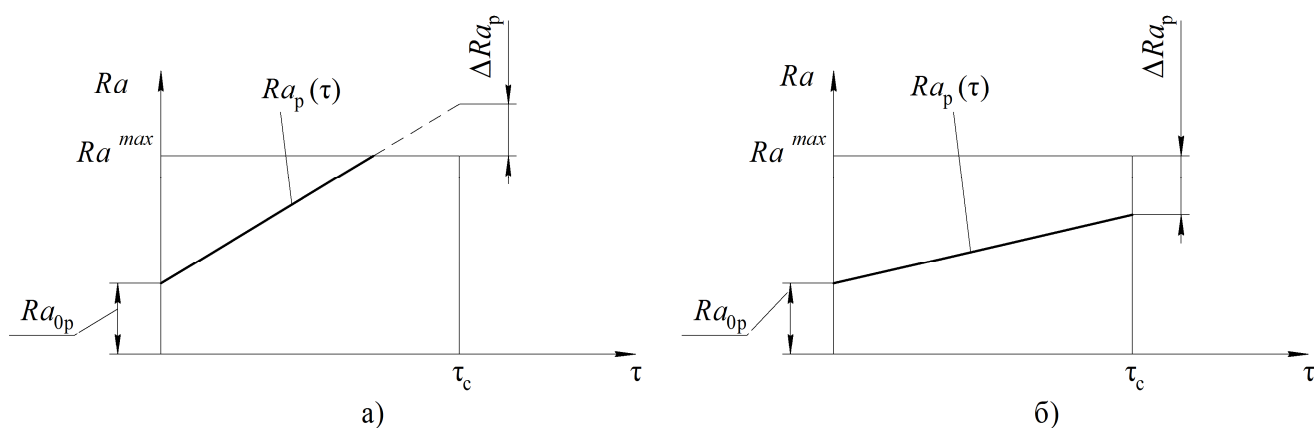


Рис. 36. График зависимости расчётного значения параметра шероховатости  $Ra$  от времени  $\tau$ : а) расчётное значение параметра шероховатости  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$  превышает заданное; б) расчётное значение параметра шероховатости  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$  не превышает заданное

Интервал варьирования управляемым параметром (в данном случае скоростью резания  $V$ ) должен обеспечить изменение расчётных значений выходных параметров ( $Ra$ ,  $\omega$ ) в момент времени  $\tau_c$  на величину  $\Delta Ra_p$  (см. рис. 36):

$$\Delta Ra_p = Ra_p^{\tau_c} - Ra^{max} \text{ (см. рис. 38, а);} \quad (238)$$

Или

$$\Delta Ra_p = Ra^{max} - Ra_p^{\tau_c} \text{ (см. рис. 38, б),} \quad (239)$$

где  $Ra_p^{\tau_c}$  – расчётное значение выходного параметра  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$ .

Для второго выходного параметра ( $\omega$ ) зависимости (238), (239) выглядят аналогично.

Затем определим приоритетный выходной параметр. Выбор приоритетного параметра подробно описан в п.2.2.

Предположим, что оба выходных параметра ( $Ra$  и  $\omega$ ) имеют положительный расчётный резерв и режим можно интенсифицировать. Если меньший относительный положительный резерв имеет параметр  $Ra$ , то интервал варьирования управляемым параметром:

$$\Delta V = \frac{\Delta Ra_p}{k' \cdot \frac{dRa}{dV}(p) \cdot k_3}, \quad (240)$$

где  $\Delta Ra_p$  – величина, на которую следует изменить значение выходного параметра  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$ .

Производные  $\frac{dRa}{dV}(p)$  рассчитывают, дифференцируя математические зависимости для расчёта выходных параметров в момент времени  $\tau_0$ .

Далее рассчитывается интервал изменения второго параметра  $\omega$  и оценивается его резерв:

$$\Delta \omega = \frac{d\omega}{dV}(p) \cdot \Delta V, \quad (241)$$

При положительном резерве параметр  $V^{0p}$  изменяют на величину  $\Delta V$  и получают новое значение скорости резания  $V^{1p}$ , при котором моделируют процесс обработки:

$$V^{1p} = V^{0p} + \Delta V, \quad (242)$$

где  $V^{0p}$  – начальное значение скорости резания  $V$ , полученное после расчёта или назначения режима обработки, м/мин.

Если при значении управляемого параметра  $V^{1p}$  расчётные значения выходных параметров  $Ra_{p\tau_c}$  и  $\omega_{p\tau_c}$  в момент времени  $\tau_c$  значительно отличаются от заданных  $Ra^{max}$  и  $\omega^{max}$ , то следует повторить процедуру коррекции режима резания.

Далее производится обработка партии заготовок на скорректированном расчётном режиме обработки. Измеряются фактические значения выходных параметров (шероховатость  $Ra$  и диаметр обработанной поверхности  $d$ ).

Ситуацию, когда выходной параметр  $Ra$  имеет положительный фактический резерв, иллюстрирует рис. 37.

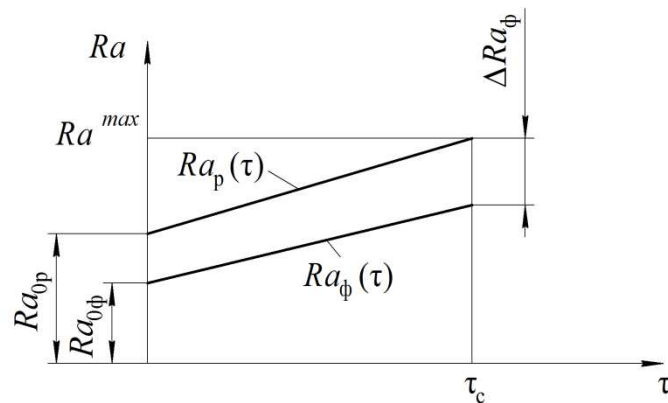


Рис. 37. График зависимости фактического значения выходного параметра  $Ra_{\phi}$  от времени  $\tau$

Зависимость фактических значений выходных параметров от времени можно выразить в виде полиномов типа:

$$Ra_{\phi}(\tau) = Ra_{0\phi} + Ra_{1\phi} \cdot \tau; \omega_{\phi}(\tau) = \omega_{0\phi} + \omega_{1\phi} \cdot \tau, \quad (243)$$

где  $Ra_{0\phi}, \omega_{0\phi}, Ra_{1\phi}, \omega_{1\phi}$  — коэффициенты;  $\tau$  — время обработки.

Коэффициенты  $Ra_{0\phi}$  и  $\omega_{0\phi}$  соответствует фактическим значениям выходных параметров  $Ra$  и  $\omega$  в начальный момент времени  $\tau_0$ ; коэффициенты  $Ra_{1\phi}$  и  $\omega_{1\phi}$  характеризуют интенсивности изменения фактических значений этих параметров во времени.

Предположим, что выходным параметром, имеющим минимальный фактический резерв, является параметр шероховатости  $Ra$ . Интенсивность изменения этого параметра:

$$Ra_{1\phi} = \frac{Ra_{\phi}^{\tau_c} - Ra_{0\phi}}{\tau_c}, \quad (244)$$

где  $Ra_{\phi}^{\tau_c}$  – фактическое значение параметра  $Ra$  в момент  $\tau_c$ .

В момент времени  $\tau_0$  параметр  $Ra$  (коэффициент  $Ra_{0\phi}^1$ ) должен иметь значение (рис. 38):

$$Ra_{0\phi}^1 = Ra^{max} - Ra_{1\phi} \cdot \tau_c. \quad (245)$$

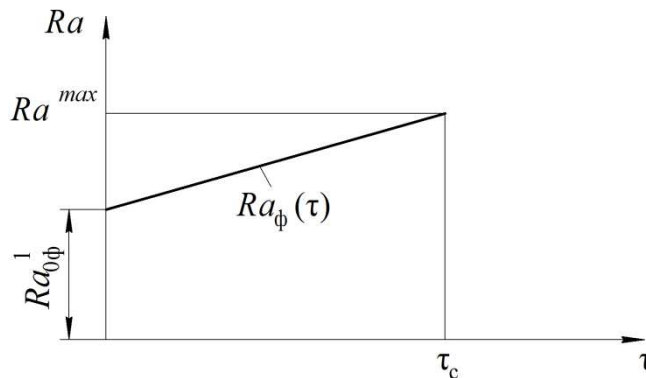


Рис. 38. График зависимости фактического значения выходного параметра  $Ra_{\phi}$  от времени при коррекции режима в начальный момент времени  $\tau$

Интервал варьирования управляемым параметром  $V$ , который позволит в начальный момент времени  $\tau_0$  обеспечить значение  $i$ -го выходного параметра равным  $Ra_{0\phi i}^1$ :

$$\Delta V = \frac{Ra_{0\phi}^1 - Ra_{0\phi}}{k' \cdot \frac{dRa_p}{dV} \cdot k_3}, \quad (246)$$

где  $k'$  – коэффициент, равный количеству управляемых параметров;  $\frac{dRa_{\phi}}{dV}$  – частная производная, полученная на основе скорректированной зависимости параметра  $Ra$  от входных параметров в момент времени  $\tau_0$ ;  $k_3$  – коэффициент запаса ( $k_3 = 1,1 \dots 2,0$ ).

Затем по формуле, аналогичной (242), рассчитается изменение параметра  $\omega$  и оценивается резерв данного параметра. При положительном резерве рассчитывается скорректированное значение скорости резания  $V$ :

$$V^1 = V + \Delta V. \quad (247)$$

Вследствие возможной некорректности математических моделей, используемых для расчёта производных, необходимый результат может быть не достигнут. Поэтому при необходимости реализуются следующий этап (этапы) коррекции режима резания, при этом для расчёта производных используются фактические (измеренные) значения выходных параметров (66). В частном случае зависимость (66) принимает вид (229) - (232).

В некоторых случаях целесообразно выполнить процедуру коррекции после наработки инструмента в течение времени, меньшего его периода стойкости, а затем экстраполировать кривые, характеризующих изменение за это время фактических значений выходных параметров, на время, равное периоду стойкости. Более подробно методика коррекции режима, которая учитывает вариабельность параметров процесса резания, рассмотрена в п. 2.3.

Для коррекции режима точения в условиях существенного изменения параметров процесса с течением времени обработки разработана программа «Коррекция режима точения в условиях неопределённости технологической информации» [84]. Включаем вкладку "Стат. анализ" в той же программе, чтобы осуществить статистическую обработку результатов эксперимента (рис. 39).

Программа разработана на языке программирования Delphi. В качестве исходных данных для расчёта определены те же параметры, что и для программы «Коррекция режима точения» (см. п. 4.1.1). Кроме того, используется такой параметр, как количество расчетных точек  $n_{p.t.}$ , что позволяет рассчитать значения выходных и текущих параметров процесса точения в любой момент времени обработки заготовки.

Рис. 39. Интерфейс программы «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации»

Рис. 39 – Интерфейс программы «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации»

В коде программы прописан ряд технических ограничений (35) – (41), (233), (234). Аналогично программе «Коррекция режима точения» (п. 4.1.1) присутствуют вкладки «Помощь» и «Классификатор ошибок», предназначенные для удобства работы.

Программа «Коррекция режима точения в условиях неопределённости технологической информации» зарегистрирована в государственном Реестре программ для ЭВМ (Приложение 5).

Программа может рассчитать выходные параметры в зависимости от времени наработки инструмента: производственную погрешность диаметральных размеров деталей и параметр шероховатости  $Ra$  их поверхностей. Следовательно, позволяет оценить изменение параметров с течением времени, оценить период стойкости инструмента. Было проведено численное моделирование для определения выходных и текущих параметров процесса точения при различных значениях входных данных ( $V$ ,  $S_{об}$ ,  $t_r$ ) (см. Приложение 2).

## **4. 2. Методика экспериментальных исследований**

### **4.2.1. Показатели эффективности процесса точения**

Качество обработанных поверхностей детали определяется совокупностью показателей: физико-механическим состоянием поверхностного слоя, микроструктурой металла, шероховатостью и точностью обработки.

Разработанные методики коррекции режима резания позволяют учесть множество выходных параметров, однако для апробации методики разработаны программа, учитывающие лишь два параметра.

В качестве показателей эффективности процесса точения выбраны следующие параметры.

В большинстве случаев конструктор указывает на чертеже требования к шероховатости поверхности, используя среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$ . Поэтому для оценки шероховатости обработанной поверхности будем использовать показатель  $Ra$ , мкм.



Одним из значимых показателей качества деталей является точность, поэтому в качестве показателя эффективности используем погрешность диаметрального размера  $\sigma$ , мм.

#### 4.2.2. Средства технологического оснащения

Исследования эффективности функционирования разработанной методики назначения режима точения проведены на токарном станке с ЧПУ СТХ310 Ecoline(фирма DMG).

#### 4.2.3. Методы и средства измерения контролируемых параметров

Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  измеряли с помощью профилометра модели 130.

Для измерения диаметральных размеров образцов следует выбрать такой мерительный инструмент или прибор, погрешность измерения которого не превышает допустимую для данного диаметра и допуска погрешность  $\delta$ . При этом диапазон измерения прибора должен позволить выполнить измерения заданного диаметра, а диапазон показаний – отсчитать любое отклонение размера в пределах его допуска [58].

Выбранные средства измерения приведены в табл. 9, а их метрологические характеристики – в табл.10.

Таблица 9 – Характеристика контролируемых размеров

Номинальный размер и условное обозначение поля допуска размера	Допуск размера Td, мкм.	Предельная допустимая погрешность измерения по ГОСТ 8.051-81 $\delta$ , мкм.	Средство измерения
Ø34h8	39	10	Микрометр гладкий МК 25-1 ГОСТ 6507-90
Ø48h10	100	20	Микрометр гладкий МК 50-1 ГОСТ 6507-90
Ø78h8	46	12	Микрометр гладкий МК 100-1 ГОСТ 6507-90
Ø78h10	120	30	

Таблица 10 – Метрологическая характеристика средств измерения

Наименование	Диапазон измерений, мм	Диапазон показаний, мм	Цена деления, мм	Предельная погрешность измерения, мм
МК 25-1	0-25	0,5	0,01	$\pm 0,0025$
МК 50-1	25-50	0,5	0,01	$\pm 0,0025$
МК 100-1	75-100	0,5	0,01	$\pm 0,0025$

Выбранные средства измерения по своим метрологическим характеристикам отвечают требованиям, необходимым для измерения размеров валов.

#### 4.2.4. Условия и порядок проведения экспериментов

1. Станок токарный с ЧПУ СТХ310 Ecoline.
2. Режущий инструмент – резец DDJNL 2020, режущая пластина (СМП) – 110408-MPNC3225 (Korloy); резец MSDNN 2020K12 с СМП 120408 T15K6; резец MSDNN 2020K12 с СМП 120404 IS7015 (InTool).
3. В качестве материалов образцов были выбраны конструкционная углеродистая сталь марки Сталь 45 и легированная коррозионно-стойкая сталь марки 12X18Н10Т, относящиеся к различным группам обрабатываемости. Химический состав и физико-механические свойства выбранных материалов приведены в табл. 11, 12.

Таблица 11 – Химический состав материала заготовки (ГОСТ 5632-72), % (масс.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	0,42...0,50	0,17 ... 0,37	0,50 ... 0,80	Не более 0,25	-
12X18Н10Т (ГОСТ 5632-72)	Не более 0,12	Не более 0,8	Не более 2,9	17 ... 19	9...11

Таблица 12 – Физико-механические свойства материала заготовки [17,25]

Марка стали	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_s$ , МПа	Модуль упругости $E$ , МПа
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	600	355	210000
12X18Н10Т (ГОСТ 5632-72)	510	196	205000

Эскиз заготовок для экспериментального исследования представлен на рис. 40. Размеры образцов приведены в табл. 13.

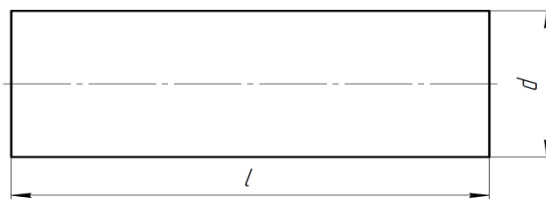


Рисунок 40 – Эскиз заготовки

Таблица 13 – Размеры образцов

Материал образца	Диаметр $d$ , мм	Длина $l_{\text{заг}}$ , мм	Отношение $l_{\text{заг}}/d$
Сталь 45(ГОСТ 1050-88)	80	200	2,5
12X18H10T(ГОСТ 5632-72)	50	120	2,4
12X18H10T(ГОСТ 5632-72)	35	120	3,4

4. Режим резания и требуемое значение выходных параметров приведены в табл. 14. Подробнее расчет и выбор значений выходных параметров представлены в п. 4.3.

Таблица 14 – Условия проведения экспериментальных исследований

Марка стали	Марка инструментального материала	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача на оборот, мм/об	Глубина резания, мм	Предельное значение параметра $Ra$ , мкм	Квалитет обработки	Предельное значение погрешности диаметрального размера $\omega$ , мм
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	IS7015 (ф. InTool, КНР)	250	0,086	0,5	1,6	8	0,039
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	NC3225 (ф. Korloy, Республика Корея)	200	0,1	1	1,6	8	0,046
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	T15K6 (ГОСТ 3882-74)	121	0,080	1	3,2	10	0,120
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	T15K6 (ГОСТ 3882-74)	142	0,11	1	3,2	10	0,10

Условия и порядок проведения экспериментальных исследований изложены также в п. 4.3.

#### 4.2.5. Метрологическая оценка средства измерения шероховатости обработанной поверхности

Проведена метрологическая оценка средства измерения среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$ , мкм (используется профилометр мод. 130). Результаты измерений, полученные при проведении предварительных экспериментов, приведены в табл. 15.

Таблица 15 – Исходные данные для расчёта

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$Ra$ , мкм	1,35	1,47	1,70	1,90	1,99	1,92	1,73	1,79

Условия проведения экспериментальных исследований приведены в п. 4.1.4. Метрологическая оценка средства измерения проведена на основе методики, изложенной в источнике [45].

Абсолютная погрешность результатов прямого измерения параметра  $Ra$ , мкм:

$$\Delta Ra = \pm \sqrt{t_\gamma^2 \cdot \sigma_{\overline{Ra}}^2 + \Delta Ra_c^2}, \quad (248)$$

где  $t_\gamma$  – корень уравнения нормированной функции Лапласа  $\Phi_0(t)$  ( $t_\gamma = 1,96$  при доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$ );  $\sigma_{\overline{Ra}}$  – средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического;  $\Delta Ra_c$  – систематическая погрешность измерения, мкм.

Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического:

$$\sigma_{\overline{Ra}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ra_i - \overline{Ra})^2}{N \cdot (N - 1)}}, \quad (249)$$

где  $Ra_i$  – результат  $i$ -го единичного измерения, мкм;  $\overline{Ra}$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины  $Ra$ , мкм;  $N$  – количество опытов.

Систематическая погрешность измерения  $\Delta Ra_c$  равна предельно допустимой погрешности прибора  $\Delta Ra_{lim}$ :

$$\Delta Ra_c = \Delta Ra_{lim}. \quad (250)$$

Относительная погрешность измерения:

$$\delta_{Ra} = \pm \frac{\Delta Ra}{\overline{Ra}} \cdot 100. \quad (251)$$

Результаты расчёта сведены в табл.16.

Таблица 16 – Результаты расчёта метрологической оценки измерения параметра  $Ra$  на профилометре мод.130

Параметр	Значение
Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического $\sigma_{\overline{Ra}}$ , мкм	0,079
Систематическая погрешность измерения $\Delta Ra_c$ , мкм	0,050
Абсолютная погрешность результатов прямого измерения параметра $\Delta Ra$ , мкм	$\pm 0,163$
Относительная погрешность результатов прямого измерения параметра $\delta_{Ra}$ , %	$\pm 9,420$

Относительная погрешность  $\delta_{Ra}$  не выходит за границы максимально допустимой погрешности прибора  $\delta_{Ra}^{max} = \pm 30\%$ , следовательно, профилометр мод. 130 можно использовать для измерения параметра  $Ra$  с получением достоверного результата измерений.

#### 4.2.6. Определение числа параллельных опытов

Условия проведения эксперимента описаны в п. 4.2.3.

Расчёт проводится на основе методики, изложенной в источнике [45], ориентируясь на параметр шероховатости  $Ra$ . Это обусловлено тем, что разброс значений параметра  $Ra$  значительно превышает разброс параметра  $\omega$ .

Результаты измерений, полученные с помощью профилометра мод. 130, сведены в табл. 15.

Среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\overline{Ra} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Ra_i. \quad (252)$$

где  $N$  – число опытов ( $N = 8$ ).

Величина дисперсии:

$$D = \frac{1}{(N - 1)} \cdot \sum_{i=1}^N (Ra_i - \overline{Ra})^2. \quad (253)$$

Точность математического ожидания:

$$\delta_3 = (t_{\alpha}, f_C) \cdot \sqrt{\frac{D}{N}}, \quad (254)$$

где  $(t_{\alpha}, f_C)$  – квантиль распределения Стьюдента.

Необходимое число параллельных опытов определим по следующей зависимости:

$$N_0 = t_{\gamma} \cdot \frac{D}{\delta_3^2}. \quad (255)$$

Результаты расчёта сведены в табл.17.

Таблица 17 – Результаты расчёта числа параллельных опытов

Параметр	Значение
Среднее арифметическое значение измеряемой величины $\overline{Ra}$ , мкм	1,73
Дисперсия $D$ , мкм	0,050
Точность математического ожидания $\delta_3$ , мкм	0,591
Расчетное число параллельных опытов, $N_0$	2,81

Следовательно, принимаем число параллельных опытов  $N_0 = 3$ .

#### 4.2.7. Состав опытов

Состав опытов вытекает из задач, поставленных в главе 1, и представлен в параграфе 4.3.

### 4.3. Исследование эффективности функционирования разработанной методики и программного обеспечения при коррекции режима точения

#### 4.3.1. Исследование эффективности методики коррекции режима точения при малой наработке инструмента

В данном пункте приведены результаты исследований при проверке работоспособности коррекции режима точения, назначенного в условиях неопределенности технологической информации, при малой наработке инструмента, когда влиянием износа на параметры процесса можно пренебречь.

Материал образцов – Сталь 45, ГОСТ 1050-88. Режущий инструмент – резец DDJNL 2020, режущая пластина (СМП) – DNMG110408-MPNC3225 (Korloy) с износостойким покрытием: главный угол в плане  $\varphi = 93^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 32^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; передний угол  $\gamma = -6^\circ$ . Требуемое значение шероховатости  $Ra = 1,6$  мкм; точность диаметрального размера по 8 качеству –  $\varnothing 78h8 (-0,046)$  мм. Назначаем режим по каталогу режущего инструмента «Korloy» [40]. Так как в каталогах режущего инструмента не упоминается точность и шероховатость обработанной поверхности, а значения элементов режима резания заданы диапазоном значений, то принимаем из диапазона значений скорость, близкую к максимально допустимой  $V = 200$  м/мин и минимально допустимую подачу  $S_{об} = 0,10$  мм/об, глубину резания принимаем  $t_r = 1$  мм. Производим обработку на назначенном режиме. Результаты измерений выходных параметров приведены в табл.18.

Таблица 18 – Результаты эксперимента при режиме, назначенном по каталогу

№ заготовки	Фактическое значение диаметра вала $d_{\phi}$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_{\phi}^0$ , мкм
1	77,97	1,08
2	77,98	0,956
3	77,97	1,01
4	77,99	0,905

Как видно из табл. 18, получены положительные резервы (запасы) по обоим выходным параметрам ( $Ra$  и  $\omega$ ). Принимаем решение варьировать скоростью резания  $V$  и подачей  $S_{об}$ . Скорректированные значения скорости резания  $V$  и подачи  $S_{об}$  определяем по программе «Коррекция режима точения». Программа выдает скорректированные значения скорости резания  $V = 199$  м/мин и подачи  $S_{об} = 0,159$  мм/об. Таким образом, получен скорректированный режим:  $V = 199$  м/мин;  $S_{об} = 0,159$  мм/об. На данном режиме провели обработку заготовок. Результаты приведены в табл. 19.

Таблица 19 – Результаты эксперимента (при скорректированном режиме)

№ заготовки	Фактическое значение диаметра вала $d_{\phi}$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_{\phi}^1$ , мкм
1	77,96	1,18
2	77,99	1,35
3	77,97	1,27
4	77,98	1,43

Разница между заданным (регламентированным) значением шероховатости  $Ra^{max}$  и фактическим значением  $Ra^{\phi}$  составляет 10...26%. Получен положительный запас и по параметру  $\omega$ . Однако, в силу относительного малого резерва по параметру шероховатости  $Ra$  принимаем решения дальнейшую коррекцию не проводить, в целях предотвращения появления бракованных деталей.



Скорректированный режим ( $V = 199$  м/мин;  $S_{об} = 0,159$  мм/об) значительно ближе к оптимальному уровню. По сравнению с режимом, назначенным по каталогу режущего инструмента, подача увеличилась на 59%, скорость резания незначительно снизилась (на 0,5%). Это ведет к увеличению производительности обработки в 1,58 раза по сравнению с обработкой на режиме, назначенном по каталогу режущего инструмента, с сохранением заданного (требуемого) качества обработки.

Проведем эксперимент с целью коррекции режима, назначенного на основе расчёта по формулам теории резания.

Материал образцов – Сталь 45, ГОСТ 1050-88. Режущий инструмент – резец MSDNN 2020K12, режущая пластина (СМП) – SNMG120408 T15K6: главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 45^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; передний угол  $\gamma = -6^\circ$ . Требуемое значение шероховатости  $Ra = 3,2$  мкм; точность размера по 10 качеству –  $\varnothing 78h10 (-0,120)$  мм.

В результате расчёта [89] получены значения элементов режима:  $V = 121$  м/мин;  $S_{об} = 0,08$  мм/об;  $t_r = 1$  мм. Обработав партию заготовок, получили следующие результаты (табл. 20).

Таблица 20–Результаты эксперимента при режиме, рассчитанном по справочнику

№ заготовки	Размер обработанных деталей $d_\varphi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\varphi^0$ , мкм
1	77,95	1,40
2	77,96	1,33
3	77,98	1,31
4	77,96	1,64

Как видно из табл. 20, получены положительные резервы (запасы) по обоим выходным параметрам. Принимаем решение варьировать подачей  $S_{об}$ . В результате работы программы «Коррекция режима точения» получен скорректированный режим:  $V = 121$  м/мин;  $S_{об} = 0,264$  мм/об. Результаты,

полученные при обработке заготовок с использованием скорректированного режима, приведены в табл.21.

Таблица 21 – Результаты эксперимента на скорректированном режиме  
(1-я итерация)

№ заготовки	Размер обработанных деталей $d_{\phi}$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_{\phi}^0$ , мкм
1	77,96	3,81
2	77,97	3,31
3	77,93	3,73
4	77,96	3,92

В результате получен отрицательный резерв (запас) по параметру шероховатости  $Ra$  и положительный резерв по погрешности диаметрального размера  $\omega$ . Следовательно, необходимо выполнить повторную коррекцию режима обработки. Принимаем решение варьировать одним управляемым параметром – подачей на оборот  $S_{об}$ . По итогам расчёта по программе получили скорректированный режим:  $V = 121$  м/мин;  $S_{об} = 0,234$  мм/об. Результаты, полученные при обработке заготовок с использованием рассчитанного режима, приведены в табл. 22.

Таблица 22 – Результаты эксперимента на при скорректированном режиме  
(2-я итерация)

№ заготовки	Размер обработанных деталей $d_{\phi}$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_{\phi}^1$ , мкм
1	77,97	3,04
2	77,98	2,87
3	77,95	3,05
4	77,97	3,13

Разница между предельным (заданным) значением шероховатости  $Ra^{max}$  и фактическим  $Ra^{\phi}$  составляет 2 ... 10 %; по параметру  $\omega$  зафиксирован

положительный запас. Принимаем решение дальнейшую коррекцию не проводить.

По сравнению с рассчитанным режимом обработки, подача увеличилась в 2,92 раза, что позволяет увеличить производительности обработки в 2,92 раз при обеспечении заданного (требуемого) качества обработанных деталей.

#### **4.3.2. Исследование эффективности методики коррекции режима точения, учитывающей зависимость параметров обработки от времени**

Исследование эффективности функционирования разработанной методики проводится в следующей последовательности:

##### *1-й этап (расчетный).*

При окончательном (чистовом) точении может быть обеспечен 7 ... 11 квалитет диаметральных размеров и шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$  – 1,6 ... 6,3 мкм. Принимаем требуемое (предельное) значение шероховатости  $Ra = 3,2$  мкм; точность размера по 10 квалитету –  $\varnothing 48h10$  ( $_{-0,100}$ ) мм. Следовательно, допуск диаметрального размера – 0,1 мм. Период стойкости  $\tau_c$  резца при одноинструментной обработке составляет 30 ... 60 мин [89]. Принимаем значение периода стойкости  $\tau_c = 30$  мин.

Предварительно произвели расчет режима точения заготовки из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 по формулам теории резания [72]:  $t_r = 1$  мм;  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $V = 146$  м/мин. Режущий инструмент – резец MSDNN 2020 K12, режущая пластина (СМП) – 120408 T15K6: главный и вспомогательный углы в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; передний угол  $\gamma = -6^\circ$ .

Графики зависимости расчётных значений выходных параметров с увеличением времени наработки получены при помощи программы «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации» (рис. 42).

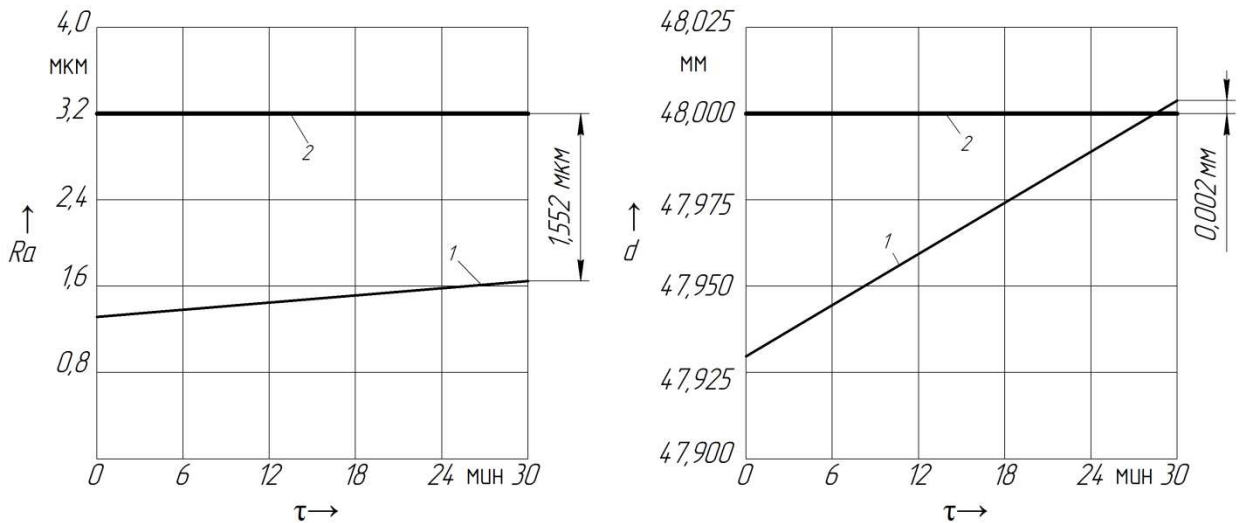


Рисунок 41 – Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$ :  $t_f=1$  мм;  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $V=146$  м/мин

Поскольку расчётное значение диаметра цилиндрической шейки в момент времени 30 мин превышает заданное значение, необходимо выполнить коррекцию режима. Расчёт параметров процесса обработки показал, что подача  $S_{об}$  оказывает незначительное влияние на величину погрешности диаметрального размера, поэтому принимаем решение варьировать скоростью резания  $V$ .

При расчёте интервалов варьирования элементами режима на данном этапе используются расчётные производные. Программа рекомендует использовать значение скорости резания  $V_1 = 143$  м/мин.

Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$  при скорректированном режиме представлены на рис. 42.

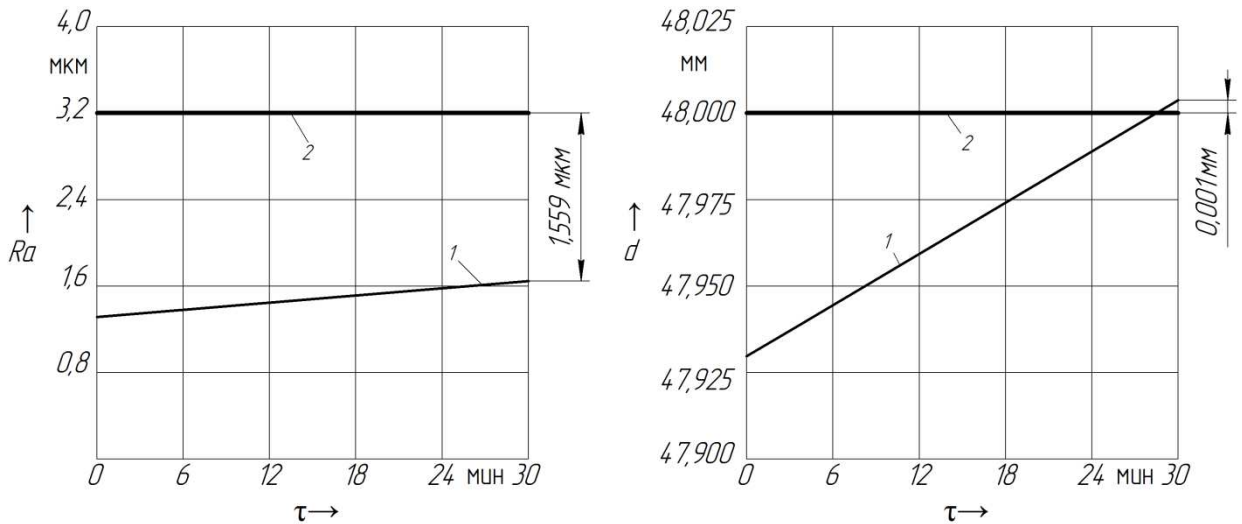


Рисунок 42 – Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$  при скорректированном режиме:  $S_{06} = 0,11$  мм/об;  $V=143$  м/мин

Поскольку математическое ожидание диаметрального размера в момент времени 30 мин несколько превышает заданное значение, то требуется повторная коррекция режима. При расчёте значений величин коррекции варьируем лишь скоростью резания  $V$ , которая, согласно расчёта, должна принять значение:  $V= 142$  м/мин.

Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$  при повторно скорректированном режиме представлены на рис.44.

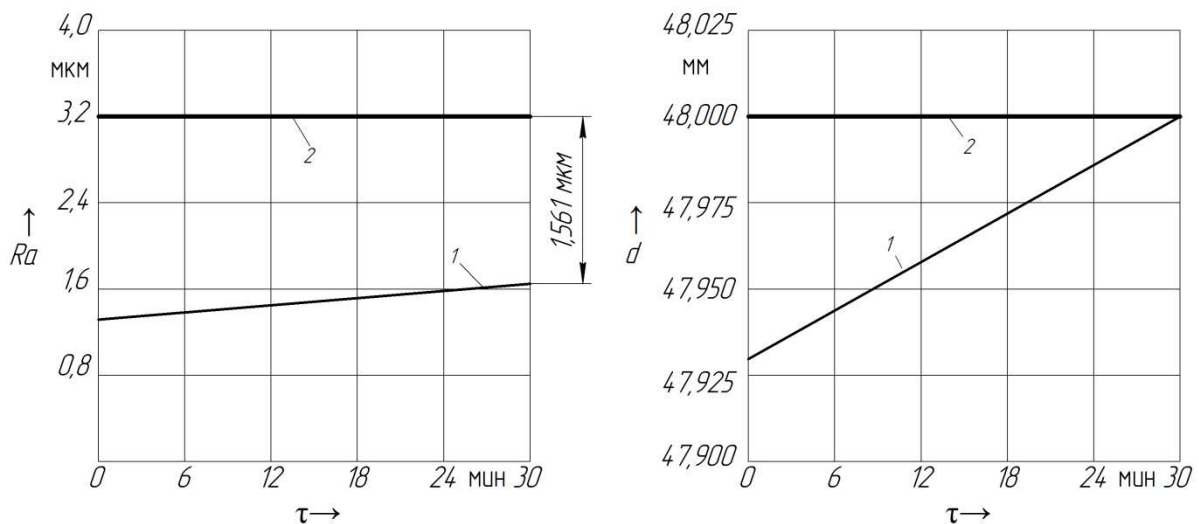


Рисунок 43 – Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$  при повторно скорректированном режиме:  $S_{06} = 0,11$  мм/об;  $V=142$  м/мин

Результат расчёта показывает, что при данном режиме и наработке инструмента в течение 30 мин максимальная величина диаметра детали не должна превышать  $\varnothing 48,000$  мм. На рассчитанном режиме обработали 3 партии образцов.

*2-й этап (экспериментальный)*

Результаты измерений выходных параметров заготовок на скорректированном режиме:  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $V = 142$  м/мин приведены в табл. 23 – 25.

Таблица 23 – Результаты измерений 1-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,11$  мм/об,  $V = 142$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	0,70	47,91	1,35
2	1,41	47,91	1,47
3	2,11	47,92	1,70
4	2,82	47,91	1,90
5	3,52	47,96	1,99
6	4,22	47,91	1,92
7	4,93	47,94	1,73
8	5,63	47,92	1,79

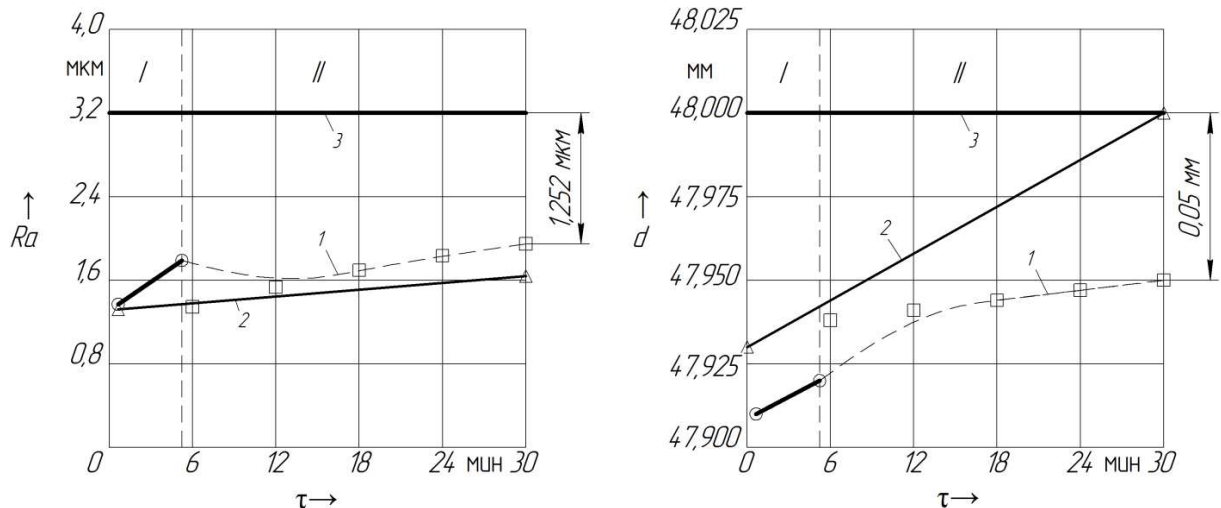
Таблица 24 – Результаты измерений 2-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,11$  мм/об,  $V = 142$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	0,70	47,90	1,37
2	1,41	47,91	1,42
3	2,11	47,91	1,36
4	2,82	47,92	1,52
5	3,52	47,92	1,43
6	4,22	47,91	1,62
7	4,93	47,92	1,72
8	5,63	47,93	1,84

Таблица 25 – Результаты измерений 3-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,11$  мм/об,  $V = 142$  м/мин

№ заготовк и	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	0,70	47,91	1,47
2	1,41	47,91	1,32
3	2,11	47,90	1,34
4	2,82	47,91	1,40
5	3,52	47,92	1,51
6	4,22	47,91	1,55
7	4,93	47,92	1,69
8	5,63	47,92	1,61

Измерения шероховатости и диаметра выходных параметров производились на ограниченном временном интервале, составляющем 0 ... 5,63 мин. (меньшим, чем период стойкости). Затем полученные кривые экстраполировались на время, равное периоду стойкости резца (см. рис. 44 а, б, в). Для построения кривых изменений фактических значений выходных параметров  $Ra_\phi(\tau)$  и  $d_\phi(\tau)$  использовалась методика обработки данных фактических измерений, описанная в пункте 3.4. Расчёт произведен в программе (вкладка «Стат. анализ» - см. рис. 39).



a)

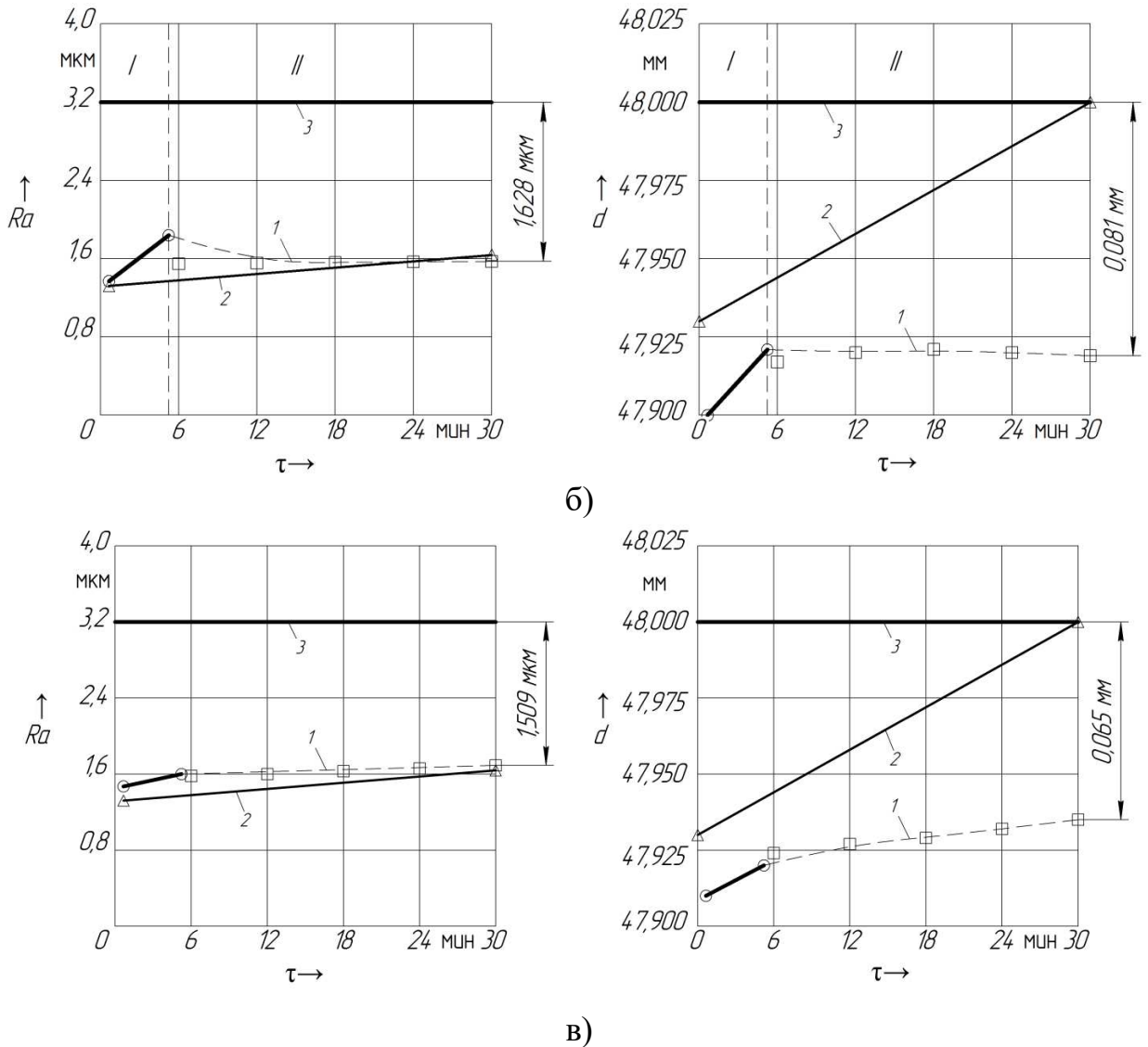


Рисунок 44 – Кривые изменений расчётных и фактических значений выходных параметров от времени  $\tau$  при режиме  $S_{0,6} = 0,11$  мм/об;  $V = 142$  м/мин: а, б, в – 1-я, 2-я и 3-я партии образцов; 1 – кривая изменений фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданные значения выходных параметров

Анализ результатов эксперимента показывает, что в момент времени  $\tau_c = 30$  мин. для всех партий могут быть получены положительные резервы (запасы) по обоим параметрам –  $Ra_\phi$  и  $\omega_\phi$ . Следовательно, необходимо скорректировать режим обработки.

Результаты экспериментов подвергли статистическому анализу. Статистический анализ выполнили по методике, изложенной в работе [43]. Результаты расчёта приведены в прил.6. Статистический анализ результатов



показал, что средние величины во всех трех партиях можно принять равными. Коррекцию режима рассчитаем по данным 1-й партии заготовок.

*3-й этап (экспериментальный – 1-я итерация).*

Расчёт новых значений управляемых параметров проводим по программе. Затем осуществляется обработка на скорректированном режиме:  $S_{об} = 0,168$  мм/об;  $V = 140$  м/мин. Результаты измерений выходных параметров приведены в табл. 26–28.

Таблица 26 – Результаты измерений 1-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,168$  мм/об,  $V = 140$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	8,92	47,92	2,11
2	12,22	47,93	2,37
3	15,52	47,93	2,33
4	18,81	47,94	2,55
5	22,11	47,92	2,46
6	25,41	47,94	2,61
7	28,70	47,93	2,69
8	32,00	47,94	2,84

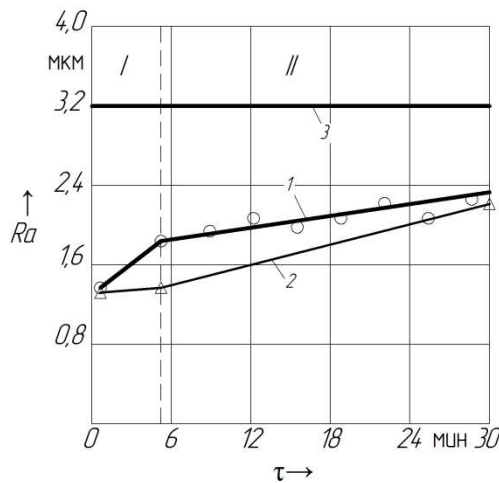
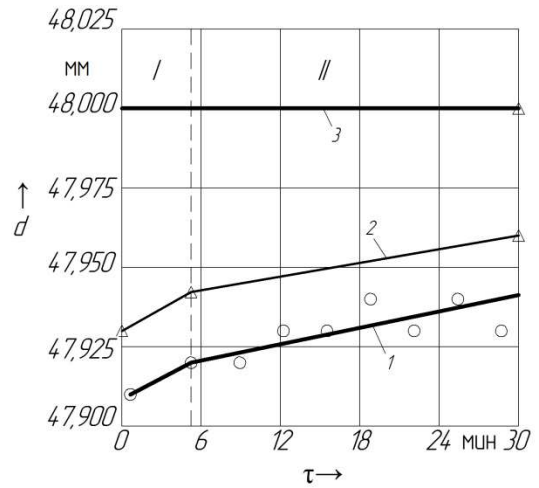
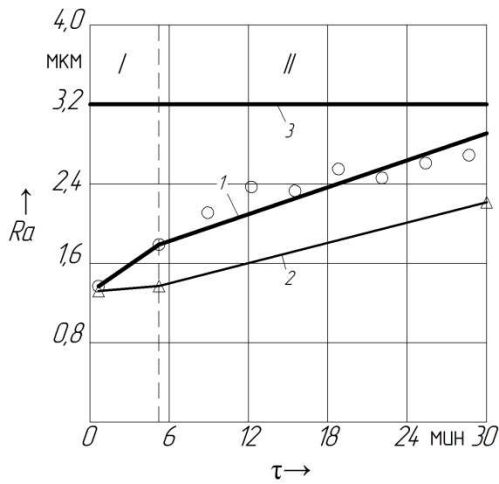
Таблица 27 – Результаты измерений 2-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,168$  мм/об,  $V = 140$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	8,92	47,92	1,94
2	12,22	47,93	2,07
3	15,52	47,95	1,98
4	18,81	47,94	2,22
5	22,11	47,94	2,07
6	25,41	47,93	2,26
7	28,70	47,94	2,59
8	32,00	47,95	2,65

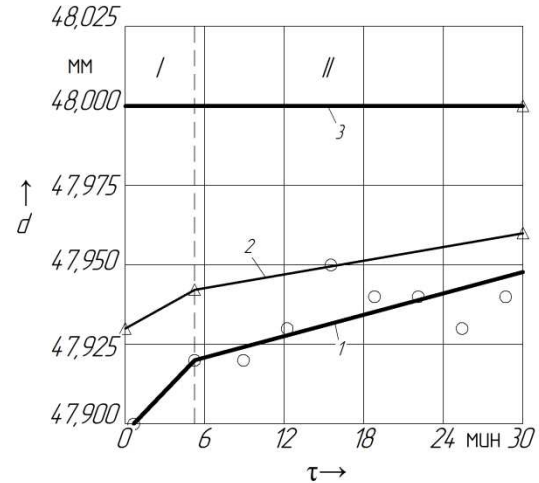
Таблица 28 – Результаты измерений 3-й партии: материал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, инструментальный материал – Т15К6,  $t_r = 1$  мм,  $S_{об} = 0,168$  мм/об,  $V = 140$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^0$ , мкм
1	8,92	47,92	2,17
2	12,22	47,93	2,32
3	15,52	47,94	2,36
4	18,81	47,93	2,58
5	22,11	47,94	2,74
6	25,41	47,96	2,69
7	28,70	47,94	2,88
8	32,00	47,95	3,04

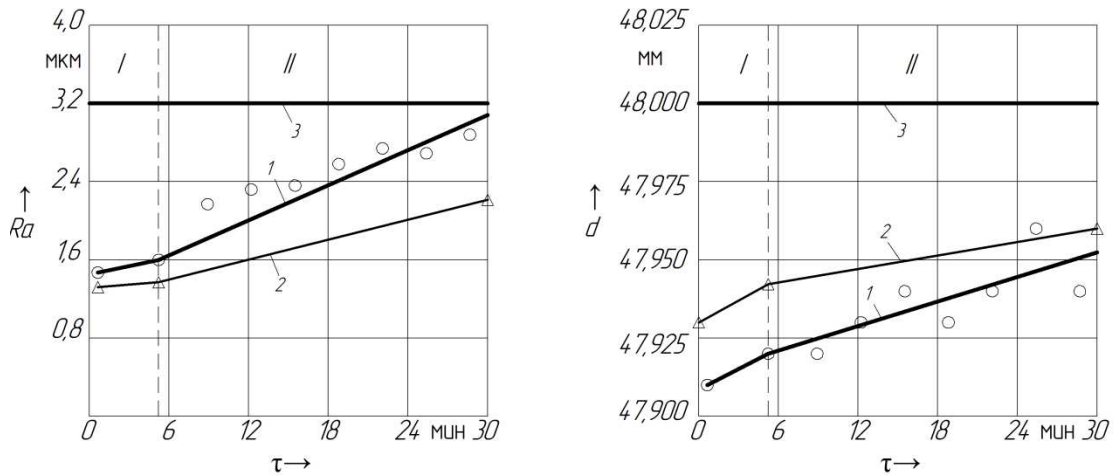
Выходные параметры (шероховатость  $Ra$  и диаметр  $d$ ) измерены на интервале времени, равном периоду стойкости резца (рис.45).



а)



б)



в)

Рисунок 45 – Кривые изменений расчётных и фактических значений выходных параметров от времени  $\tau$  при режиме  $S_{об} = 0,168$  мм/об;  $V = 140$  м/мин: а, б, в – 1-я, 2-я и 3-я партии образцов; 1 – кривая изменений фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданные значения выходных параметров

В сравнении с рассчитанным применение скорректированного режима позволяет увеличить производительность обработки на 34%. В течение заданного периода стойкости  $\tau_c = 30$  мин обеспечивается требуемое качество обработки (по параметру шероховатости  $Ra$  и точности диаметрального размера детали).

Аналогичное исследование было проведено при обработке образцов из 12X18H10T режущей пластиной с износостойким покрытием.

Материал образцов – 12X18H10T, ГОСТ 5632-72. Режущий инструмент – резец MSDNN 2020K12, режущая пластина (СМП) – SNMG 120404-SFIS7015 (InTool) с износостойким покрытием  $TiAlN$ : передний угол  $\gamma = -6^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; главный угол в плане  $\phi = 45^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 45^\circ$ . Требуемое значение шероховатости  $Ra = 1,6$  мкм; точность размера по 8 качеству –  $\varnothing 34h8 (-0,039)$  мм (допуск равен 0,039 мм).

Режим обработки определяем по каталогу режущего инструмента «InTool» [41]. В этом каталоге не упоминается точность и шероховатость обработанной поверхности, а значения элементов режима резания заданы диапазоном значений. Принимаем из диапазона значений максимально

допустимую скорость резания  $V = 250$  м/мин и минимально допустимую подачу  $S_{об} = 0,08$  мм/об, глубину резания принимаем  $t_r = 0,5$  мм.

Расчётные траектории выходных параметров получили при помощи программы (рис. 46).

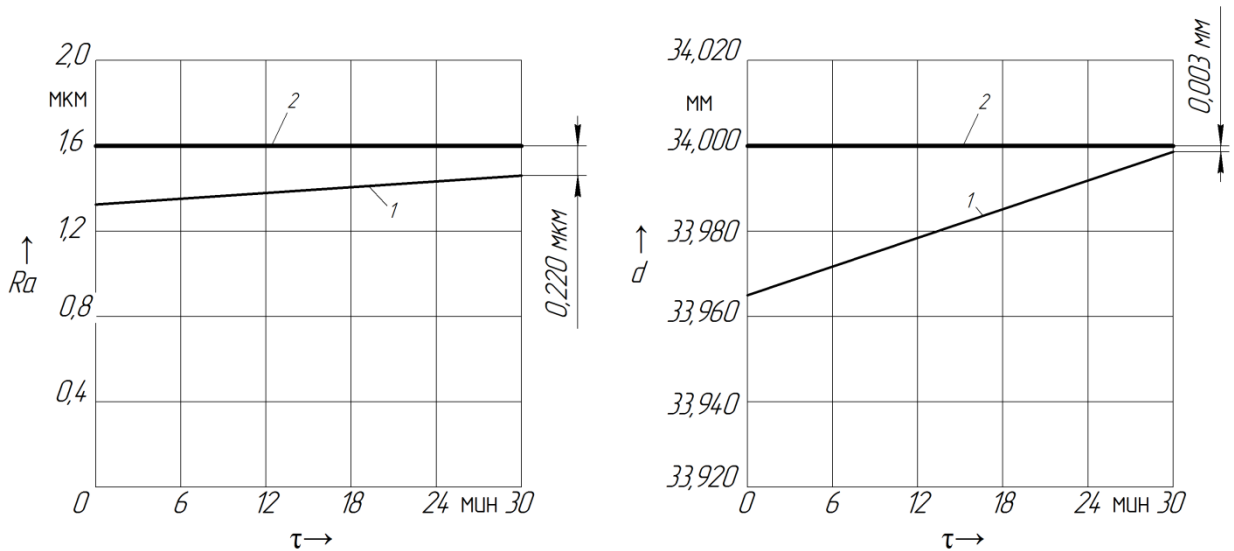


Рисунок 46 – Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $\tau$  при назначенном режиме:  $S_{об} = 0,08$  мм/об;  $V = 250$  м/мин

Поскольку расчётные значения обоих выходных параметров в момент времени  $\tau = 30$  мин. не достигают заданных значений, то необходима коррекция режима с целью увеличения производительности обработки. Принято решение варьировать величиной подачи  $S_{об}$ .

При расчёте интервалов варьирования элементами режима на данном этапе используются расчетные производные. Программа рекомендует скорректированное значение подачи  $S_{об1} = 0,086$  мм/об.

Траектории (расчётные) выходных параметров при скорректированном режиме представлены на рис. 47.

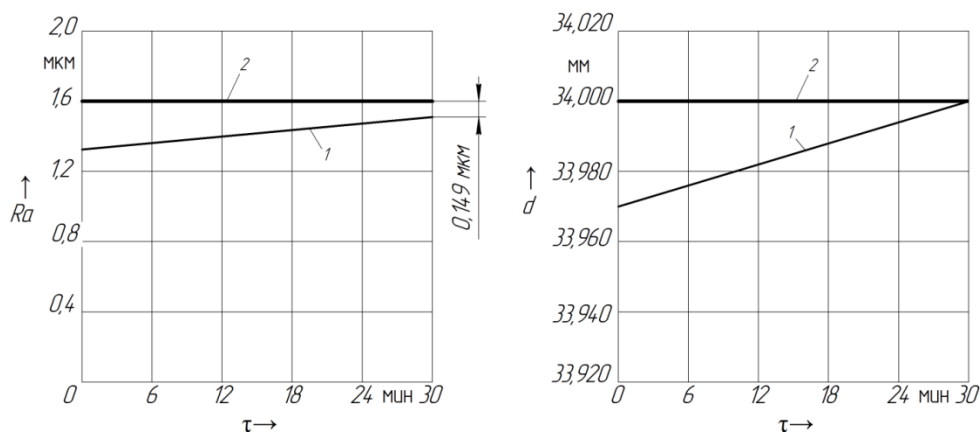


Рисунок 47 – Графики зависимости расчётных значений выходных параметров от времени  $t$  при скорректированном режиме:  $S_{06} = 0,086$  мм/об;  $V = 250$  м/мин

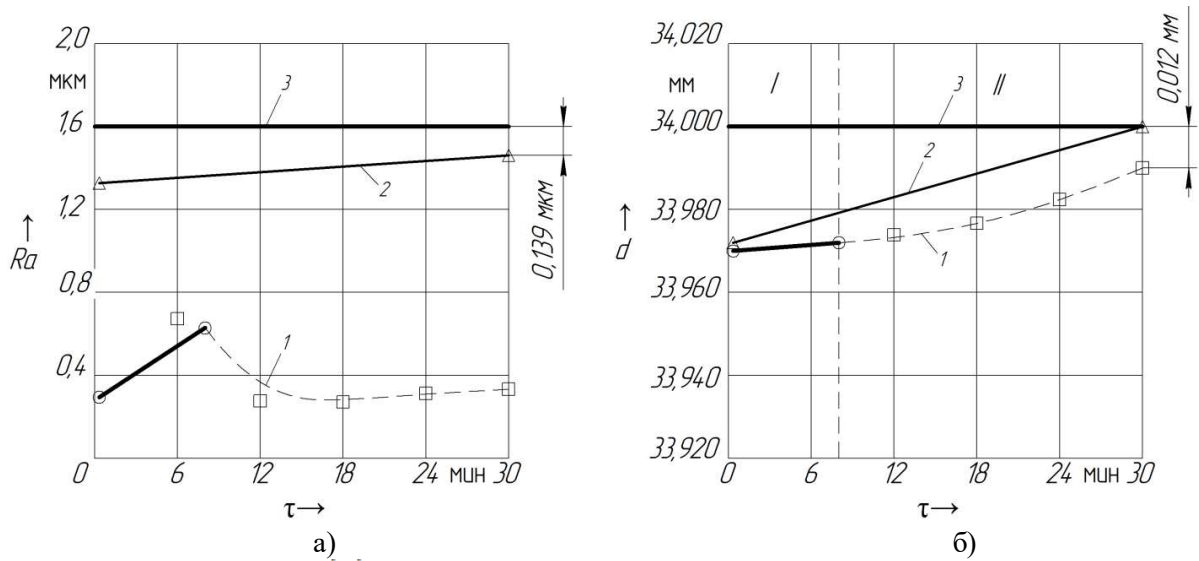
Поскольку математическое ожидание диаметрального размера в момент времени 30 мин имеет резерв равный нулю, а математическое ожидание параметра шероховатости  $Ra$  имеет положительный запас, то принимаем решение проводить обработку на данном режиме. В табл. 29 приведены результаты экспериментов.

Таблица 29 – Результаты измерений выходных параметров: материал заготовки – сталь 12X18H10T, инструментальный материал – сплав IS7015,  $t_r = 0,5$  мм,  $S_{06} = 0,086$  мм/об,  $V = 250$  м/мин

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_{\phi}$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_{\phi}^1$ , мкм
1	0,99	33,97	0,295
2	1,98	33,98	0,301
3	2,99	33,97	0,341
4	3,98	33,98	0,320
5	5,00	33,98	0,380
6	5,99	33,98	0,411
7	6,98	33,97	0,601
8	8,00	33,98	0,629

Диаметральный размер и шероховатость были измерены на коротком интервале времени (0 ... 8 мин.). Затем данные были экстраполированы на время, которое равнялось периоду стойкости (рис. 48). Кривая изменений фактических значений (кривая 1) выходных параметров  $Ra_{\phi}(\tau)$  и  $d_{\phi}(\tau)$  построены на основе обработки данных фактических измерений по методике,

изложенной в п.3.4. Расчёт произведен в программе (вкладка «Стат. анализ» - см. рис. 39).



**Рисунок 48 – Кривые изменений расчётных и фактических значений выходных параметров от времени  $\tau$  при режиме  $S_{об} = 0,086$  мм/об;  $V = 250$  м/мин: а, б, в – 1-я, 2-я и 3-я партии образцов; 1 – кривая изменений фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданные значения выходных параметров**

Проведённый анализ результатов эксперимента демонстрирует, что в момент времени  $\tau_c = 30$  мин, возможно получить положительные резервы по параметрам  $Ra_\phi$  и  $\omega_\phi$ . Это даёт возможность выполнить последующую коррекцию назначенного режима с целью повышения производительности обработки. Затем осуществляется обработка на скорректированных режимах:  $S_{об} = 0,129$  мм/об;  $V = 250$  м/мин (табл. 30).

**Таблица 30 – Результаты измерений значений выходных параметров: материал заготовки – сталь 12X18H10T, инструментальный материал – сплав IS7015,  $t_r = 0,5$  мм,  $S_{об} = 0,129$  мм/об,  $V = 250$  м/мин**

№ заготовки	Момент времени $\tau_i$ , мин	Размер обработанных деталей $d_\phi$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra_\phi^1$ , мкм
1	10,88	33,97	0,59
2	13,76	33,97	0,68
3	16,64	33,98	0,66
4	19,52	33,98	0,85
5	22,40	33,99	0,99
6	25,28	33,98	1,02
7	28,17	33,99	1,04
8	31,05	33,98	1,19

Выходные параметры (шероховатость и диаметральный размер) измерены на интервале времени, равном периоду стойкости резца (рис. 50).

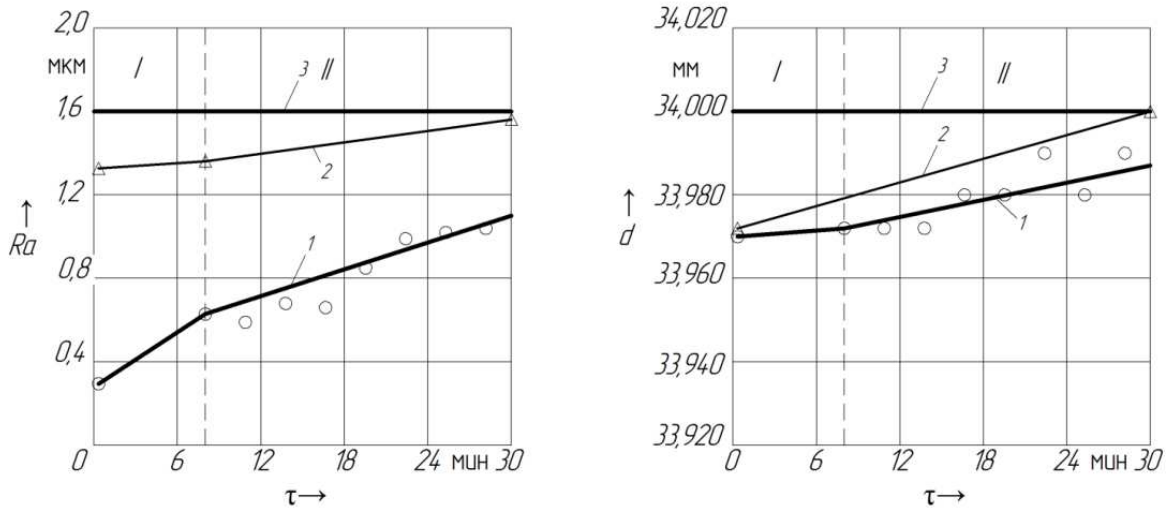


Рисунок 49 – Кривые изменений расчётных и фактических значений выходных параметров от времени  $\tau$  при режиме  $S_{0,6} = 0,129$  мм/об;  $V = 250$  м/мин: а, б, в – 1-я, 2-я и 3-я партии образцов; 1 – кривая изменений фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданные значения выходных параметров

Коррекция режима позволила повысить производительности обработки партий образцов из 12X18H10T режущей пластиной из сплава IS7015 (ф. InTool) с износостойким покрытием  $TiAlN$  на 33% по сравнению с назначенным режимом. В течение временного интервала  $\tau_c = 30$  мин, обеспечивается достижение требуемого качества обработки по параметрам шероховатости  $Ra$  и точности диаметрального размера детали.

Опытно-промышленные испытания методики коррекции режима проведены в АО «ФРЕСТ» на операции наружного продольного точения заготовки вала. Использование скорректированного режима позволило увеличить продольную подачу с 0,1 до 0,125 мм/об, т. е. на 25% при обеспечении качественных характеристик обработанных деталей (Приложение 7).

#### 4.4. Техничко-экономическая эффективность

С целью оценки экономической эффективности от применения полученных результатов в промышленности были выполнены расчёты и проанализирована технологическая себестоимость. Расчёт затрат выполнен поэлементным методом. Экономический анализ технологических процессов (ТП) механической обработки выполнен путём сопоставления затрат в различных вариантах ТП. Расчет выполнен только для одной операции – продольного наружного точения.

Исследование проведено при следующих условиях: диаметр заготовок  $\varnothing 70$  мм; длина обрабатываемой поверхности  $l=100$  мм; материал образцов – 12X18H10T. Режущий инструмент – резец MSDNN 2020K12, режущая пластина (СМП) – SNMG 120404-SFIS7015 (ф. InTool) с износостойким покрытием  $TiAlN$ : передний угол  $\gamma = -6^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 45$ . Требуемое значение шероховатости  $Ra = 1,6$  мкм; точность диаметрального размера по 8 качеству –  $\varnothing 34h8 (-0,039)$  мм. Годовая программа выпуска – 50000 шт.

Режим обработки назначен по каталогу режущего инструмента «InTool» [41]. Принимаем из диапазона значений максимально допустимую скорость резания  $V = 250$  м/мин и минимально допустимую подачу  $S_{об} = 0,08$  мм/об, глубину резания принимаем  $t_r = 0,5$  мм. Подробно коррекция режима точения и результаты эксперимента рассмотрены в п.4.3.2.

Выполнен расчёт экономической эффективности по обработке заготовок для двух вариантов ТП, которые отличаются режимом обработки:

- 1)  $V = 250$  м/мин;  $S_{об} = 0,080$  мм/об;  $t_r = 0,5$  мм (режим обработки, назначенный по каталогу РИ);
- 2)  $V = 250$  м/мин;  $S_{об} = 0,129$  мм/об;  $t_r = 0,5$  мм (скорректированный режим).

Так как во втором варианте ТП величина подачи  $S_{об}$  больше, чем в первом, при равных значениях скорости  $V$  и глубины резания  $t_r$ , то в данном



случае машинное  $T_{\text{маш}}$  и штучное время  $T_{\text{шт}}$  будут меньше, чем в первом варианте ТП, а производительность выше.

Данные для расчёта экономической эффективности приведены в табл. 31. Оптовая цена станка – 7 300 000 руб. Суммарная установленная мощность электродвигателей станка – 16,7 кВт. Часовая тарифная ставка основного рабочего – 200 руб.; часовая тарифная ставка наладчика – 250 руб. Стоимость режущего инструмента – 2000 руб. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии в Ульяновской области на 1 января 2023г. составляет – 4,52 руб./кВт·ч.

Таблица 31 – Данные для расчёта экономической эффективности

Параметр	1-й вариант технологического процесса	2-й вариант технологического процесса
Режим резания	$V = 250$ м/мин; $S_{об} = 0,08$ мм/об; $t_r = 0,5$ мм	$V = 250$ м/мин; $S_{об} = 0,129$ мм/об; $t_r = 1,0$ мм
Машинное время $T_{\text{маш}}$ , мин	0,36	0,22
Штучное время $T_{\text{шт}}$ , мин	0,61	0,47
Производительность $Q$ , шт/мин	1,64	2,13
Годовая программа выпуска, шт.	50000	50000

Годовой экономический эффект рассчитываем по формуле [97]:

$$\mathcal{E} = (C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2), \quad (256)$$

где  $C_1, C_2$  – себестоимость годового объема производства по первому и по второму варианту ТП, руб;  $K_1, K_2$  – капитальные вложения по первому варианту и по второму варианту ТП, руб;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принимаем  $E_n = 0,15$ .

В данном случае капитальные затраты для первого и второго вариантов ТП будут равными. Следовательно, годовой экономический эффект определяется разностью себестоимости затрат по первому и второму вариантам ТП.

Расчет технологической себестоимости выполним по формуле [61, 121]:

$$C_T = Z_o + Z_v + A + S_{ин} + S_э + S_p + Пр, \quad (257)$$

где  $Z_o$  – заработная плата основных рабочих, руб.;  $Z_v$  – заработная плата вспомогательных рабочих, руб.;  $A$  – амортизационные отчисления на оборудование, руб.;  $S_{ин}$  – затраты на инструмент, руб.;  $S_э$  – затраты на электроэнергию, руб.;  $S_p$  – затраты на обслуживание и ремонт оборудования, руб.;  $Пр$  – прочие общепроизводственные затраты, руб.

Составляющие уравнения (257) рассчитали по зависимостям, приведённым в источниках [61, 121]. Норму амортизационных отчислений на оборудование определили по источнику [70]. Результаты расчёта приведены в табл.32.

Таблица 32 – Результаты расчёта экономической эффективности

Параметр	1-й вариант технологического процесса	2-й вариант технологического процесса
Заработная плата основных рабочих $Z_o$ , руб	3,82	2,94
Заработная плата вспомогательных рабочих $Z_{вн.}$ , руб.	14,25	12,06
Амортизационные отчисления $A$ , руб.	0,74	0,45
Затраты на инструмент $S_{ин.}$ , руб.	3,67	2,70
Затраты на электроэнергию $S_э$ , руб.	0,88	0,67
Затраты на обслуживание и ремонт оборудования $S_p$ , руб.	0,03	0,02
Затраты на настройку инструментов вне станка $S_{н.}$ , руб.	0,02	0,02
Прочие общепроизводственные затраты $Пр$ , руб.	0,96	0,74
Технологическая себестоимость детали, руб.	24,37	19,60
Технологическая себестоимость годовой программы выпуска, руб.	1218500	980000
Годовой экономический эффект, руб.	238500	

Таким образом годовой экономический эффект для одной операции составил 238,5 тыс. руб. на один станок.

#### 4.5. Выводы

1. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для коррекции режима точения, которые позволяют определить режим обработки с учётом изменения параметров процесса во времени.

2. Проведено исследование эффективности разработанных методик и программного обеспечения для коррекции режима точения в лабораторных условиях. Коррекция режима резания позволила обеспечить увеличение производительности обработки на 25 ... 30 % без учёта и на 30 ... 35% при учёте изменяющихся во времени параметров процесса обработки при обеспечении требуемого качества деталей при обработке жёстких валов (отношение  $l_{\text{заг}}/d$  не превышает 4) и консольном закреплении заготовки.

3. Выполнен расчёт экономической эффективности от применения результатов исследований в промышленности. При коррекции режима резания в процессе отладки технологического процесса изготовления детали «Вал» при годовой программе выпуска 50000 шт. расчётный годовой экономический эффект составил 238500 руб. на один станок.

4. Результаты опытно-промышленных испытаний методики коррекции режима точения при обработке заготовок в АО "ФРЕСТ" демонстрируют, что применение данной методики позволило интенсифицировать режим обработки заготовок, увеличив производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики коррекции элементов режима процесса механической обработки, назначенных в условиях неопределённости технологической информации, учитывающие изменяющиеся во времени технологические параметры процесса. Варьирование управляемыми факторами в процессе коррекции используется для их приближения к оптимальному уровню и активного изучения процесса с целью коррекции математических моделей.

2. Разработаны математические модели для расчёта математического ожидания и рассеивания параметров процесса точения: диаметрального размера, параметра микрогеометрии обработанной поверхности, тангенциальной составляющей силы резания и температур резания. Модели учитывают изменение механических и теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента в зависимости от температуры в зоне обработки.

3. Выполнено численное моделирование параметров процесса точения. Установлено влияние износа резца на контактные температуры и тангенциальную составляющую силу резания. Установлено, что при разбросе значений напряжения текучести материала заготовки в пределах 20% диапазон рассеивания силы резания и контактных температур при точении составляет 18 ... 20%.

4. Получены зависимости для расчёта частных производных, используемых в формулах для определения интервала варьирования управляемыми параметрами в процессе коррекции режима.

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта средних арифметических значений и границ мгновенных полей рассеивания фактических значений выходных параметров и текущих показателей процесса точения, изменяющихся с увеличением времени наработки инструмента.

6. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие

реализовать коррекцию режима течения.

7. Проведена апробация разработанных методик и программного обеспечения коррекции режима течения. Коррекция режима течения позволила обеспечить увеличение производительности обработки на 25 ... 30 % без учёта и на 30 ... 35% с учётом изменяющихся во времени параметров процесса при обеспечении заданного качества деталей.

8. Результаты опытно-промышленных испытаний методики коррекции режима течения в АО "ФРЕСТ" показали, что ее применение позволяет увеличить производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества деталей.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

АСУ – автоматизированная система управления;

ИИ – искусственный интеллект;

ИНС – искусственная нейронная сеть;

МКЭ – метод конечных элементов;

КПД – коэффициент полезного действия;

ОН – остаточные напряжения;

РИ – режущий инструмент;

САУ – система автоматического управления;

СМП – сменная многогранная пластина;

СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость;

СОТС – смазочно-охлаждающее технологическое средство;

ТП – технологический процесс;

ЧПУ – числовое программное управление;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭС – экспертная система;

$b_{сдв}$  – величина пластического оттеснения материала заготовки, мм;

$B$  – ширина державки резца, мм;

$D$  – диаметр обрабатываемой заготовки, мм;

$H$  – высота державки резца, мм;

$h_{упр}$  – высота упругого поднятия металла заготовки, м;

$h_1, h_2, h_3, h_4$  – составляющие профиля шероховатости, обусловленные геометрией и кинематикой перемещения рабочей части режущего инструмента, относительными колебаниями инструмента и заготовки, пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, шероховатостью рабочих поверхностей инструмента соответственно, м;

$k_c$  – коэффициент утолщения стружки;

$k_3$  – коэффициент запаса;

$L$  – размер траектории перемещения инструмента относительно заготовок (путь резания), м;

$l$  – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

$l_p$  – вылет резца из резцедержателя, мм;

$l_{\Pi}$  – размер (длина) поверхностей заготовок, обработанных между последовательными подналадками инструмента, мм;

$l_2$  – длина контакта задней поверхности резца с заготовкой, мм;

$N_{дв}$  – мощность электродвигателя станка, кВт;

$N_{рез}$  – мощность резания, кВт;

$n$  – частота вращения шпинделя, об/мин;

$n_d$  – число деталей, обработанных между подналадками, шт.;

$P_x, P_y, P_z$  – осевая, радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н;

$Y_i^{max}$  – заданное (предельное) значение выходного параметра;

$Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности, мкм;

$Rz_{вр}$  – средняя высота профиля шероховатости вершины резца, мкм;

$Ra^{max}$  – заданное (предельное) значение параметра  $Ra$ , мкм;

$r$  – радиус при вершине режущего клина инструмента, мм;

$S_{об}$  – подача, мм/об;

$S_T$  – технологически допустимая подача, мм/об;

$S_{шер}$  – технологически допустимая подача, обеспечивающая требуемую шероховатость обработанной поверхности, мм/об;

$S_{жест}$  – технологически допустимая подача, учитывающая жесткость обрабатываемой заготовки, мм/об;

$S_{пр.р.}$  – технологически допустимая подача, учитывающая прочность режущего инструмента, мм/об;

$T_1$  – температура на передней поверхности резца, °С;

$T_2$  – температура на задней поверхности резца, °С;

$T_g$  – температура в зоне пластической деформации, °С;

$t_r$  – глубина резания, мм;

$F_1$  – сила трения на поверхности контакта передней поверхности резца со стружкой, Н;

$F_2$  – сила трения на поверхности контакта задней поверхности резца с заготовкой, Н;

$U$  – размерный износ инструмента, мкм;

$U_0$  – относительный износ инструмента, мкм/км;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$\alpha$  – задний угол резца, град.;

$\alpha_p$  – коэффициент линейного расширения материала заготовки,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\gamma$  – передний угол резца, град.;

$\Delta$  – отклонение от параллельности направляющих станка от оси патрона, мм/1000мм;

$\delta$  – допуск диаметрального размера обработанной заготовки (детали), мм;

$\eta_{\text{ст}}$  – КПД двигателя главного привода станка;

$\lambda$  – угол наклона передней поверхности резца, град.;

$\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести;

$\mu_1$  – коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца;

$\mu_2$  – коэффициент трения задней поверхности резца о заготовку;

$\rho$  – плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_k$  – радиус вспомогательной режущей кромки, мм;

$\sigma_{st}$  – среднее по области пластической деформации напряжение текучести материала заготовки, МПа;

$\sigma_b$  – предел прочности материала обрабатываемой заготовки, МПа;

$\sigma_s$  – предел текучести материала обрабатываемой заготовки, МПа;

$\tau_c$  – период стойкости резца, мин;

$\tau_{\text{сдв}}$  – предел прочности на сдвиг материала обрабатываемой заготовки, МПа;

$\varphi$  – главный угол в плане резца, град.;

$\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане резца, град.;

$\omega$  – погрешность диаметрального размера, мм;



$\omega_y$  – погрешность установки заготовки, мм;

$\omega_j$  – погрешность, обусловленная упругими деформациями элементов технологической системы, мм;

$\omega_n$  – погрешность настройки станка на размер, мм;

$\omega_{И}$  – погрешность, обусловленная размерным износом режущего инструмента (резца), мм;

$\omega_{\phi}$  – сумма погрешностей обработанной заготовки, обусловленных геометрическими неточностями станка, мм;

$\omega_{\theta}$  – погрешность, вызванная температурными деформациями технологической системы, мм;

$\omega^{max}$  – предельное значение погрешности обработки, мм.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверченков, В.И. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения: учеб. пособие для вузов / В. И. Аверченков, О. А. Горленко, В. Б. Ильицкий и др.; общ. ред. О.А. Горленко. – М.: Машиностроение, 1988. – 192 с.
2. Анцев, А.В. Повышение эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при неопределенности условий обработки: дис. ... докт. тех. наук: 05.02.07; защищена 21.09.20 / Анцев Алексей Витальевич. – Тула, 2020. – 370 с.
3. Ардашев, Д.В. Повышение эффективности процесса шлифования в многономенклатурном производстве на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов: дис. ... докт. техн. наук : 05.02.07, 05.02.08; защищена 26.10.2018 / Ардашев Дмитрий Валерьевич. – Ульяновск, 2018. – 351 с.
4. Ашмарин, И.П. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов / И.П. Ашмарин, Н.Н. Васильев, В.А. Амбросов – Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. – 77 с.
5. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 358 с.
6. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
7. Безъязычный, В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В.Ф. Безъязычный. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.
8. Бендат, Д. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
9. Бобырь, М.В. Автоматизированная система контроля и управления точностью обработки деталей на оборудовании с ЧПУ / М.В. Бобырь,

В.С. Титов, Н.А. Милостная // Известия Тульского государственного университета. Серия «Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления». – Вып. 1. – 2006. – С. 63 – 67.

10. Бобырь, М.В. АСУ прогнозирования точностью обработки деталей / М.В. Бобырь, В.С. Титов, Н.А. Милостная // Автоматизация в промышленности. – 2008. – №4. – С. 3 – 4.

11. Бобырь, М. В. Интеллектуальная система управления подачей при обработке деталей резанием / М.В. Бобырь, В.С. Титов, А.Л. Беломестная // промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – №8. – С. 17 – 20.

12. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании : Учебник для технических вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

13. Вегст, К. Ключ к сталям / К. Вегст, М. Вегст; под ред. Э.Ю. Колпишона. — СПб.: Профессия, 2006. — 724 с.

14. Верещака, А.С. Повышение работоспособности лезвийных инструментов на основе направленной модификации свойств их рабочих поверхностей при нанесении наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий / А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.А. Верещака и др. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – №4 (31). – С. 45 – 51.

15. Внуков, Ю.Н. Моделирование износа инструмента по результатам вейвлет-преобразования звукового сигнала / Ю.Н. Внуков, В.И. Дубровин, Ю.С. Афонин, Т.В. Манило // Штучный интеллект. – 2008. – №1. – С. 73 – 79.

16. Воронцов, А.Л. Исходные положения и критические замечания о современных методах теоретического исследования теплофизических процессов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение № 3 (228). – 2016. – С. 2 – 8.

17. Воронцов, А.Л. Определение температурных полей и контактных температур при резании // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение № 8 (233). – 2016. – С. 9 – 15.

18. Воронцов, А.Л. Практические расчеты температуры резания. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение № 2 (239). – 2017. – С. 14 – 23.

19. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 56 – 61.

20. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. 6. Определение основных параметров процесса резания/ А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 64 – 70.

21. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 67 – 76.

22. Горский, А.И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А.И. Горский, Е.Б. Иванов-Эмин, А.И. Кореновский. – Москва: НИИмаш, 1974. – 79 с.

23. Грановский, Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.

24. Давыдова, М.В. Технические характеристики металлообрабатывающих станков с ЧПУ: Станки токарной группы: Справочное пособие / М.В. Давыдова, А.М. Михалев, Ю.И. Моисеев. – Курган: Изд-во КГУ, 2010. – 84 с.

25. Данилов, Ю. Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.

26. Дерев'янченко, О.Г. Використання засобів штучного інтелекту при створенні системи підтримки працездатності ріжучих інструментів / О.Г. Дерев'янченко, Р.Г. Доліщинський, Д.О. Криницин // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2009. – №3 (50). – С. 32 – 38.

27. Емельянов, С.Г. Автоматизированные нечетко-логические системы управления: Монография / С.Г. Емельянов, В.С. Титов, М.В. Бобыр. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 176 с.

28. Жданов, А.А. Обеспечение точности расчёта стрелы прогиба нежестких деталей типа «Вал» при токарной обработке на станках с ЧПУ на основе получения оперативной информации о свойствах контактных пар : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.07; защищена 27.06.19 / Жданов Алексей Андреевич. – Волгоград, 2019. – 155 с.

29. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. – Ст. Оскол: ТНТ, 2011. – 456 с.

30. Завгородний, В. И. Повышение производительности точения деталей из труднообрабатываемых сплавов путём управления процессом резания по параметру шероховатости обработанной поверхности: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Москва, 2010.

31. Залога, В.А. Диагностика процессов механической обработки с применением искусственных нейронных сетей: состояние вопроса / В.А. Залога, А.В. Гонщик, Р.Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2012. – №2. – С. 128 – 137.

32. Зориктуев, В.Ц. Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т.12, №4 (33). – С.14 – 19.

33. Зориктуев, В.Ц. Система автоматического управления режимами резания на основе нечеткой логики / В.Ц. Зориктуев, Р.Р. Шангареев // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, №2 (37). – С.163 – 169.

34. Ивченко, Т.Г. Оптимизация режимов резания при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования / Т.Г. Ивченко, Е.Е. Шальская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Вып. 39. – С. 91 – 97.

35. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

36. Иноземцев, А.Н. Проектирование процессов и систем механообработки на основе разрешения неопределенности технологической информации: дис. ... докт. тех. наук: 05.02.08, 05.03.01; защищена 15.12.98 / Иноземцев Александр Николаевич. – Тула, 1998. – 451 с.

37. Ишуткин, В.И. Настройка металлорежущих станков. – М.: Машгиз, 1960. – 104 с.

38. Кабалдин, Ю.Г. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента / Ю.Г. Кабалдин, И.Л. Лаптев, Д.А. Шатагин и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2. – № 2. – С. 47 – 50.

39. Карплюк, А.Ф. Обеспечение качества токарной обработки посредством адаптивного управления на основе виброметрической информации: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Комсомольск-на-Амуре, 1999.

40. Каталог Korloy Cutting Tools. –2020-21. – Ver.1. – 1338 p.

41. Каталог InTool. Токарный инструмент – 2021. – 95 с.

42. Киселев, Е.С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – М.: РАН, 2008. – 250 с.

43. Клячкин, В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии: учебное пособие / В.Н. Клячкин. – М.: Финансы и статистика; Инфра-М, 2009. – 304 с.

44. Колдаев, В.Д. Численные методы и программирование: учебное пособие; под ред. Л.Г. Гагариной. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФА-М, 2009. – 544 с.
45. Кравченко, Д.В. Методология научных исследований в машиностроении: учебное пособие / Д.В. Кравченко; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 78 с.
46. Лебедев, Л.В. Технология машиностроения: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Л.В. Лебедев, В.У. Мнацаканян, А.А. Погонин и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 528 с.
47. Лепилин, В.И. Режимы резания авиационных материалов при точении: Учеб. пособие / В.И. Лепилин / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2000. – 128 с.
48. Макаров, А.Д. Вопросы оптимального резания стали 40ХНМА с различной структурой и твердостью / А.Д. Макаров, Р.З. Самигуллин, А.П. Доброрез // Вопросы оптимального резания металлов. – Уфа, 1972. – Вып. 34. – С. 11 – 1117.
49. Макаров, А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.:Машиностроение, 1966. – 264 с.
50. Макаров, А.Д. Оптимизация режимов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
51. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
52. Мартинов, Г.М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г.М. Мартинов, А.С. Григорьев // СТИН – 2012. – №12. – С. 23 – 27.
53. Маталин, А.А. Технология машиностроения: Учебник. 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 512 с.

54. Медведев, В. В. Особенности диагностики качества механообработки с применением интеллектуальных систем / В.В. Медведев, В.С. Медведев // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2008. – № 3Е (14). – С. 131 – 135.

55. Медведев, В.В. Система диагностики качества механообработки на основе искусственного интеллекта / В.В. Медведев, В.С. Медведев // Донбасс-2020: Наука и техника – производству: Материалы IV научно-практической конференции. г. Донецк, 27-28 мая 2008 г. – С. 205 – 210.

56. Металлорежущие станки: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям "Технология машиностроения", "Металлообрабатывающие станки и комплексы" направления подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" : в 2 т. / Т. М. Авраимова и др. ; под. ред. В. В. Бушуева. – Москва: Машиностроение, 2011. – Т. 2 / В. В. Бушуев и др. – 2011. – 583 с.

57. Мовшович, А.Я. О некоторых вопросах механики процессов резания металлов инструментом с покрытием / А.Я. Мовшович, А.А. Этингант, А.И. Этингант, Ю.А. Черная // Машинобудування: Збірник наукових праць. – 2013. – № 11. – С. 140 – 146.

58. Муслина, Г. Р. Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов: учебное пособие / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков; под общ. ред. Л.В. Худобина; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2007 – 220 с.

59. Нгуен, В.К. Аналитическое определение составляющих силы резания при точении с учетом упрочнения материала / В.К. Нгуен // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 215 – 220.

60. Нестеренко, П.С. Обеспечение точности формы и размеров нежестких деталей на основе автоматического управления процессом



токарной обработки: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.07, 05.02.08; защищена 23.03.21 / Нестеренко Павел Сергеевич. – Волгоград, 2021. – 152 с.

61. Новицкий, Н.И. Организация, планирование и управление производством. Практикум: учебное пособие / Н.И. Новицкий, Л. Ч. Горностаи и др.; под ред. Н.И. Новицкого. – М.: КНОРУС, 2006. – 320 с.

62. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / И.А. Фомин, Зантур Сахби, В.А. Богуславский, Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Вып. 39. – 228 с.

63. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В.В. Душинский, Е.С. Пуховский, С.Г. Радченко; под ред. Г.Э. Таурита. – Киев: Техника, 1977. – 176 с.

64. Пасько, Н.И. Комплексная модель износа режущего инструмента и пример ее применения для оптимизации режима профилактики / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2015. – Вып.11, Ч.1. – С. 192 – 202.

65. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – Брянск, 2001.

66. Плотников, А.Л. Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки / А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, Ж. С. Тихонова и др. // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 3(129). – С. 32–39.

67. Плотников, А.Л. Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ: монография / А. Л. Плотников / ВолгГТУ. – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012. – 231 с.

68. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок : ПНАЭ Г-7-002-86: Введ.

в действие 01.07.87 с изм. / Гос. ком. СССР по надзору за безопасным ведением работ в атом. энергетике. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.

69. Полтавец, В.В. Теоретическое обоснование режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учетом нестационарности процесса: автореферат диссертации доктора технических наук : 05.02.08 / Полтавец Валерий Васильевич. – Донецк, 2020. – 36 с.

70. Постановление Правительства РФ от 1 января 2002 г. №1 « О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы».

71. Постнов, В.В. Оптимизация обработки резанием жаропрочных никелевых сплавов по термодинамическим параметрам / В.В. Постнов, В.Л. Юрьев, И.Г. Каримов // Авиационная промышленность. – 2012. – №1. – С. 27 – 32.

72. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчикова и др.; Под общ. ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1990. – 399 с.

73. Пушных, В.А. Сравнение двух методов расчета температуры резания / В.А. Пушных, В.Л. Библик / Известия Томского политехнического университета. – Т. 307, № 3. – 2004. – С. 102 – 104.

74. Развитие науки о резании металлов / Под ред. В.Ф. Боброва – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.

75. Расчет режимов резания. Учебное пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.

76. РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81). – М.: Издательство стандартов, 1987. – 84 с.

77. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.

78. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

79. Руденко, А.С. Диагностика выходных параметров процесса резания в автоматизированном производстве на основе нелинейной динамики: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Комсомольск-на-Амуре, 2004.

80. Рыжкин, А.А. Теплофизические процесс при изнашивании инструментальных режущих материалов. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 311 с.

81. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Щучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 419 с.

82. Сапожников, А.Ю. Применение экспертных систем в процессе проектирования авиационных ГТД / А.Ю. Сапожников, И.А. Кривошеев // Молодой учёный. – 2009. – №12. – С. 90 – 97.

83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669693 Российская Федерация. Коррекция режима течения: № 2022669319 : заявл. 20.10.2022 : опубл. 24.10.2022 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669706 Российская Федерация. Коррекция режима течения в условиях неопределенности технологической информации : № 2022669247 : заявл. 20.10.2022 : опубл. 24.10.2022 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

85. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610980 Российская Федерация. Расчет температуры резания при

точении с наложением вибраций : № 2021610045 : заявл. 11.01.2021 :опубл. 20.01.2021 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

86. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

87. Система контроля и методы распознавания состояний резцов для поддержания их работоспособности / А.Г. Деревянченко, Л.В. Бовнегра, Д.А. Криницын, Е.В. Косс, А.А. Фомин // Наукові праці ДонНТУ. Проектування прогресивних конструкцій різальних інструментів та технологічного оснащення. – 2009. – С. 87 – 94.

88. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 640 с.

89. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.Г. Косилова и др.; под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.

90. Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

91. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

92. Суслов, А.Г. Технология машиностроения: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.Г. Суслов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2007. – 430 с.

93. Табаков, В.П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В.П. Табаков, А.В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.

94. Табаков, В.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов ; научный редактор В.П. Табаков. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2015. – 179 с.

95. Табаков, В.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 123 с.

96. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

97. Трусова, Л.И. Экономика машиностроительного предприятия: учебное пособие / Л.И. Трусова, В.В. Богданов, В.А. Щепочкин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 200 с.

98. Унянин, А.Н. Имитационное моделирование процесса механической обработки заготовок при назначении режима / А.Н. Унянин, Е.А. Семлюков // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVIII МНТК в г. Севастополе 12 - 17 сентября 2011 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Т. 3. – С. 131 – 135.

99. Унянин, А. Н. Исследование температурного поля при точении с наложением вибраций / А. Н. Унянин, П. Р. Финагеев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 3(45). – С. 63 – 69.

100. Унянин, А.Н. К вопросу о теплообмене контактирующих при шлифовании объектов с окружающей средой / А.Н. Унянин // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: сборник трудов 4-й международ. НТК. – Харьков: ХГПУ, 2001. – С. 79 – 82.

101. Унянин, А.Н. Коррекция параметров математических моделей процесса механической обработки при назначении режима / А.Н. Унянин, Е.А. Семлюков // Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении: материалы Международной Молодежной школы-семинара (г. Ульяновск, 12 – 15 мая 2011г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 80 – 85.

102. Унянин, А. Н. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса обработки / А. Н. Унянин, П. Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24, № 3(107). – С. 63-68.

103. Унянин, А.Н. Лабораторные работы по дисциплине «Методы моделирования физических и тепловых процессов механической обработки материалов»: учебное пособие; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 118 с.

104. Унянин, А.Н. Лабораторные работы по дисциплине «Технологическое обеспечение качества»: учебное пособие / А.Н. Унянин; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 111 с.

105. Унянин, А. Н. Методика назначения режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации с изменяющимися во времени параметрами / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 3 (101). – С. 62 – 68.

106. Унянин, А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов: дис. ... докт. тех. наук : 05.03.01; защищена 08.12.06 / Унянин Александр Николаевич. – Ульяновск, 2006. – 537 с.

107. Унянин, А.Н. Определение производственной погрешности диаметральных размеров заготовок при токарной обработке в процессе

выполнения размерного анализа технологического процесса / А.Н. Унянин, Е.А. Семлюков // Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении: материалы Международной Молодежной школы-семинара (г. Ульяновск, 12 – 15 мая 2011г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 85 – 92.

108. Унянин, А. Н. Разработка и апробация методики назначения режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации / А. Н. Унянин, П. Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 1-2. – С. 297 – 301.

109. Унянин, А. Н. Разработка и исследование методики коррекции режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации / А. Н. Унянин, П. Р. Финагеев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – № 2 (40). – С. 56 – 61.

110. Унянин, А. Н. Статистический анализ параметров процесса механической обработки / А. Н. Унянин, П. Р. Финагеев // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 6(146). – С. 48-54.

111. Унянин, А.Н. Статистический анализ процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 33 – 35.

112. Унянин, А.Н. Технологические расчеты в приложении NX «Расширенная симуляция»: учебное пособие / А.Н. Унянин; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 111 с.

113. Федоренко, Н.Г. Обеспечение точности расчёта параметров процесса токарной обработки коррозионностойких сталей : дис. ... канд. тех.

наук : 05.02.07; защищена 17.03.16 / Федоренко Наталья Григорьевна. – Волгоград, 2016. – 162 с.

114. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

115. Финагеев, П. Р. Обзор систем управления процессом механической обработки заготовок резанием / П. Р. Финагеев // Информатика и вычислительная техника: XIII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2021, Ульяновск, 17–18 июня 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 283-289.

116. Финагеев, П.Р. Разработка концептуальной модели процесса механической обработки с учетом изменения выходных параметров и текущих показателей процесса / П.Р. Финагеев, А.Н. Унянин // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 53-й научно-технической конференции (28 января – 2 февраля 2019 года) в 3 ч. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С. 46 – 49.

117. Финагеев, П.Р. Методика коррекции режима токарной обработки с изменяющимися во времени параметрами / П.Р. Финагеев // Инновационные технологии в машиностроении. Международная научно-практическая заочная конференция (30 ноября 2020 года): сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2020. – С. 54 – 59.

118. Хоанг Ван Чи. Нейросетевой подход к моделированию температурно силовых характеристик процесса резания / Хоанг Ван Чи, В. С. Сальников // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 3 (34). – С. 144.

119. Худобин, Л.В. Базирование заготовок при механической обработке: учебное пособие / Л.В. Худобин, М.А. Белов, А.Н. Унянин; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 197 с.



120. Чигиринский, Ю. Л. Математические модели оперативного управления технологическими режимами лезвийной обработки / Ю. Л. Чигиринский, А. Р. Ингеманссон // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 7(121). – С. 20-28.

121. Экономическое обоснование выбора технологического процесса механической обработки: Метод. указ. к практич. занятиям, курсовому и дипломному проектированию / Сост. В.А. Дмитриев, О.А. Бабордина, В.А. Ахматов. – Самара; Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 51с.

122. Юркевич, В.В. Экспертная система для токарной обработки // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2009. – №1 (5). – С. 117 – 123.

123. Ящерицын, П.И. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдман, М.А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2006. — 512 с.

124. Abburi, N.R. A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process / N.R. Abburi, U.S. Dixit // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2006. – Vol. 22. – №4. – P. 363 – 372.

125. Alaskari, A. Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning / A. Alaskari, S.E. Oraby // Journal of Engineering Research. – 2018. – Vol.6, №(2) – pp. 209 – 231.

126. Ali, S.M. Tool wear and surface roughness prediction using an artificial neural network in turning steel under minimum quantity lubrication / S.M. Ali, N.R. Dhar // Engineering and Technology. – 2010. – №62. – P. 830 – 839.

127. Benardos, P.G. Prediction of workpiece elastic deflections under cutting forces in turning / P.G. Benardos, S. Mosialos, G.-C. Vosniakos // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2006. – Vol. 22, №5-6. – P. 505 – 514.

128. Lin, Cheng-Jian. Using fuzzy control for feed rate scheduling of computer numerical control machine tools / Cheng-Jian Lin, Chun-Hui Lin and Shyh-Hau Wang // Applied Sciences. –2021. – 11(10):4701.

129. Milutinović, M. The effects of tool flank wear on tool life / M. Milutinović, Lj. Tanović. – Proceedings of the 34th International conference on production engineering niš, 2011. – P. 33 – 36.

130. Ozel, T. Predictive modeling of surface roughness and wear in hard turning using regression and neural networks / T. Ozel, Y. Karpat // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45, № 4 – 5. – P. 467 – 479.

131. Prasad, B.S. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control / B.S. Prasad, D.S. Prasad, A. Sandeep, G. Veeraiah // International Journal of Automation and Computing. – 2013. – №10(3) – pp. 202 – 209.

132. Ulsoy, A.G. Control of machining processes / A.G. Ulsoy, Y. Koren – ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control. – 1993. – 115, pp. 301 – 308.

133. Unyanin, A. N. Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A. N. Unyanin, P. R. Finageev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09 – 13 September 2019. Vol. 709, 2, Issue 1. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 022034.

134. Unyanin, A. N. Numerical simulation of turning contact temperatures with varying material yield strength and tool wear / A. N. Unyanin, P. R. Finageev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 September 2020. – Sevastopol, 2020. – P. 022036.

135. Unyanin, A. N. Research of the influence of the physical and mechanical properties of the workpiece material on the temperature field of the turning process / A. N. Unyanin, P. R. Finageev // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 300 – 308.

136. Unyanin, A. N. Research of the Influence of Cutting Conditions on the Temperature Field During Turning / A. N. Unyanin, P. R. Finageev // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 271 – 277.

137. Unyanin, A.N. The ultrasonic grinding process temperature field study / A.N. Unyanin, A.S. Khusainov // MATEC Web of Conferences. – Vol. 129. – 2017. – P. 10.

138. Wang, J. The Effect of Tool Flank Wear on the Orthogonal Cutting Process and Its Practical Implications / J. Wang, C.Z. Huang, W.G. Song // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 142. – P. 338 – 346.

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Расчёт производных  $\frac{dRa}{ds_{об}}$  (p),  $\frac{dRa}{dV}$  (p),  $\frac{d\omega}{ds_{об}}$  (p),  $\frac{d\omega}{dV}$  (p)

Исходная зависимость для расчета параметра шероховатости  $Ra$ :

$$Ra = 0,2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4).$$

Подставив в зависимость выражения для определения ее составляющих, получим:

$$Ra = 0,2 \cdot \left( \frac{S_{об}^2}{8 \cdot r} + \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \frac{1}{u \cdot a}}{j_{т.с.}} \cdot \Delta l_2 \right) + \frac{b_{сдв} \cdot (2 \cdot S_{об} + b_{сдв})}{32 \cdot r} + Rz_{вр} \right)$$

Полагая, что все переменные выражения для расчёта параметра  $Ra$  не являются функциями переменных  $S_{об}$  и  $V$  и не зависят от них, получим:

$$\frac{dRa}{dS_{06}}(p) = \frac{d}{dS_{06}} \left[ 0,2 \cdot \left( \frac{S_{06}^2}{8 \cdot r} + \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot t_r \cdot \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}}{j_{T.c.}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}}{j_{T.c.}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot t_r \cdot \frac{1}{u \cdot a}}{j_{T.c.}} \cdot \Delta l_2 \right) + \frac{b_{cДВ}}{16 \cdot r} + 0 \right];$$

$$\frac{dRa}{dS_{06}}(p) = \frac{0,05 \cdot S_{06}}{r} + 0,2 \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot t_r \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) - \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{T.c.}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{T.c.}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{nn}}\right) \cdot t_r \cdot \left(\frac{1}{u \cdot a}\right)}{j_{T.c.}} \cdot \Delta l_2 \right) + \frac{0,0125 \cdot b_{cДВ}}{r}.$$

Аналогично найдем  $\frac{dRa}{dV}(p)$ :

$$\begin{aligned} \frac{dRa}{dV}(p) = \frac{d}{dV} & \left[ 0.2 \cdot \left( \frac{S_{\text{оо}}^2}{8 \cdot r} \right. \right. \\ & + \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{J_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta\sigma_S \right. \\ & + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5+\mu) \cdot u}{2 \cdot K_C}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{J_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{T_q}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \frac{1}{u \cdot a}}{J_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta l_2 \left. \right) \\ & \left. + \frac{b_{\text{сдв}} \cdot (2S + b_{\text{сдв}})}{32 \cdot r} + RZ_{\text{вп}} \right]; \end{aligned}$$

$$\frac{dRa}{dV}(p) = 0,2 \cdot \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{S_{06}^2}{8 \cdot r} \right) + \frac{d}{dV} \left( \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tq}{T_{пл}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \left( \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{Tq}{T_{пл}}\right) \cdot S_{06} \cdot \left( \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{Tq}{T_{пл}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \left(\frac{1}{u \cdot a}\right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta l_2 \right) \right) + \frac{d}{dV} \left( \frac{b_{сдв} \cdot (2 \cdot S + b_{сдв})}{32 \cdot r} \right) + \frac{d}{dV} (RZ_{вр}) \right].$$

Т.к. зависимость для расчёта параметра шероховатости  $Ra$  не учитывает в явном виде влияние скорости резания  $V$ , для расчёта параметра  $Tg$  используем регрессионную зависимость, аргументом которой является скорость  $V$  (см. п. 4.2). Для контактной пары 12Х18Н10Т-Т15К6 выражение примет вид:

$$\frac{dRa}{dV}(p) = 0,2 \cdot \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{S_{06}^2}{8 \cdot r} \right) + \frac{d}{dV} \left( \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{пл}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \left( \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{пл}}\right) \cdot S_{06} \cdot \left( \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot K_C} \right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{пл}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \left(\frac{1}{u \cdot a}\right)}{j_{т.с.}} \cdot \Delta l_2 \right) \right) + \frac{d}{dV} \left( \frac{b_{сдв} \cdot (2 \cdot S + b_{сдв})}{32 \cdot r} \right) + \frac{d}{dV} (RZ_{вр}) \right];$$



$$\frac{dRa}{dV}(p) = 0,2 \cdot \left[ \left( \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot S_{\text{об}} \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - t_g \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta \sigma_S \right) \right) \right. \\ \left. + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{\text{об}} \cdot \left( \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - t_g \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right)}{j_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \sigma_S \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot S_{\text{об}} \cdot \left(\frac{1}{u \cdot a}\right)}{j_{\text{т.с.}}} \cdot \Delta l_2 \right) \right].$$

Аналогичным образом получаем производную  $\frac{dRa}{dV}(p)$  для других контактных пар.

Полагаем, что все переменные выражения для расчета параметра  $\omega$  не являются функциями переменных  $S$  и  $V$  и не зависят от них.

Аналогично определим производные  $\frac{d\omega}{dS_{\text{об}}}$  и  $\frac{d\omega}{dV}$ :

$$\frac{d\omega}{dS_{\text{об}}} = \frac{d}{dS_{\text{об}}} \left( 1,2 \cdot \sqrt{\omega_y^2 + \omega_H^2 + \omega_j^2} + \omega_{\text{И}} + \omega_{\Phi} + \omega_{\theta} \right);$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial S_{06}} \text{ (p)}$$

$$= \frac{1,2 \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta l_2 \right)}{\left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{06} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta l_2 + \frac{2 \cdot P_y}{3 \cdot E \cdot 0,05 d^4} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3) \right)^2} + \omega_y^2 + \omega_H^2} - \frac{U_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{п}}}{1000 \cdot S_{06}^2} + 0,125 \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta\sigma_S + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta t_r + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{Tg}{T_{\text{пл}}}\right) \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\text{тс}}} \cdot \Delta l_2 \right) - \frac{U_0 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{п}}}{1000 \cdot S_{06}^2} \Bigg);$$

$$\frac{d\omega}{dV}(p)$$

$$\begin{aligned}
& 1,2 \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta\sigma_S + \right. \\
& \left. \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta t_r + \right. \\
& \left. \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta l_2 \right) \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta\sigma_S \right. \\
& \left. + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta t_r \right. \\
& \left. + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta l_2 + \frac{2 \cdot Py}{3 \cdot E \cdot 0,05d^4} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3) \right) \\
= & \frac{\sqrt{\left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta\sigma_S \right.}{2} \\
& \left. + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta t_r \right. \\
& \left. + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{(16,0417 + 0,1681V - 13,75 \cdot S_{06} - t_r + 85,5h3)}{T_{\text{III}}}\right) \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta l_2 + \frac{2 \cdot Py}{3 \cdot E \cdot 0,05d^4} \cdot (l_{32}^3 - l_{31}^3) \right)^2 + \omega_y^2 + \omega_H^2} \\
& + 0,125 \cdot \left( \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta\sigma_S + \right. \\
& \left. \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot \sigma_s \cdot S_{06} \cdot \left\{ \left[1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c}\right] \cdot \sin\gamma + \frac{l_2}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta t_r + \right. \\
& \left. \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{0,1681}{T_{\text{III}}}\right) \cdot t_r \cdot S_{06} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a}\right\}}{j_{\tau c}} \cdot \Delta l_2 \right)
\end{aligned}$$

### Результаты численного моделирования выходных параметров процесса точения

Численное моделирование проводили при следующих условиях. Обработка точением наружной цилиндрической поверхности заготовки диаметром 50 мм, консольно закрепленной в патроне, осуществляется проходным резцом со сменной многогранной твердосплавной пластиной из сплава T15K6 (рис. П.2.1). Геометрические параметры пластины: главный и вспомогательный углы в плане  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 45^\circ$ ; радиус при вершине  $r = 0,8$  мм; передний угол  $\gamma = 0^\circ$ ; угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$ . Материал заготовки – сталь 12X18H10T. План численных экспериментов представлен в табл. П.2.1.

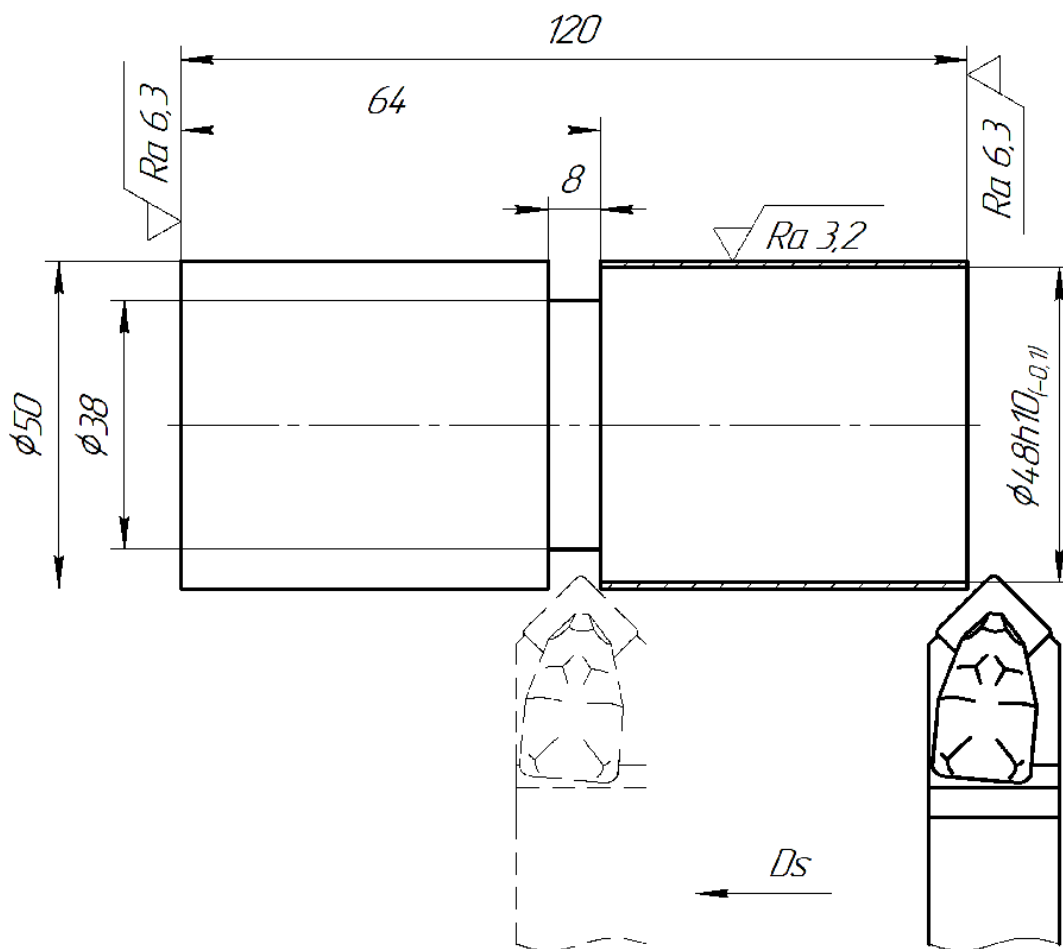


Рис. П.2.1. Схема обработки

Таблица П.2.1. План численных экспериментов

№ численного эксперимента	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $S_{об}$ , мм/об	Глубина резания $t_r$ , мм
1	60	0,1	0,5
2	240	0,1	0,5
3	60	0,3	0,5
4	240	0,3	0,5
5	60	0,1	1,0
6	240	0,1	1,0
7	60	0,3	1,0
8	240	0,3	1,0

Результаты численного моделирования приведены в табл. П.2.2.

Таблица П.2.1 – Результаты численного моделирования

№ численного эксперимента	№ заготовки	Машиное время обработки $T_{маш}$ , мин	Тангенциальная составляющая силы резания $P_z$ , Н	Износ по задней поверхности резца $h_s$ , мм	Математическое ожидание величины шероховатости $R_a$ , мкм	Максимальное расчетное значение величины $R_{a_{max}}$ , мкм	Математическое ожидание диаметра детали $d_0$ , мм	Максимальное расчетное значение диаметра детали $d_{max}$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1,70	37,5	0,09	1,01	1,08	48,920	48,930
	2	3,40	38,0	0,10	1,02	1,08	48,931	48,942
	3	5,10	38,4	0,11	1,02	1,08	48,932	48,943
	4	6,80	38,9	0,12	1,02	1,08	48,932	48,944
	5	8,50	39,5	0,13	1,03	1,09	48,933	48,946
	6	10,21	40,0	0,13	1,03	1,09	48,934	48,947
	7	11,91	40,5	0,14	1,03	1,09	48,935	48,948
	8	13,61	41,1	0,15	1,03	1,09	48,936	48,949
2	1	0,43	37,5	0,09	1,01	1,08	48,920	48,930
	2	0,85	37,5	0,10	1,01	1,08	48,931	48,942
	3	1,28	37,9	0,11	1,02	1,08	48,932	48,943
	4	1,70	38,4	0,12	1,02	1,08	48,932	48,944
	5	2,13	38,9	0,13	1,02	1,08	48,933	48,946
	6	2,55	39,5	0,13	1,02	1,08	48,934	48,947
	7	2,98	40,0	0,14	1,02	1,08	48,935	48,948
	8	3,40	40,5	0,15	1,03	1,09	48,936	48,949

## Продолжение таблицы П. 2. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	1	0,57	90,1	0,09	3,00	3,19	48,919	48,930
	2	1,13	90,3	0,09	3,01	3,19	48,929	48,939
	3	1,70	90,1	0,09	3,01	3,19	48,929	48,940
	4	2,27	90,3	0,10	3,01	3,19	48,930	48,940
	5	2,83	90,5	0,10	3,02	3,19	48,930	48,941
	6	3,40	90,6	0,10	3,00	3,19	48,930	48,941
	7	3,97	90,8	0,10	3,00	3,19	48,930	48,942
	8	4,54	91,0	0,11	3,00	3,19	48,931	48,942
4	1	0,14	89,0	0,09	3,00	3,19	48,919	48,930
	2	0,28	89,0	0,09	3,00	3,19	48,929	48,939
	3	0,43	89,1	0,09	3,00	3,19	48,929	48,940
	4	0,57	89,1	0,10	3,00	3,19	48,930	48,940
	5	0,71	89,2	0,10	3,01	3,19	48,930	48,941
	6	0,85	89,4	0,10	2,99	3,18	48,930	48,941
	7	0,99	89,6	0,10	2,99	3,18	48,930	48,942
	8	1,13	89,7	0,11	2,99	3,18	48,931	48,942
5	1	1,70	74,4	0,09	1,15	1,24	47,920	47,931
	2	3,40	75,5	0,10	1,15	1,25	47,931	47,942
	3	5,10	76,3	0,11	1,16	1,26	47,932	47,943
	4	6,80	77,4	0,12	1,17	1,26	47,933	47,944
	5	8,50	78,4	0,13	1,17	1,27	47,933	47,946
	6	10,21	79,5	0,13	1,18	1,28	47,934	47,947
	7	11,91	80,0	0,14	1,19	1,28	47,935	47,948
	8	13,61	81,7	0,15	1,19	1,29	47,936	47,950
6	1	0,43	74,5	0,09	1,15	1,24	47,920	47,931
	2	0,85	74,4	0,10	1,15	1,25	47,931	47,942
	3	1,28	75,2	0,11	1,15	1,26	47,932	47,943
	4	1,70	76,3	0,12	1,16	1,26	47,933	47,944
	5	2,13	77,3	0,13	1,17	1,27	47,933	47,946
	6	2,55	78,4	0,13	1,17	1,28	47,934	47,947
	7	2,98	79,5	0,14	1,18	1,28	47,935	47,948
	8	3,40	80,5	0,15	1,19	1,28	47,936	47,950
7	1	0,57	175,5	0,09	3,39	3,67	47,920	47,931
	2	1,13	175,8	0,09	3,40	3,68	47,930	47,940
	3	1,70	175,6	0,09	3,40	3,68	47,930	47,941
	4	2,27	175,9	0,10	3,41	3,69	47,930	47,941
	5	2,83	176,3	0,10	3,42	3,70	47,930	47,942
	6	3,40	176,6	0,10	3,43	3,71	47,931	47,942
	7	3,97	177,0	0,10	3,43	3,71	47,931	47,943
	8	4,54	177,3	0,11	3,44	3,72	47,931	47,943
8	1	0,14	175,5	0,09	3,39	3,67	47,920	47,931
	2	0,28	173,4	0,09	3,38	3,67	47,930	47,940
	3	0,43	173,2	0,09	3,39	3,67	47,930	47,941
	4	0,57	173,5	0,10	3,39	3,68	47,930	47,941
	5	0,71	173,9	0,10	3,40	3,68	47,930	47,942
	6	0,85	174,2	0,10	3,41	3,69	47,931	47,942
	7	0,99	174,5	0,10	3,41	3,69	47,931	47,943

Окончание таблицы П.2.1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
	8	1,13	174,9	0,11	3,42	3,70	47,931	47,943

## СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2021610980**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2021610980 Дата регистрации: 20.01.2021 Номер и дата поступления заявки: 2021610045 11.01.2021 Дата публикации и номер бюллетеня: 20.01.2021 Бюл. № 1 Контактные реквизиты: ois@nlistu.ru</p>	<p>Автор(ы): Унянин Александр Николаевич (RU), Финагеев Павел Рамдисович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:  
Расчет температуры резания при точении с наложением вибраций

**Реферат:**

Программа предназначена для расчета контактных температур и сил резания и может применяться в машиностроении, что позволит назначать рациональные режимы обработки заготовок. Программа позволяет производить расчеты температур и сил резания при наложении колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности заготовки. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет контактных температур в зоне резания; расчет тангенциальной составляющей силы резания; программа позволяет сохранить результаты расчета в файл.

Язык программирования: Basic  
Объем программы для ЭВМ: 720 КБ

Рис. ПЗ.1. Свидетельство о регистрации программы «Расчет температуры резания при точении с наложением вибраций»





## СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ



Рис. П5.1. Свидетельство о регистрации программы «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации»

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6**

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ  
ЭКСПЕРИМЕНТА**

Из трёх партий заготовок отобрано по восемь и выполнено точение их цилиндрических поверхностей с последующим измерением параметра шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ . Результаты приведены в табл.П.6.1.

Таблица П.6.1 – Результаты измерения шероховатости

Номер партии	Шероховатость $Ra$ , мкм							
	Номер заготовки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,35	1,47	1,70	1,90	1,99	1,92	1,73	1,79
2	1,37	1,42	1,36	1,52	1,43	1,62	1,72	1,84
3	1,47	1,32	1,34	1,40	1,51	1,55	1,69	1,61

Необходимо выяснить, существенно ли влияние различных партий сырья на величину шероховатости. Примем уровень значимости  $\alpha = 0,01$ .

Имеем  $k = 3$ ,  $n = 8$  (где  $k$  – это количество партий заготовок;  $n$  – это количество заготовок в одной партии). Найдём средние значения шероховатости для каждой партии по зависимости:

$$\overline{Ra}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_{ij},$$

где  $Ra_{ij}$  – значение шероховатости  $i$ -ой детали  $j$ -ой партии заготовок, мкм.

Общее среднее значение шероховатости всех отобранных образцов:

$$\overline{\overline{Ra}} = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n Ra_{ij}.$$

Общая сумма квадратов  $Q$ :

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (Ra_{ij} - \overline{\overline{Ra}})^2.$$

Факторная сумма квадратов  $Q_A$ :

$$Q_A = n \sum_{j=1}^k (\overline{Ra}_j - \overline{\overline{Ra}})^2.$$

Остаточная сумма квадратов  $Q_e$ :

$$Q_e = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (Ra_{ij} - \overline{Ra}_j)^2.$$

На практике величина  $Q$  определяется:

$$Q = Q_A + Q_e.$$

Числа степеней свободы определяются:

$$v = nk - 1; v_A = k - 1; v_e = k(n - 1).$$

Дисперсии рассчитываются:

$$s^2 = \frac{Q}{v}; s_A^2 = \frac{Q_A}{v_A}; s_e^2 = \frac{Q_e}{v_e}.$$

Результаты расчёта приведены в таблице П.5.2.

Таблица П.6.2 – Результаты расчёта

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера
Факторная сумма квадратов $Q_A$	0,2568	2	0,1284	3,94
Остаток $Q_e$	0,6844	21	0,0326	
Общая $Q$	0,9412	23		

Фактически наблюдаемое значение статистики  $F$ :

$$F = \frac{s_A^2}{s_e^2}.$$

По таблице критическое значение  $F$ -критерия Фишера—Снедекора на уровне значимости  $\alpha = 0,01$  при  $k_1 = 2$  и  $k_2 = 21$  степенях свободы  $F_{0,01;2;21} = 5,78$ . Так как  $F < F_{0,01;2;21}$ , то нулевая гипотеза принимается, т.е. на уровне значимости  $\alpha = 0,01$  (с надёжностью 0,99) различие между партиями образцов не оказывает существенное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности.

Аналогичные расчеты выполнили для такого параметра как диаметр обработанной поверхности  $d$ . Результаты измерения диаметра обработанной поверхности вала приведены в табл. П.6.3. Результаты расчета приведены в табл. П.6.4.

Таблица П.6.3 – Результаты измерения диаметра детали

Номер партии	Диаметр обработанной поверхности $d$ , мкм							
	Номер заготовки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	47,91	47,91	47,92	47,91	47,96	47,91	47,94	47,92
2	47,90	47,91	47,91	47,92	47,92	47,91	47,92	47,93
3	47,91	47,91	47,90	47,91	47,92	47,91	47,92	47,92

Таблица П.6.4 – Результаты расчёта

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера
Фактор $Q_A$	0,000433	2	0,000217	1,38
Остаток $Q_e$	0,003300	21	0,000157	
Общая $Q$	0,003733	23		

По таблице критическое значение  $F$ -критерия Фишера—Снедекора на уровне значимости  $\alpha = 0,01$  при  $k_1=2$  и  $k_2=21$  степенях свободы  $F_{0,01;2;21} = 5,78$ . Так как  $F < F_{0,01;2;21}$ , то нулевая гипотеза принимается, т.е. на уровне значимости  $\alpha = 0,01$  (с надёжностью 0,99) различие между партиями образцов не оказывает существенное влияние на величину диаметра обработанной поверхности.

**АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор  
АО «ФРЕСТ»Скляров А.Б.  
2023г.**АКТ****опытно-промышленных испытаний методики коррекции режима  
точения, представленной в диссертационной работе Финагеева П.Р.****Цель испытаний:** оценка эффективности методики коррекции режима  
точения.**Условия испытаний:**

1. Операция: наружное продольное точение вала.
2. Оборудование: токарно-винторезный станок модели 16К20.
3. Режим резания: глубина резания - 1,0 мм; подача - 0,1 мм/об; скорость резания - 200 м/мин.
4. Геометрические параметры резца: передний угол  $\gamma = -6^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 6^\circ$ ; главный угол в плане  $\varphi = 93^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 32^\circ$ ; радиус при вершине резца - 0,4 мм.
5. Материал образцов - Сталь 45.
6. Материал режущей части резца - твердый сплав Т15К6.
7. Диаметр образцов - 80 мм.
8. Длина обработки - 100 мм.
9. Способ установки и крепления образцов - в токарном патроне.
10. Заданные значения контролируемых параметров: среднее арифметическое отклонение профиля - 1,6 мкм; диаметр -  $78h8(-0,046)$  мм.

**Контролируемые параметры:**

1. Диаметр обработанной поверхности, мм;
2. Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм.

**Результаты испытаний**

Была обработана партия образцов в количестве 5 шт. на назначенном режиме обработки. После обработки по результатам измерений контролируемых параметров проведена коррекция режима точения по

## Окончание приложения 7

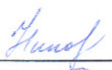

методике с использованием программного обеспечения «Коррекция режима точения», представленных в диссертационной работе Финагеева П.Р. Получены скорректированные значения элементов режима резания (глубина резания - 1,0 мм; подача - 0,125 мм/об; скорость резания - 200 м/мин) и проведена обработка образцов на данном режиме. Получены следующие результаты (см. табл.).

Контролируемые параметры	Вариант обработки	
	Назначенный режим обработки	Скорректированный режим обработки
1. Диаметр обработанной поверхности, мм	77,97	77,98
	77,99	77,99
	77,98	77,99
	77,98	77,97
	77,97	77,98
2. Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм	1,32	1,51
	1,19	1,44
	1,37	1,53
	1,13	1,43
	1,24	1,48

Применение методики коррекции режима точения позволило интенсифицировать режим обработки заготовок, увеличив производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества обработки.

Главный технолог

Начальник МСЦ №70

Николаева Л.В.

Ерасов В.И.