

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

**ЛАРИОНОВА Татьяна Анатольевна**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Направление подготовки 15.06.01 Машиностроение

---

Направленность 15.06.01\_05 Технология машиностроения

---

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:  
Ларионова Татьяна Анатольевна  
Научный руководитель: профессор,  
доктор технических наук,  
Михайлов Станислав Васильевич

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе Машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Любомудров Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент*

Научный руководитель: – *Михайлов Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор*

Рецензент: – *Максаров Вячеслав Викторович, доктор технических наук, профессор, СПбГУ, декан электромеханического факультета, заведующий кафедрой машиностроения*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Титановые сплавы используют преимущественно для изготовления весьма ответственных деталей (дисков, лопаток), которые в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок при достаточно высоком температурном режиме. Увеличение качества обработки деталей из труднообрабатываемых титановых сплавов является актуальной задачей современного машиностроения.

Возникает проблема в связи с созданием деталей из этих сплавов при обработке их резанием. Исследования в области процессов резания жаропрочных титановых сплавов актуальная проблема современного машиностроения, в частности для авиационного и космического двигателестроения.

Наибольшие требования по точности изготовления предъявляются к деталям типа тел вращения: валы, втулки, диски.

Выбор станочного оборудования, инструментов, приспособлений, режимов резания – задача, над которой работают ведущие мировые предприятия. Одновременно необходимо разрабатывать мероприятия по управлению процессом обработки и получению деталей заданной точности.

Проблема обеспечения качества поверхностей деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов является актуальной задачей.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертации: обеспечение качества изготовления деталей типа «тел вращения» из труднообрабатываемых титановых сплавов при токарной обработке за счет определения рациональных режимов резания. Для достижения цели определены задачи исследования:

- разработать методику экспериментальных исследований точения заготовок типа «тел вращения» из титановых сплавов.

- провести экспериментальные исследования, по результатам которых, вывести зависимость температурного удлинения резца, износа инструмента, температуры в зоне резания и параметров шероховатости от режимов резания и геометрии режущего инструмента ( $V$ ,  $s$ ,  $R$ );

- разработать математическую модель оценки погрешности обработки резанием труднообрабатываемых титановых сплавов для определения рациональных режимов резания;

- разработать методику определения рациональных режимов резания при точении деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов, которые обеспечивают требуемую точность;

- определить рациональных режимов резания, обеспечивающих необходимую точность обработки деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов, а также, качество поверхностного слоя на основе математической модели образования погрешностей.

## **Объекты, (предмет) и методы исследования**

Объектом исследования является технологический процесс токарной обработки труднообрабатываемых титановых сплавов; качество изготовления поверхностей деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов.

Предмет исследования: точность диаметральных размеров деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов; составляющие погрешности обработки: температурное удлинение резца, износ инструмента, температура в зоне резания, параметрические характеристики шероховатости.

Методы исследования базируются на научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований, на компьютерном моделировании и экспериментальных исследования на современном оборудовании с использованием цифровых средств измерения.

## **Научная новизна**

Научная новизна заключается:

– в оригинальной зависимости для расчета составляющей погрешности изготовления, связанной с температурными деформациями режущего инструмента; получена формула, учитывающая особенности характера зависимости температурного удлинения режущего инструмента от времени обработки;

– в математической модели образования погрешностей при точении труднообрабатываемых титановых сплавов, включающей в себя эмпирические, регрессионные и аналитические уравнения;

## **Теоретическая и практическая значимость**

Заключается в математической модели образования погрешности при точении труднообрабатываемых титановых сплавов, которая показывает степень влияния режимов резания и геометрии режущего инструмента на параметры процесса резания - относительный износ, температурное удлинение резца, силы резания, параметры шероховатости поверхности и температуру в зоне резания. Модель позволяет заранее рассчитать погрешность обработки.

В методике, разработанной на основе модели, позволяющей определить рациональные режимы резания при обработке различных деталей из титановых сплавов ВТ8, ВТ41, которые обеспечивают требуемую точность.

Практическая значимость состоит в полученных рекомендациях по режимам резания при точении титановых сплавов, которые могут быть внедрены в машиностроительных производствах, изготавливающих ответственные детали из труднообрабатываемых титановых сплавов: авиационное и космическое двигателестроение, судостроение, производство оборудования для горнодобывающей промышленности; в разработанных программах для станков с ЧПУ, реализующих данные рекомендации.

## **Апробация работы и публикации**

Материалы диссертационного исследования представлялись на

следующих научно-практических конференциях: XLII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2013 г.); XLIII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2014 г.); XLIV научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2015 г.); V международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ» (MMESE-2016, гор. Санкт-Петербург); XII Международная научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ (СММТ'17, гор. Санкт-Петербург); XLVII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2018 г.).

Диссертация выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00243, а так же в рамках хоздоговорной научно-исследовательской работы с ОАО «Климов» по теме «Разработка методов и средств ускоренного определения оптимальных режимов резания перспективных титановых сплавов для изготовления деталей двигателя для ПСВ» и научно-исследовательской работы, являющейся утвержденной частью федеральной целевой программы по разделу «Разработка технологии механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов для авиационного двигателестроения на основе определения рациональных режимов резания и выбора эффективного инструмента».

### **Представление научного доклада: основные положения**

1. Математическая модель образования погрешности при точении труднообрабатываемых титановых сплавов, которая показывает степень влияния режимов резания и геометрии режущего инструмента на параметры процесса резания - относительный износ, температурное удлинение резца, силы резания, параметры шероховатости поверхности и температуру в зоне резания. Модель включает в себя эмпирические, регрессионные и аналитические уравнения и позволяет заранее рассчитать погрешность обработки.

2. Методика определения рациональных режимов резания при обработке различных деталей из титановых сплавов BT8, BT41, которые обеспечивают требуемую точность.

Работа соответствует паспорту специальности – 05.02.08 «Технология машиностроения» пунктам: 3 «математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения» и 7 «технологическое обеспечение и повышение качества шероховатости поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, проведен анализ состояния вопроса, поставлены цель и задачи научного исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** представлен обзор существующих методов обеспечения качества обработки поверхностей из титановых сплавов.

По данным литературных источников титановые сплавы, в том числе жаропрочные, нашли широкое применение в авиационном и космическом двигателестроении за счет благоприятных механических свойств, главными из которых являются значительная удельная прочность, жаропрочность, небольшой удельный вес и способность противостоять коррозии. Их используют преимущественно для изготовления весьма ответственных деталей (дисков, лопаток), которые в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок при достаточно высоком температурном режиме.

Обрабатываемость титановых сплавов резанием существенно зависит от их химического и фазового состава, типа и параметров микроструктуры. Основные проблемы при обработке титана — это низкая теплопроводность, большая склонность его к налипанию и задиранию. Токарная обработка титановых сплавов вызывает быстрый износ инструмента, так как практически все металлы и огнеупорны растворяются в титане, в результате чего представляет собой сплав титана и твёрдого материала режущего инструмента.

Достижение необходимой точности накладывает ограничения на выбор оборудования, режущего инструмента и режимов резания. Контроль деталей подобной точности, также является сложной инженерной задачей.

Основные погрешности при обработке титановых сплавов это: температурные деформации инструмента и детали, размерный износ режущего инструмента, упругие деформации технологической системы.

К основным методам обеспечения точности при токарной обработке деталей 5-го и 6-го квалитетов относятся различные системы управляющего контроля как основанные на статистических методах, так и системы активного контроля. На величину шероховатости обработанной поверхности большое влияние оказывает подача и геометрия режущего инструмента.

Рассмотрены существующие математических моделей изменения погрешностей обработки деталей. Множество способов описания погрешности обработки, можно условно разделить на три основные группы:

1-я группа включает различные способы описания суммарной погрешности обработки, основанные на анализе причин, ее формирующих;

2-я группа основана на анализе характера проявления суммарной

погрешности обработки;

3-я группа основана на анализе причин, формирующих суммарную погрешность обработки с одновременным учетом характера ее проявления.

Каждая группа имеет свои характерные математические модели описания развития погрешности обработки.

Анализ существующих моделей образования погрешности обработки диаметров деталей показал:

– независимо от типа модели в ее структуру входит величина случайного отклонения размера детали, доля которой в общей погрешности определяется методом и объемом получения о ней информации;

– ни одна из рассмотренных групп моделей не позволяет одновременно дать качественную и количественную оценку составляющих погрешности, показать их изменение с течением времени и определить взаимовлияние этих составляющих друг на друга, что не позволяет эффективно анализировать процесс обработки деталей и грамотно использовать средства активного контроля и управления качеством продукции.

В соответствии с целью работы проведенный литературный анализ позволил сформулировать задачи планируемых экспериментальных исследований.

**Во второй главе** представлены экспериментальные исследования токарной обработки образцов деталей типа «тел вращений» из титанового сплава по оценке режимов резания. Исследования проводились на образцах

деталей из известного титанового сплава ВТ8 (рисунок 1).

Для проведения экспериментов была разработана и реализована экспериментальная установка, созданная на базе токарного станка модели Knuth Turnado 230/1000 V без применения смазочно-охлаждающей технологической смеси (рисунок 2).

В состав разработанной системы включены следующие технологические компоненты: 1 – деталь; 2 – тепловизор BALTECH TR-01200; 3 – система измерения сил резания; 4 – система измерения температурной деформации резца; 5 – система измерения размерного износа режущего инструмента; 6 – токарный станок Turnado 230/1000V; 7 – блок



вторичной обработки информации; 8 – профилометр marsurf PS1; 9 – монитор.

Рисунок 1 – Исследование механической обработки образца типа «Втулка» из титанового сплава ВТ8

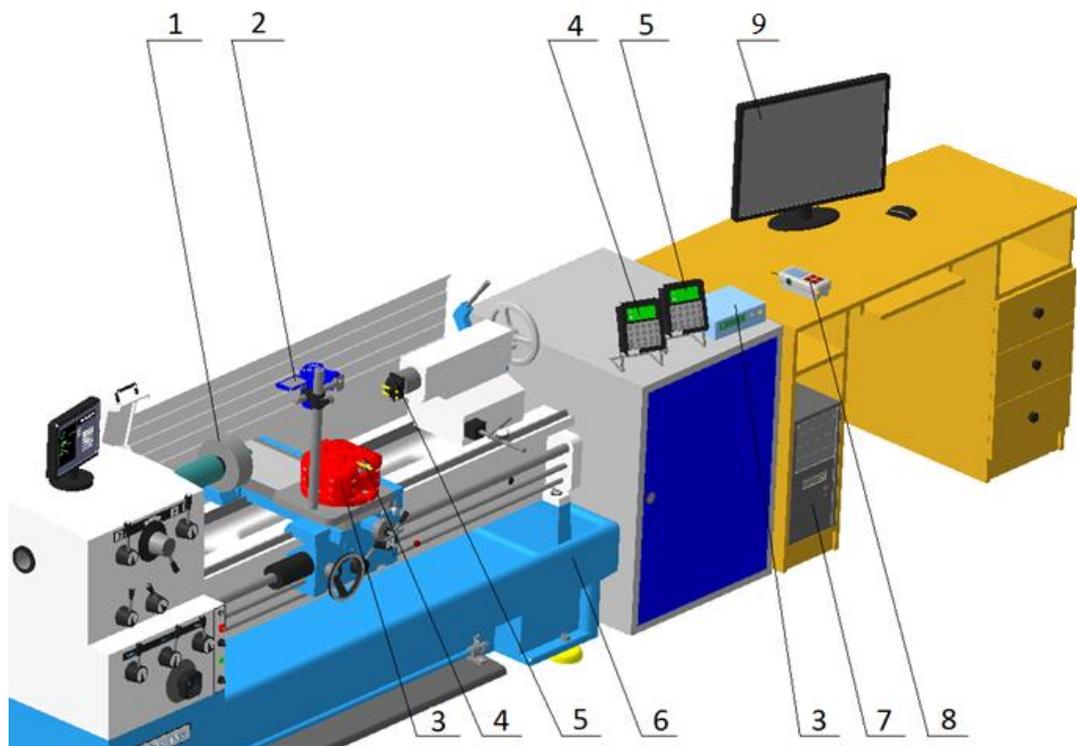


Рисунок 2 – Многопараметрический стенд для обработки образцов деталей

Многопараметрический стенд позволяет во время механической обработки одновременно получать информацию о температурном удлинении и износе режущего инструмента, о температуре в зоне резания, о силах резания и качестве поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Вид системы для измерения температурного удлинения резца и ее расположение на стенде показаны на рисунке 3.

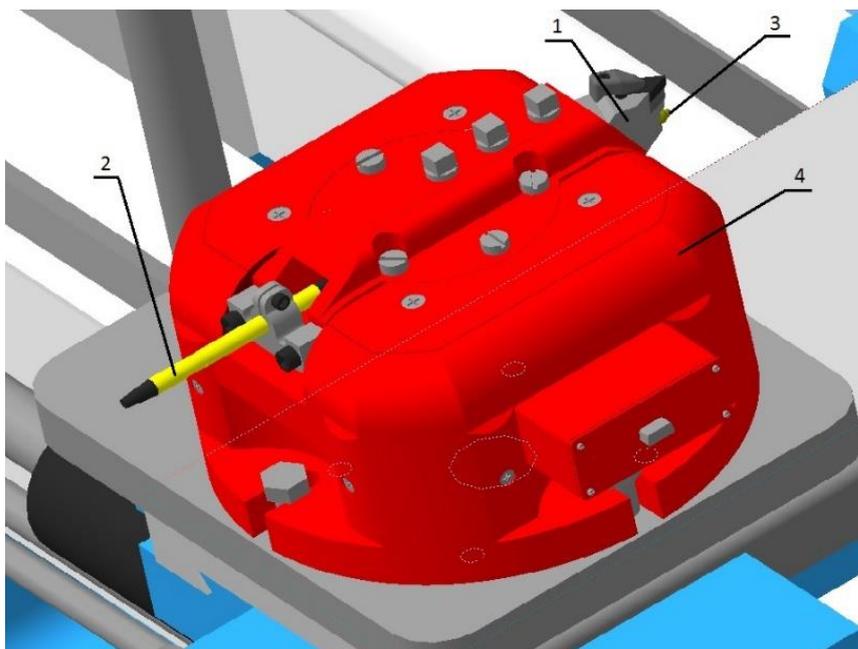


Рисунок 3 – Система измерения температурного удлинения резца

Измерение температурного удлинения резца 1 с помощью одного индуктивного датчика 2, закрепленного внутри динамометра 4 и прилегающего к инваровому стержню 3, который вкручен в державку Sandvik Coromant DDNNN 2525M 1504 с твердосплавной пластиной H13A. Вывод данных происходит на блок – БИН-2И с последующим выводом на компьютер. Измерение происходит в процессе резания, результат выводится с дискретностью в 1 сек.

Система измерения температурного удлинения и размерного износа резца обеспечивает заданную точность измерений  $\pm 0,35$  мкм (не более  $\pm 2$  мкм).

Разработана методика экспериментальных исследований.

Исследования проводились в два этапа:

– однофакторные эксперименты для определения характера зависимостей параметров оптимизации от режимов резания (скорость резания  $V$ , подача  $s$ ) и геометрии режущего инструмента ( $r$  – радиус при вершине резца) и определения их диапазона варьирования. В качестве параметров оптимизации приняты: износ инструмента, его температурное удлинение, качество поверхностного слоя, температура в зоне резания и силы резания.

– проведение многофакторного эксперимента, по результатам которого можно провести регрессионный анализ, для определения степени зависимости параметров оптимизации от режимов резания и геометрии режущего инструмента.

В рамках первого этапа были проведены однофакторные эксперименты и получены следующие зависимости:

– зависимость размерного износа резца  $U$  от пути резания  $L$  при разных скоростях резания, разных радиусах при вершине и разных подачах;

– зависимость температурного удлинения резца  $\xi$  от времени обработки  $\tau$  при разных скоростях резания при точении партии образцов и при непрерывной обработке (рисунок 4), при разных радиусах при вершине и разных подачах (рисунок 5);

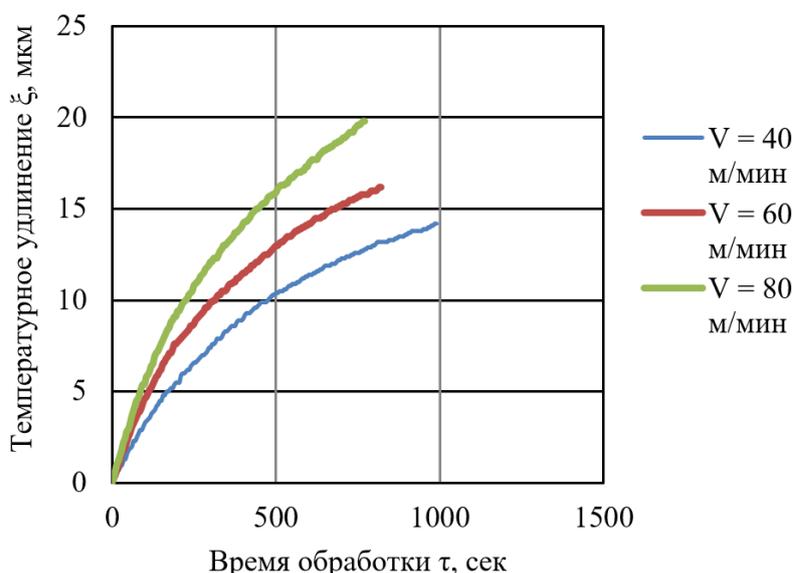


Рисунок 4 – Зависимость температурного удлинения резца от времени обработки при разных скоростях:  $s = 0,082$  мм/об,  $R = 0,4$  мм,  $t = 0,5$  мм

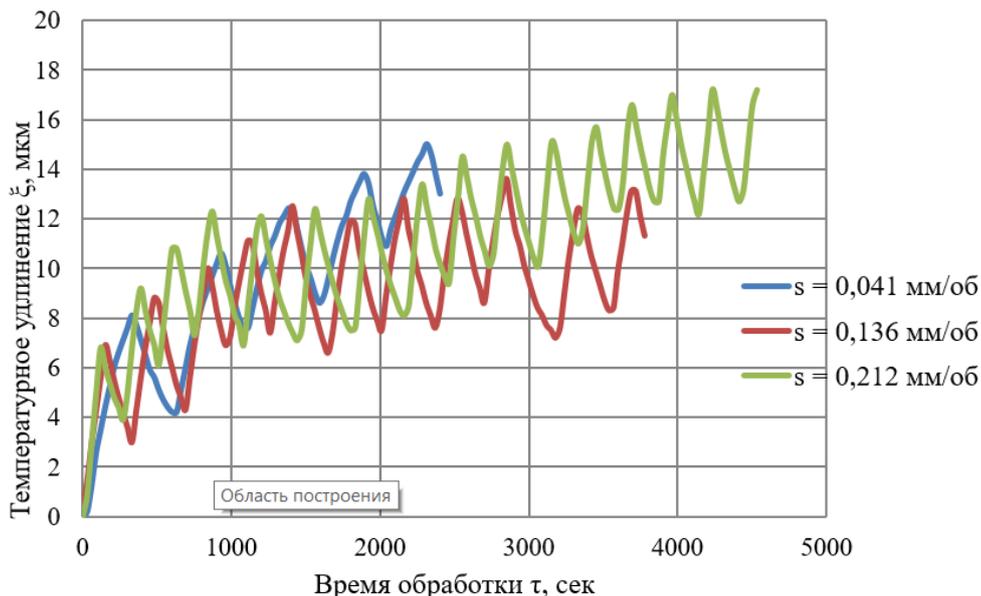


Рисунок 5 – Зависимость температурного удлинения резца от времени обработки при разных подачах (обработка партии заготовок):  $V = 60$  м/мин,  $R = 0,4$  мм,  $t = 0,5$  мм

- зависимость параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  от пути резания  $L$  при разных скоростях, разных радиусах при вершине и разных подачах;
- зависимость сил резания  $P_y$  и  $P_z$  от времени обработки  $\tau$  при разных скоростях, разных радиусах при вершине и разных подачах;
- зависимость температуры в зоне резания  $T$  от времени обработки  $\tau$  при разных скоростях резания, разных радиусах при вершине и разных подачах;
- зависимость относительного износа  $U_o$  от скорости резания  $V$  (рисунок 6), подачи  $s$  и радиуса при вершине резца  $R$ ;
- зависимость температурного удлинения резца  $\xi$  от скорости резания  $V$  (рисунок 7), подачи  $s$  и радиуса при вершине резца  $R$ ;
- зависимость параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  от скорости резания  $V$ , подачи  $s$  и радиуса при вершине резца  $R$  (рисунок 8);

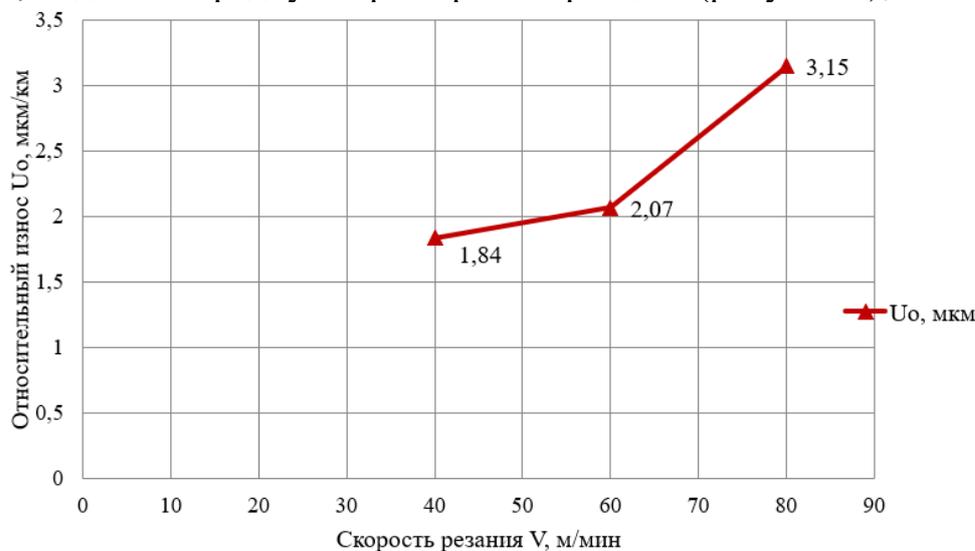


Рисунок 6 – Зависимость относительного износа от скорости резания:  $s = 0,136$  мм/об,  $R = 0,4$  мм,  $t = 0,5$  мм

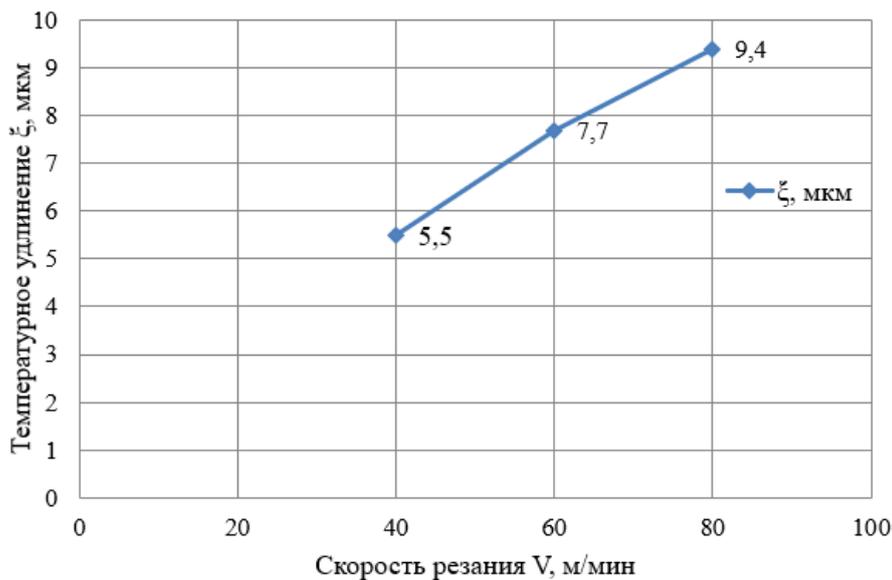


Рисунок 7 –  
Зависимость температурного удлинения резца от скорости резания:  
 $s = 0,082$  мм/об,  
 $R = 0,4$  мм,  
 $t = 0,5$  мм,  
 $\tau = 200$  сек

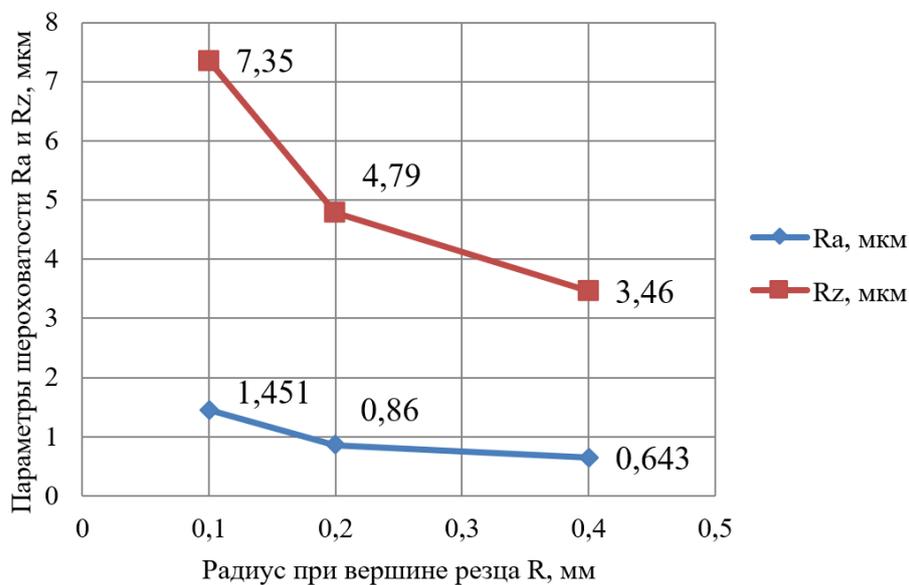


Рисунок 8 –  
Зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от радиуса при вершине резца:  
 $s = 0,062$  мм/об,  
 $V = 60$  м/мин,  
 $t = 0,5$  мм

– зависимость сил резания  $P_y$  и  $P_z$  от скорости резания  $V$ , подачи  $s$  и радиуса при вершине резца  $R$ ;

– зависимость температуры в зоне резания  $T$  от скорости резания  $V$ , подачи  $s$  и радиуса при вершине резца  $R$ .

По результатам однофакторных экспериментов были определены характеры зависимостей параметров оптимизации от режимов резания и геометрии режущего инструмента и сделаны следующие выводы:

– относительный износ инструмента в большей степени зависит от скорости резания и подачи, а от радиуса при вершине резца относительный износ зависит незначительно;

– на температурное удлинение резца большее влияние оказывает скорость резание, а подача и радиус при вершине менее значимы;

– на шероховатость поверхности самое большое влияние оказывает подача; скорость резания и радиус при вершине влияют в меньшей степени.

– на силы резания  $P_y$ ,  $P_z$  больше всего влияет подача, скорость резания

и радиус при вершине резца влияют незначительно;

– с увеличением подачи температура в зоне резания уменьшается, а с увеличением радиуса при вершине и скорости резания температура в зоне резания увеличивается;

– при точении титановых сплавов температурного равновесия за период стойкости инструмента не возникает, и тепловая деформация резца продолжает возрастать линейно с течением времени до самого конца обработки.

На втором этапе экспериментальных исследований был проведен многофакторный эксперимент для дальнейшего определения степени зависимости параметров оптимизации от режимов резания и геометрии режущего инструмента.

**В третьей главе** представлена разработка математической модели образования погрешностей обработки при точении деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов.

Основные составляющие погрешности обработки при точении титановых сплавов:

– погрешности, вызванные тепловыми деформациями инструмента и станка;

– погрешности из-за упругих деформаций технологической системы;

– погрешности, связанные с размерным износом режущего инструмента.

Экспериментальные исследования показали, что износ носит линейный характер и следовательно, погрешность, вызванная износом резца, может быть вычислен по известной формуле профессора А.П. Соколовского:

$$\Delta U = 2u\pi D l / (S), \quad (1)$$

где:  $\Delta U$  – закономерно изменяющаяся погрешность, вызванная износом резца, мкм;  $u$  – относительный размерный износ резца, мкм;  $D$  – диаметр заготовки, мм;  $l$  – длина обработки, мм;  $S$  – подача резца, мм/об.

Для численной оценки относительного размерного износа резца  $u$  при точении новых трудно обрабатываемых сплавов, применяемых в авиационном двигателестроении, необходимо воспользоваться эмпирической формулой, по которой зависимость относительного размерного износа резца от режимов резания при работе конкретным инструментом будет выражаться формулой:

$$u = C_u V^{a_u} S^{b_u} R^{d_u}. \quad (2)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_u$  – коэффициент, зависящий от геометрии и материала инструмента;  $a_u$ ,  $b_u$  и  $d_u$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $R$  соответственно.

Погрешность обработки, зависящая от упругих деформаций технологической системы, можно определить по формуле (3), подставляя в нее соотношение составляющих сил резания получим:

$$\Delta_{упр} = j / (P_Y / P_Z \cdot C_P \cdot S^{0.75}), \quad (3)$$

где:  $j$  – жесткость системы Н/мм<sup>2</sup> (определяется экспериментально для каждой единицы оборудования);  $C_P$  – коэффициент, зависящий от материала детали;  $P_Y$  и  $P_Z$  – составляющие силы резания, Н.

Для расчета систематической составляющей погрешности зависящей от упругих деформаций технологической системы необходимо определить величину составляющих силы резания  $P_Y$  и  $P_Z$ . Их можно рассчитать по эмпирическим формулам:

$$P_Y = C_y V^{a_y} S^{b_y} R^{d_y}, \quad (4)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_y$  – коэффициент, зависящий от геометрии и материала инструмента;  $a_y$ ,  $b_y$  и  $d_y$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $R$  соответственно.

$$P_Z = C_z V^{a_z} S^{b_z} R^{d_z}, \quad (5)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_z$  – коэффициент, зависящий от геометрии и материала инструмента;  $a_z$ ,  $b_z$  и  $d_z$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $R$  соответственно.

Для определения тепловых деформаций резца в процессе течения была выведена формула, учитывающая характер зависимости температурного удлинения резца от времени обработки (рисунок 4). Из графика видно, что стационарный режим за время обработки одной детали не наступает, поэтому классическая формула не отражает изменения температурного удлинения во время обработки образцов деталей из титановых сплавов.

Наиболее точно кривую зависимости теплового удлинения резца от времени обработки описывает следующая эмпирическая формула:

$$\xi = K(\tau + A)(1 - e^{-\alpha\tau}), \quad (7)$$

где:  $\xi$  – температурное удлинение резца в момент времени  $\tau$ ;  $e$  – основание натуральных логарифмов;  $K$  и  $A$  – коэффициенты, зависящие от режимов резания, материала детали, материала и формы резца;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от материала и формы режущего инструмента.

Коэффициенты уравнения (7) могут быть рассчитаны по эмпирическим формулам:

$$A = C_A V^{a_A} S^{b_A} R^{d_A}, \quad (8)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_A$  – коэффициент зависящий от геометрии и материала инструмента;  $a_A$ ,  $b_A$  и  $d_A$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $t$  соответственно.

$$K = C_K V^{a_K} S^{b_K} R^{d_K}, \quad (9)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_K$  – коэффициент зависящий от геометрии и материала инструмента;  $a_K$ ,  $b_K$  и  $d_K$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $t$  соответственно.

$$\alpha = C_\alpha V^{a_\alpha} S^{b_\alpha} R^{d_\alpha}, \quad (10)$$

где:  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $C_y$  – коэффициент, зависящий от геометрии и материала инструмента;  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – показатели степени  $V$ ,  $S$  и  $t$  соответственно.

Степень зависимости параметров шероховатости поверхности  $R_a$ ,  $R_z$  и температуры в зоне резания от режимов резания и геометрии режущего инструмента рассматриваем по аналогичным эмпирическим формулам.

Для определения всех коэффициентов эмпирических уравнений 2, 4, 5, 8,9,10 необходимы данные многофакторного эксперимента в диапазоне рекомендованных режимов резания. После этого рассчитывается погрешность, вызванная износом режущего инструмента, температурным удлинением инструмента и упругими деформациями технологической системы для конкретного технологического процесса.

По результатам многофакторного эксперимента точения титанового сплава ВТ8 представлен расчет всех коэффициентов вышеуказанных эмпирических уравнений. Определены численные значения степеней зависимости износа режущего инструмента, температурного удлинения резца, упругих деформаций технологической системы от режимов резания (скорости резания и подачи) и геометрии режущего инструмента (радиуса при вершине). При расчете использовались программы Mathcad и статистика.

Уравнения принимаю конечный вид (11-19):

$$U_0 = 11,3 \cdot V^{0,11} \cdot S^{0,7} \cdot R^{0,34} \quad (11)$$

$$R_a = 5,35 \cdot V^{0,24} \cdot S^{1,29} \cdot R^{-0,78} \quad (12)$$

$$R_z = 18,5 \cdot V^{0,3} \cdot S^{1,13} \cdot R^{-0,64} \quad (13)$$

$$\alpha = 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot V^{1,22} \cdot S^{0,12} \cdot R^{-0,07} \quad (14)$$

$$K = 48,5 \cdot 10^9 \cdot V^{-5,48} \cdot S^{-2,45} \cdot R^{1,04} \quad (15)$$

$$A = 54 \cdot V^{-0,03} \cdot S^{-0,06} \cdot R^{0,08} \quad (16)$$

$$T = 239 \cdot V^{0,008} \cdot S^{0,03} \cdot R^{0,01} \quad (17)$$

$$P_z = 335 \cdot V^{0,07} \cdot S^{0,58} \cdot R^{0,09} \quad (18)$$

$$P_y = 85,3 \cdot V^{0,34} \cdot S^{0,5} \cdot R^{0,34} \quad (19)$$

Уравнения показывают, в какой степени той или иной фактор влияет на погрешность обработки. Подставив найденные значения в формулы 1, 3, и 7 мы можем рассчитывается погрешность, вызванная износом режущего инструмента, температурным удлинением инструмента и упругими деформациями технологической системы для конкретного технологического процесса.

На основе данной математической модели сформирована методики оценки погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых сплавов:

– По формулам (1), (3), (7) рассчитываются систематические составляющие погрешности обработки и в дальнейшем они суммируются алгебраически.

$$\Delta_{\text{сист.}} = \Delta_u + \Delta_{\text{упр.}} + 2\xi. \quad (20)$$

– рассчитывается максимально возможная случайная погрешность и далее ее составляющие суммируются, как корень из суммы квадратов.

$$\Delta_{\text{сл.}} = \pm \sqrt{\Delta_{\text{инст.}}^2 + \Delta_{\text{сл.упр.}}^2 + \Delta_{\text{сл.тем.}}^2 + \Delta_{\text{сл.изм.}}^2} \quad (21)$$

– Оценивается максимально возможная точность при заданных режимах резания и выбранном инструменте. Проще всего произвести оценку точности технологического процесса с помощью графика, на котором показаны систематические составляющие погрешности обработки, график суммарной систематической погрешности и границы разброса случайной составляющей обработки.

На рисунке 9 изображены систематические составляющие погрешности обработки и тонкими линиями отмечены границы разброса случайной составляющей погрешности обработки.

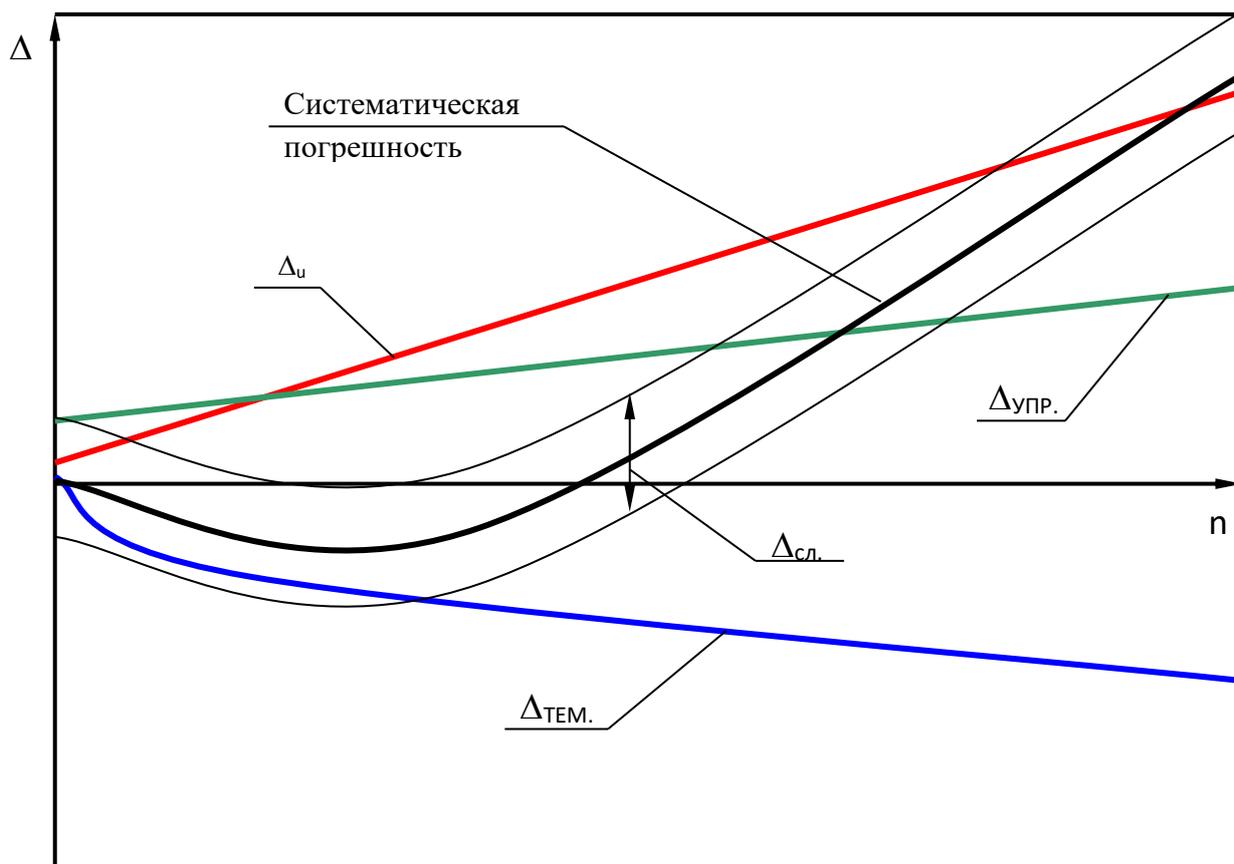


Рисунок 9 – Изменение систематических закономерно изменяющихся погрешностей и суммарной погрешности при изготовлении партии деталей

– После расчета погрешности обработке при заданных режимах резания и выбранном инструменте можно определить, будет ли достигнута необходимая точности изготовления. Если все параметры удовлетворяют

требуемой точности размеров, то можно принять данные режимы обработки и режущий инструмент. Если требуемая точность не удается достигнуть, то необходимо уменьшать численные значения режимов резания до приемлемых значений.

Если за счет изменения режимов резания требуемая точность не удается достигнуть, необходимо вводить мероприятия по управлению точностью в процессе обработки партии рассматриваемых деталей.

В общем виде методика оценки погрешности обработки резанием деталей труднообрабатываемых титановых сплавов приведена в таблицу (таблица 1).

Таблица 1 – Методика оценки погрешности обработки резанием деталей авиационных двигателей из труднообрабатываемых сплавов

Рассчитываемая величина	Вводимые параметры	Формула
$\Delta_{\text{сист}}$ (мкм)	$\Delta_u, \Delta_{\text{УПР.}}, \xi$ (мкм)	$\Delta_{\text{сист.}} = \Delta_u + \Delta_{\text{УПР.}} + 2\xi.$
$\Delta_u$ (мкм)	$D, l$ (мм), $S$ (мм/об), $u$	$\Delta_u = 2\pi D l / (S),$
$u$	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$u = C_u V^{au} S^{bu} R^{du}.$
$\Delta_{\text{УПР.}}$ (мкм)	$j$ (Н/мм <sup>2</sup> ), $P_Y, P_Z$ (Н), $C_P,$ $S$ (мм/об)	$\Delta_{\text{УПР.}} = j / (P_Y / P_Z \cdot C_P \cdot S^{0.75})$
$P_Y$ (Н)	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$P_Y = C_Y V^{ay} S^{by} R^{dy}$
$P_Z$ (Н)	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$P_Z = C_Z V^{az} S^{bz} R^{dz}$
$\xi$ (мкм)	$K, A, \alpha, \tau$ (мин)	$\xi = K(\tau + A)(1 - e^{-\alpha\tau})$
$A$	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$A = C_A V^{aA} S^{bA} R^{dA}$
$K$	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$K = C_K V^{aK} S^{bK} R^{dK}$
$\alpha$	$V$ (м/мин), $S$ (мм/об), $R$ (мм)	$\alpha = C_\alpha V^a S^a R^\alpha$
$\Delta_{\text{сл.}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{инст.}}, \Delta_{\text{сл.упр.}}, \Delta_{\text{сл.тем.}}, \Delta_{\text{сл.изм.}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{сл.}}$ $= \pm \sqrt{\Delta_{\text{инст.}}^2 + \Delta_{\text{сл.упр.}}^2 + \Delta_{\text{сл.тем.}}^2 + \Delta_{\text{сл.изм.}}^2}$
$\Delta_{\text{инст.}}$ (мкм)	$\sigma$ (мкм)	$\Delta_{\text{инст.}} = \pm 3\sigma$
$\Delta_{\text{сл.упр.}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{УПР.макс}}, \Delta_{\text{УПР.мин}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{сл.упр.}} = \Delta_{\text{УПР.макс}} - \Delta_{\text{УПР.мин}}$
$\Delta_{\text{сл.тем.}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{тем.макс}}, \Delta_{\text{тем.мин}}$ (мкм)	$\Delta_{\text{сл.тем.}} = \Delta_{\text{тем.макс}} - \Delta_{\text{тем.мин}}$

В четвертой главе приведены результаты применения разработанной методики с использованием модели образования погрешностей, при обработке жаропрочного титанового сплава ВТ41, который обрабатывается впервые.

Обрабатывалась деталь типа «Диск» из труднообрабатываемого титанового сплава ВТ41 (рисунок 10) на меногопараметрическом станке.



Рисунок 10 – Обработка детали типа «Диск» из материала ВТ41 на многопараметрическом стенде

После обработки экспериментальных данных получены регрессионные уравнения:

$$U_0 = 0,001 \cdot V^{4,02} \cdot S^{3,35} \cdot R^{-0,96} \quad (22)$$

$$Ra = 7,18 \cdot V^{-0,08} \cdot S^{0,99} \cdot R^{-0,59} \quad (23)$$

$$Rz = 8,14 \cdot V^{0,26} \cdot S^{0,9} \cdot R^{-0,58} \quad (24)$$

$$\alpha = 0,0001 \cdot V^{1,22} \cdot S^{0,1} \cdot R^{-0,08} \quad (25)$$

$$K = 589,34 \cdot V^{-20,53} \cdot S^{9,97} \cdot R^{-5,9} \quad (26)$$

$$A = 39,16 \cdot V^{-7,97} \cdot S^{-3,93} \cdot R^{2,29} \quad (27)$$

$$Pz = 115,32 \cdot V^{0,64} \cdot S^{0,48} \cdot R^{-0,02} \quad (28)$$

$$Py = 459,94 \cdot V^{0,11} \cdot S^{0,7} \cdot R^{0,09} \quad (39)$$

Далее для детали авиационного двигателестроения «Втулка уплотнения» из титанового сплава ВТ41 (рисунок 11), по разработанной методике были определены рациональные режимы резания, обеспечивающие требуемую точность изготовления.

По чертежу самая точная диаметральная поверхность детали  $\varnothing 54$  мм должна быть выполнена по 5-му качеству k5 (допуск 0,013 мм), параметр шероховатости Ra1,6 мкм.

Для подтверждения эффективности разработанной методики бала проведена обработка партии образцов деталей типа «втулка» из титанового

сплава ВТ41. Обработка проводилась на универсальном станке Turnado 230/1000V с режимами резания, определенными по методике:  $s - 0,041$  мм/об,  $V - 60$  м/мин,  $t - 0,5$  мм;  $R - 0,4$  мм.

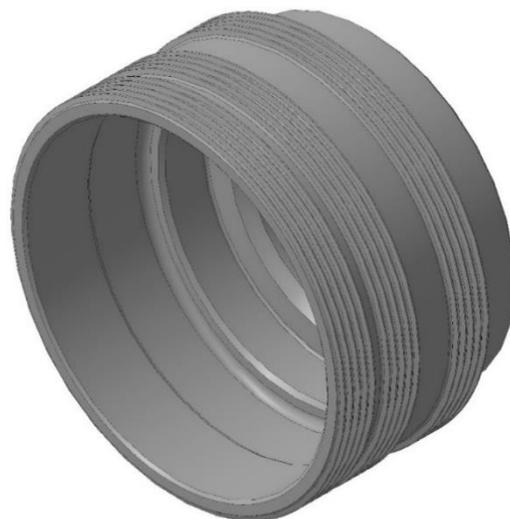


Рисунок 11 – Общий вид детали «Втулка уплотнения»

Контроль размеров деталей производился на контрольно-измерительной машине Contura G2. Среднее отклонение размеров, полученных после обработки партии представлены на графике (рисунок 12).

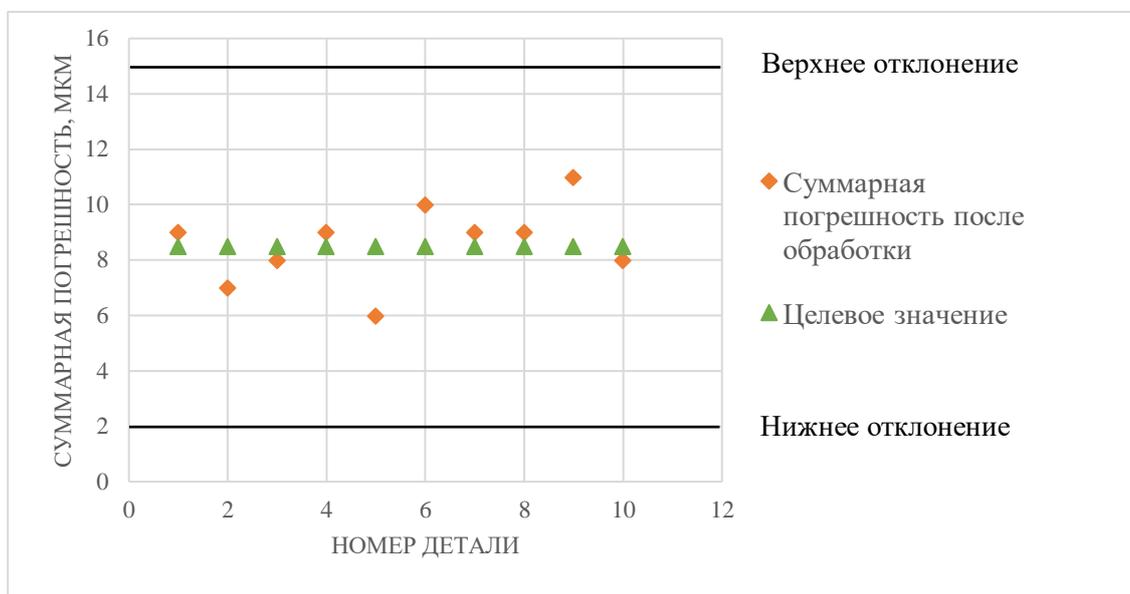


Рисунок 12 – График отклонения размеров в зависимости от номера детали в партии

Отклонение полученной величины суммарной погрешности и качества поверхностного слоя от расчетной по модели при изготовлении партии деталей составляет не более 13-15 %. Все детали в партии соответствуют требуемой точности по 5 качеству.

Рассчитаны показатели возможности технологического процесса  $S_p$  и  $S_{pk}$ :

$S_p = 1,51$  – индекс воспроизводимости, определяемый как допуск, деленный на воспроизводимость процесса. Не учитывает настроенность процесса;

$S_{pk} = 1,49$  – индекс воспроизводимости, который учитывает настроенность процесса. Он связывает разность между средним процесса и ближайшей границей допуска с половиной присущей процессу изменчивости. Этот индекс характеризует возможности технологического процесса в случае, если процесс не центрирован.

Рассчитанные индексы больше единицы, что говорит о качественном технологическом процессе.

Таким образом, можно сказать, что разработанная методика позволяет обеспечить заданную точность и качество поверхностного слоя за счет подобранных по математической модели образования погрешностей режимов резания.

Это подтверждается и Актом о промышленном апробировании результатов кандидатской диссертационной работы на заводе АО «Завод «Двигатель»».

## **Заключение**

В процессе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

1. Для разработки эффективных технологических процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых титановых сплавов был разработан многопараметрический стенд, который позволяет:

– установить связь стойкости режущего инструмента от интенсивности его износа при точении труднообрабатываемых материалов;

– определить критерии допустимого износа режущего инструмента при чистовом точении труднообрабатываемых материалов;

– установить степень влияния сил резания на износ режущего инструмента и вибрации при резании;

– установить корреляцию между параметрами обработки и качеством обработанной поверхности;

– определить основные составляющие, влияющие на точность обработки и способы компенсации погрешностей, возникающих при формообразовании;

– определить механические характеристики, как для материала заготовки, так и материала режущего инструмента при различных температурах нагрева;

– определить зависимости температуры в зоне резания от скорости резания.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Исследования проводились в два этапа:

– проведение серии однофакторных экспериментов для определения характера зависимостей температурного удлинения резца, его размерного износа, упругих деформаций технологической системы, параметров шероховатости и температуры в зоне резания от режимов резания и геометрии режущего инструмента;

– проведение многофакторного эксперимента для определения численной степени влияния вышеназванных зависимостей.

3. Разработана математическая модель образования погрешностей при точении титановых сплавов, учитывающая тепловые деформации и размерный износ резца, упругие деформации технологической системы. Отличительной особенностью данной модели является новый вид зависимости тепловых деформаций режущего инструмента от времени обработки при точении титановых сплавов. Это связано с тем, что при точении титановых сплавов температурного равновесия за период стойкости инструмента не возникает, и тепловая деформация резца продолжает возрастать линейно с течением времени до самого конца обработки. Это обуславливается особенностями титановых сплавов – они обладают низкой теплопроводностью, за счет этого большая часть тепла выделяется в режущий инструмент и интенсивным износом режущего инструмента.

4. Разработана методика определения рациональных режимов резания при точении труднообрабатываемых титановых сплавов, обеспечивающих заданную точность и качество поверхностного слоя.

Методика разработана по математической модели образования погрешностей при токарной обработке титановых сплавов. Она позволяет заранее выбрать режимы резания, обеспечивающие необходимую точность обработки конкретных деталей.

5. Для подтверждения методики определения режимов резания произведена обработка партии заготовок из нового титанового сплава ВТ41 типа «Втулка» с самым точным размером по 5-му качеству на установленных по методике режимах резания. Отклонение полученной величины суммарной погрешности и качества поверхностного слоя от расчетной по модели при изготовлении партии деталей составляет не более 13-15 %. Все детали в партии соответствуют требуемой точности по 5 качеству.

6. На заводе АО «Завод «Двигатель» была апробирована методика определения рациональных режимов резания при точении титановых труднообрабатываемых сплавов на основе модели образования погрешности в соответствии с представленными рекомендациями.

Сравнительные испытания при токарной обработке заготовок из титановых сплавов показали:

- повышение точности при обработке деталей из материалов ВК6, ВК8 на 20-40 % на этапах чистового и тонкого точения по сравнению с токарной обработкой таким же инструментом и на том же оборудовании без предварительного расчета погрешности и коррекции режимов резания.

- снижение значений шероховатость, и повышение параметров точности поверхностного слоя детали при точении с применением предложенной

методики определения рациональных режимов резания.

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать вывод, что применение методики определения рациональных режимов резания при точении титановых труднообрабатываемых сплавов на основе модели образования погрешности обеспечивает заданные показатели шероховатости изделия и точности формы с увеличением точности диаметральных размеров на 1-2 квалитета.

## **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

### **Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

1. Ларионова Т.А. Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Радкевич М.М. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов - Научно-Технические Ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Выпуск №2 (195) / 2014. 194-201 с.

2. Ларионова Т.А. Хрусталева И.Н., Романов П.И., Любомудров С.А., Толстолес А.А. Повышение эффективности технологической подготовки производства на судоремонтных предприятиях - Научно-Технические Ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Выпуск №3 / 2019.

3. Ларионова Т.А. Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Толстолес А.А., Маслаков А.П. Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования // Записки Горного института. 2019.

### **Публикации в других изданиях**

1. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л. Определение рациональных режимов резания перспективных труднообрабатываемых титановых сплавов - Неделя науки СПбГПУ : материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч.1.-СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 226-228 с.

2. Ларионова Т.А., Макарова Т.А. Обеспечение качества изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов в авиационном двигателестроении за счет рационального подбора оборудования - Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. СПб.: Изд – во Политех. ун – та. 2015. С. 285-287

3. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Определение рациональных режимов резания перспективных титановых сплавов на основе математической модели - Неделя науки СПбПУ Материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. М.С. Кокорин (отв. ред.). СПб.: Изд – во Политех. ун – та. 2015. С. 223-225.

4. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Исследование процесса точения титанового сплава ВТ8 - В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научного

форума с международным участием. Лучшие доклады. Ответственные редакторы: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. 2016. С. 70-74.

5. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Методы обеспечения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности на операциях чистового точения - Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5.

6. Ларионова Т.А., Любомудров С.А., Романов П.И. Ускоренная методика определения рациональных режимов резания - Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2017): Сборник трудов международной научно – технической конференции. СПб.: Изд – во Политех. ун – та. 2017. 214-222 с.

7. Ларионова Т.А., Любомудров С.А. Алгоритмы обеспечения точности размеров деталей при точении. Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 290-292 с.

Аспирант \_\_\_\_\_ Ларионова Татьяна Анатольевна

(подпись)