

На правах рукописи



**Черных Лариса Георгиевна**

**Технологическое обеспечение и повышение качества  
поверхности тонкостенных цилиндров при тонком точении**

2.5.6.-Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт Петербург

2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Радкевич Михаил Михайлович**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Гузеев Виктор Иванович**,  
заведующий кафедрой «Технологии автоматизированного машиностроения», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск)

кандидат технических наук, доцент, **Тарасов Станислав Борисович**,  
генеральный директор ООО ИМЦ «Микро» (г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «17» октября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.2.5.6.26,  
кандидат технических наук



Хрусталева  
Ирина Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования** обусловлена эффективностью применения в различных областях промышленности тонкостенных цилиндров с уникальными требованиями к качеству обработанных поверхностей. Например, требование к обеспечению хороших адгезионных свойств, малого трения и износа, отражающей способности, малой шероховатости и волнистости и др.

Выполнение таких требований традиционными методами абразивно-алмазной доводочной обработки чрезвычайно трудная, а порой и невозможная задача.

При обработке деталей из алюминиевых сплавов требуется многооперационная обработка, состоящая в наружном точении, шлифовании и полировке.

Анализ существующих подходов к обработке тонкостенных цилиндров, позволил выявить возрастающую потребность в технологиях, повышающих эффективность и качество процесса обработки тонким точением тонкостенных цилиндров.

Необходимость разрешения данного противоречия определила **актуальность** проведения научного исследования по повышению качества поверхности тонкостенных деталей при тонком точении.

**Целью работы является** обеспечение первичного профиля текстуры поверхности тонкостенных цилиндров методом тонкого точения, с использованием математической модели.

Таким образом, диссертационное исследование направлено на получение теоретических и экспериментальных результатов оценки первичного профиля текстуры обработанной поверхности, режимов резания, макро- и микрогеометрии режущего инструмента, упруго-пластического деформирования поверхностного слоя детали методом тонкого точения.

Для реализации поставленной цели была определена **задача** научного исследования, состоящая в разработке математической модели и методике расчета параметров первичного профиля (шероховатости, волнистости) обработанной поверхности детали.

Для решения поставленной задачи необходимо:

1. Основываясь на современных представлениях о механизме и особенностях процесса тонкого точения, обосновать, разработать и экспериментально подтвердить модель количественной оценки параметров профиля текстуры поверхности при обработке тонкостенных цилиндров, с учетом вынужденных колебаний в технологической системе, макро- и микрогеометрии режущего инструмента и режимов резания.

2. Разработать методику расчета параметров первичного профиля (шероховатости, волнистости) текстуры поверхности при обработке тонкостенных цилиндров.

3. Экспериментально подтвердить адекватность разработанной модели, позволяющей прогнозировать параметры первичного профиля текстуры поверхности детали при изготовлении тонкостенных цилиндров.

4. Установить область рациональных режимов обработки тонкостенных цилиндров, в зависимости от материала, толщины стенки и длины детали.

**Научная новизна:**

1. Впервые теоретически получена, обоснована и экспериментально подтверждена математическая модель расчета параметров первичного профиля (шероховатости, волнистости) текстуры поверхности при обработке тонкостенных деталей при тонком точении с учетом обрабатываемого материала, режимов резания, толщины стенки детали.

2. Разработана методика расчета параметров первичного профиля текстуры поверхности (соответствует п. 7 паспорта специальности).

**Объектом исследования является** технологический процесс тонкого точения тонкостенных цилиндров.

**Предметом исследования являются** параметры первичного профиля текстуры поверхности.

**Теоретическая значимость работы состоит в разработке:**

1. Математической модели формирования первичного профиля текстуры поверхности при тонком точении тонкостенных цилиндров.

2. Методики расчета параметров первичного профиля текстуры поверхности (шероховатости, волнистости), в зависимости от формы профилирующего лезвия режущего инструмента, режимов резания и вынужденных гармонических колебаний в технологической системе при тонком точении тонкостенных цилиндров.

3. Методики расчета увеличения высотных параметров шероховатости от упругой и пластической деформации в зоне контакта обрабатываемой поверхности и лезвия режущего инструмента, при тонком точении.

**Практическая значимость работы заключается:**

1. Доказана возможность и технологическая эффективность обеспечения шероховатости поверхности деталей из алюминиевых сплавов в пределах  $Ra\ 0,1...0,01$  мкм путем тонкого точения инструментами из натуральных алмазов.

2. Разработаны практические рекомендации по точению тонкостенных цилиндров, позволяющие подобрать режущий инструмент, с заданными геометрическими пара-

метрами лезвия, назначить режимы обработки, а также, допустимых вынужденных гармонических колебаний в технологической системе при точении алюминиевого сплава Д16Т и 12Х18Н10Т.

3. Разработана и внедрена на ООО ИМЦ «МИКРО» технология тонкого точения тонкостенных цилиндров из материала 12Х18Н10Т «корпусов» индуктивных датчиков (М-030.101, М-026.001, М-200.001), обеспечивающая гарантированное получение параметра шероховатости поверхности  $Ra \leq 0,2$  и высотного параметра волнистости  $Wt \leq 5$  с повышением производительности в 3 раза, по сравнению с заводской технологией.

4. Разработана и внедрена на ООО «МИКРОТЕХ» технология тонкого точения тонкостенных цилиндров из алюминиевого сплава Д16Т обеспечивающая  $Ra = 0,1...0,05$  мкм с повышением производительности в 6 раз по сравнению с заводской технологией.

#### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, планирования эксперимента, корреляционного и статистического анализа. При экспериментальном исследовании использовался профилографический и профилометрический метод измерения параметров текстуры поверхности и оптическая микроскопия геометрии режущего инструмента.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием пакетов *MATLAB*.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимость влияния режимов резания, макро- и микрогеометрии на параметры первичного профиля текстуры поверхности.

2. Методика расчета параметров первичного профиля текстуры поверхности (шероховатости, волнистости), в зависимости от формы профилирующего лезвия режущего инструмента, режимов резания и вынужденных гармонических колебаниях в технологической системе при тонком точении тонкостенных цилиндров

3. Методика расчета увеличения высотных параметров шероховатости от упругой и пластической деформации в зоне контакта обрабатываемой поверхности и лезвия режущего инструмента при тонком точении.

4. Результаты теоретико-экспериментальных исследований оценки первичного профиля текстуры поверхности при обработке тонкостенных цилиндров методом тонкого точения.

5. Практические рекомендации по точению тонкостенных цилиндров, позволяющие подобрать режущий инструмент, с заданными геометрическими параметрами лезвия,

назначить режимы обработки, а также, допустимых вынужденных гармонических колебаний в технологической системе при точении алюминиевого сплава Д16Т и 12Х18Н10Т.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность и обоснованность научных результатов работы обеспечены использованием апробированных экспериментальных методик, с использованием поверенной измерительной техники, математически строгой обработкой полученных экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов и соответствием полученных закономерностей их теоретическому обоснованию. Все результаты и выводы не противоречат современным научным представлениям, опубликованы в печатных рецензируемых изданиях.

Результаты работы автора были представлены на конференциях: Международная научно-техническая конференция, посвященная 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой «Инновационные технологии в машиностроении», Новополоцк, 18-19 апреля 2023 г. , Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении», Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022г., научная конференция «Машиностроение: новые концепции и технологии» 23–24 октября 2019 года г. Красноярск, научная конференция с международным участием «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы», 27–28 октября 2017 года г. Рубцовск, Научно-практическая конференция «Метрология поверхности» 23-24 апреля 2019 г. Санкт-Петербург.

Разработанная методика расчета параметров первичного профиля текстуры обработанной поверхности при тонком точении тонкостенных цилиндров была применена при производстве корпусов индуктивных датчиков на ООО ИМЦ «Микро», а также при производстве тонкостенных цилиндров из сплава Д16Т на ООО «Микротех».

**Работа соответствует паспорту специальности –2.5.6. Технология машиностроения, пунктам: 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».**

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы. Основные материалы изложены на 161 страницах машинописного текста, в том числе содержат 6 таблиц, 58 рисунков, 112 библиографических наименования.

**Во введении** определено место, занимаемое финишными методами обработки в достижении требуемой точности и качества обработанных поверхностей. Обоснована актуальность темы. определены цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ нормирования и технологического обеспечения параметров текстуры поверхности. Рассмотрены вопросы связанные с актуальностью применения комплексов параметров текстуры поверхностного слоя и определено их влияние на контактное взаимодействие поверхностей. Проведен анализ методов и средств достижения заданных параметров текстуры поверхности. Рассмотрены модели, описывающих процесс формирования текстуры поверхности при точении и особенности тонкого точения. По результатам анализа сформулированы следующие выводы:

1. Тонкое точение с применением современного инструмента является наиболее производительным способом обработки и при определенных условиях может заменить операцию шлифования, а в отдельных случаях и полирования. Рельеф обработанной поверхности при тонком точении получается более сглаженным, отсутствует разрыхляющее воздействие абразивного материала, местное шаржирование поверхности и «скалистый» рельеф, также отсутствуют значительные внутренние напряжения, образующиеся при обработке методами поверхностного пластического деформирования.

2. Результаты анализа известных данных по тонкому точению показывают, что есть потенциальные возможности улучшения этого процесса.

3. Для реализации операций тонкого точения необходимо использовать специально подготовленное для этих целей оборудование. Требование высокой жесткости быстротходности и виброустойчивости оборудования и всей системы станок-приспособление-инструмент-деталь обусловлено не только тем, что изготовленные детали должны иметь высокую точность и требуемую текстуру поверхности, но и тем, что при тонком точении, как правило, используют инструмент из СТМ и твердых сплавов, а его стойкость существенно зависит от упомянутых характеристик станка.

4. Для операций тонкого точения используют инструменты из минералокерамики, эльбора, синтетического и природного алмаза, однако, четко выбрать марку и геометрию инструмента для каждого конкретного случая по имеющимся данным затруднительно – нужны исследования.

5. Основные требования к тонкому точению – получать текстуру поверхности с заданными свойствами и параметрами первичного профиля, профиля шероховатости и волнистости заданные на чертеже.

6. Существующие модели, описывающие формирование шероховатости поверхности можно разделить на три группы:

- теоретические модели, не зависящие от технологических факторов, которые мало пригодны для исследования влияния их на параметры текстуры обработанной поверхности;
- теоретические модели, зависящие от небольшого числа технологических факторов, которые в некоторых случаях могут быть использованы для исследования влияния их на параметры текстуры поверхностей;
- эмпирические модели, зависящие от всех технологических факторов, которые пригодны для широких исследований влияния их на параметры текстуры поверхности и технологическое управление текстурой. Однако, для определения параметров эмпирических моделей, необходимо проведение большого объема экспериментальных работ.

Следовательно, нужна обобщающая модель, которая учитывает те факторы, которые становятся важнейшими при получении текстуры поверхности, заданной на чертеже.

7. Геометрия инструмента является определяющей при формировании профиля шероховатости в пределах  $Ra=3,2\dots 0,4$ , но неизвестно каков вклад геометрии в диапазоне  $Ra=0,1\dots 0,01$  мкм.

8. Большинство формул для теоретического расчета профиля шероховатости поверхности сложны для практического применения и потому для производственного применения обычно используют уравнения, полученные при помощи экспериментальных исследований.

9. Вибрации также влияют на получаемые параметры текстуры поверхности. Изменения амплитуды  $A$  и частоты  $f$  приводит к изменению профиля волнистости и шероховатости, но их трудно учесть, т.к. в литературе нет данных, чтобы рассчитать первичный профиль, профили волнистости и шероховатость с учетом вынужденных гармонических колебаний инструмента и обрабатываемой поверхности.

10. Из-за возникновения вибраций особые сложности возникают при обработке тонкостенных цилиндров и достижения заданных параметров текстуры поверхности.

11. Влияние упругой и пластической деформации в количественном выражении в литературе отсутствуют для операций тонкого точения.

**Во второй главе** проведен теоретический анализ процесса формирования текстуры поверхности при тонком точении. Рассмотрена систематическая составляющая первичного профиля текстуры поверхности связанная с постоянно действующими факторами: подачей, геометрией инструмента, амплитудой и частотой вынужденных гармонических колебаний инструмента и обрабатываемой поверхности.



В данном разделе сделана попытка ввести в методику расчета первичного профиля текстуры поверхности как можно большее количество факторов, рассматриваемых как детерминированные, тогда случайная составляющая первичного профиля будет сведена к минимуму и становится возможной оптимизация и управление процессом тонкого точения по критерию достижения заданных параметров текстуры поверхности. Таким образом, для описания первичного профиля текстуры поверхности, полученной при тонком точении необходимо использовать композиционную модель следующего вида (1):

$$P(x) = Z(x) + h(x) \quad (1)$$

где  $P(x)$  – первичный профиль текстуры поверхности;

$Z(x)$  – детерминированная периодическая функция, описывающая систематическую составляющую профиля и зависящую от постоянно действующих факторов, представляющих собой физическую основу технологического процесса обработки;

$h(x)$  - случайная функция, описывающая случайную составляющую профиля и зависящая от управляемых и неуправляемых технологических факторов, условий обработки, свойств обрабатываемого материала и от других факторов, влияющих на первичный профиль поверхности

Анализ влияния различных факторов на формирование первичного профиля текстуры поверхности при тонком точении показал, что вид систематической составляющей профиля зависит от режимов резания, особенно подачи, геометрии профилирующего лезвия режущего инструмента, амплитуды и частоты вынужденных гармонических колебаний режущего инструмента и обрабатываемой поверхности, микрогеометрии режущего лезвия и величины упругопластической деформации металла в зоне резания. Таким образом систематическая составляющая будет рассчитываться по формуле (2):

$$Z(x) = z_{\phi}(x) + z_k(x) + z_{ш} + h_{пл} + h_{упр} \quad (2)$$

где  $z_{\phi}(x)$  – функция, зависящая от формы лезвия режущего инструмента и кинематики процесса резания;  $z_k(x)$  – функция, зависящая от вынужденных гармонических колебаний лезвия режущего инструмента и обрабатываемой поверхности;  $z_{ш}$  – функция, зависящая от шероховатости режущего лезвия;  $h_{пл}$  – функция, показывающая высоту наплывов на обработанной поверхности, вызванных пластической деформацией материала в зоне резания;  $h_{упр}$  – функция, показывающая увеличение шероховатости за счет упругого восстановления поверхности.

При операциях тонкого точения наиболее часто используется инструмент, у которого в образовании первичного профиля текстуры поверхности участвует только вершина резца с радиусом  $r$  (рисунок 1) или зачистной кромкой  $l$  (рисунок 2) на вершине режущего лезвия, и подача  $S$ .



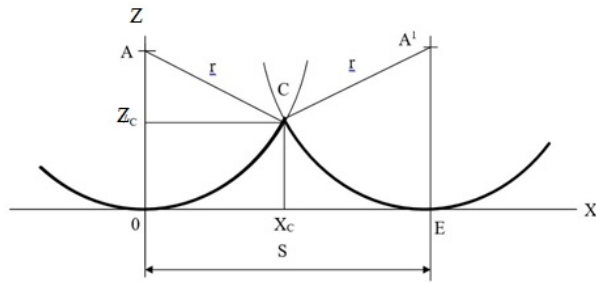


Рисунок 2 - Систематическая составляющая первичного профиля при участии вершины резца с радиусом  $r$  и подачей  $S$

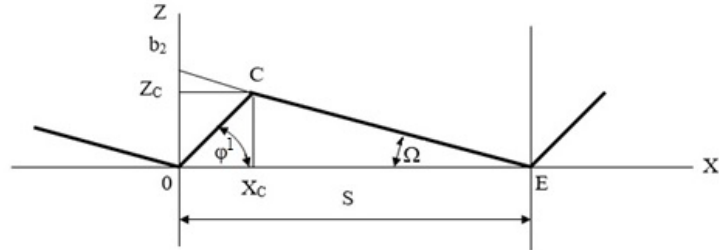


Рисунок 2.3- Систематическая составляющая первичного профиля при участии вершины резца с зачистной кромкой

Далее, были рассмотрены случаи формирования систематической составляющей первичного профиля текстуры поверхности с учетом вынужденных колебаний:

- Случай, когда в образовании систематической составляющей профиля участвует вершина резца с радиусом  $r$ , главная и вспомогательная режущие кромки с углами  $\varphi$  и  $\varphi_1$  и подача  $S$  (рисунок 4), при участии вынужденных колебаний.
- Случай, когда в образовании систематической составляющей профиля участвует вершина резца с радиусом  $r$  (рисунок 5) и подача  $S$ , при участии вынужденных колебаний.
- Случай, когда в образовании систематической составляющей профиля участвует вершина резца с зачистной кромкой  $l$ , при участии вынужденных колебаний (рисунок 6).

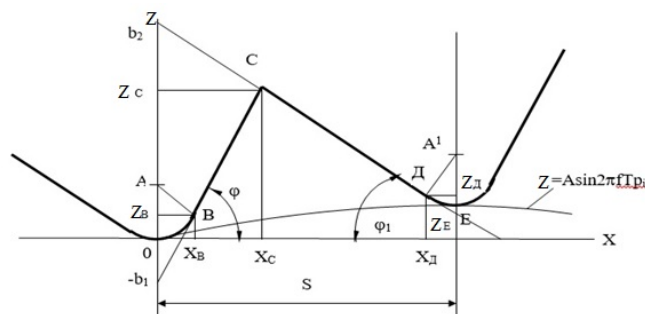


Рисунок 4- Систематическая составляющая первичного профиля при участии вершины резца с радиусом  $r$ , главной и вспомогательной режущей кромкой, с углами  $\varphi$  и  $\varphi_1$  и подачей  $S$ , с учетом вынужденных колебаний

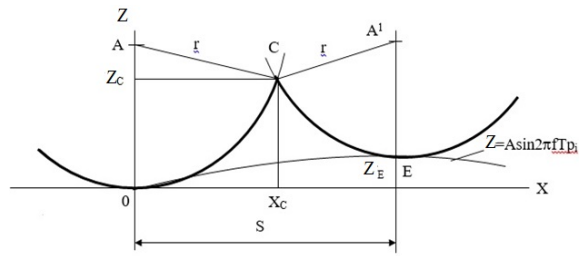


Рисунок 5 - Систематическая составляющая первичного профиля обработанной поверхности с учетом вынужденных колебаний при участии только вершины резца с радиусом  $r$  и подачей  $S$

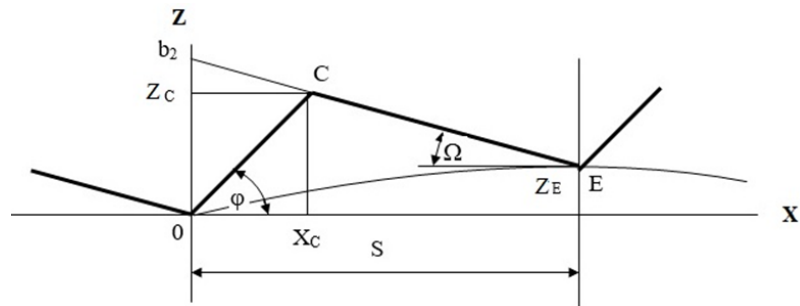


Рисунок 6- Систематическая составляющая первичного профиля, с учетом вынужденных колебаний, при участии вершины резца с зачистной кромкой

Уравнения систематической составляющей с координатами опорных точек, в зависимости от формы лезвия режущего инструмента

Форма лезвия режущего инструмента	Уравнения систематической составляющей	Координаты опорных точек
Лезвие с радиусом, передней и задней поверхностью	$Z = r - \sqrt{r^2 - X^2} \quad 0 \leq X \leq X_B$ $Z = X \operatorname{tg} \varphi + r - \frac{r}{\cos \varphi} \quad X_B \leq X \leq X_C$ $Z = r - \sqrt{r^2 - (X - S)^2} \quad X_D \leq X \leq X_E$ $Z = (S - X) \operatorname{tg} \varphi_1 + r - \frac{r}{\cos \varphi_1} \quad X_C \leq X \leq X_D$	$X_B = r \sin \varphi; Z_B = r (1 - \cos \varphi)$ $X_D = S - r \sin \varphi_1; Z_D = r (1 - \cos \varphi_1); X_E = S; Z_E = 0$ $X_C = \left( S \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{r}{\cos \varphi_1} + \frac{r}{\cos \varphi} \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}$ $Z_C = \left( S \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{r}{\cos \varphi_1} + \frac{r}{\cos \varphi} \right) \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} + r - \frac{r}{\cos \varphi}$
Лезвие с радиусом	$Z = r - \sqrt{r^2 - X^2} \quad 0 \leq X \leq X_C$ $Z = r - \sqrt{r^2 - (X - S)^2} \quad X_C \leq X \leq X_E$	$Z_C = r - \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2}; \quad X_C = \frac{S}{2}; \quad X_E = S; \quad Z_E = 0$
Лезвие с зачистной кромкой	$Z = X \operatorname{tg} \varphi^1 \quad 0 \leq X \leq X_C$ $Z = -X \operatorname{tg} \Omega + b_2 \quad 0 \leq X \leq X_C$	$X_C = \frac{S \operatorname{tg} \Omega}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \Omega}; \quad Z_C = \frac{S \operatorname{tg} \Omega \operatorname{tg} \varphi^1}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \Omega}$
*где $r$ - радиус при вершине инструмента; $f$ - частота вынужденных гармонических колебаний; $T$ - период оборота заготовки; $S$ - подача; $P_i$ - номер оборота заготовки; $\varphi$ - угол реза в плане; $\Omega$ - угол определяющий погрешность установки реза		

**Уравнения систематической составляющей с координатами опорных точек, в зависимости от формы лезвия режущего инструмента, с учетом вынужденных колебаний**

Форма лезвия режущего инструмента	Уравнения систематической составляющей	Координаты опорных точек
Лезвие с радиусом, передней и задней поверхностью	$Z = r + A \sin 2\pi f T p_i - \sqrt{r^2 - x^2}$ $0 \leq X \leq X_B$ $Z = X_B \operatorname{tg} \varphi + r - \frac{r}{\cos \varphi} + A \sin 2\pi f T p_i$ $X_B \leq X \leq X_C$ $Z = (S - X) \operatorname{tg} \varphi_1 + r - \frac{r}{\cos \varphi_1} + A \sin 2\pi f T p_{i+1}$ $X_C \leq X \leq X_D$ $Z = r + A \sin 2\pi f T p_{i+1} - \sqrt{r^2 - (X - S)^2}$ $X_D \leq X \leq X_E$	$X_B = r \sin \varphi$ $Z_B = r(1 - \cos \varphi) + A \sin 2\pi f T p_i$ $X_C = \left( \operatorname{Stg} \varphi_1 - \frac{r}{\cos \varphi_1} + \frac{r}{\cos \varphi} - A \sin 2\pi f T p_i + A \sin 2\pi f T p_{i+1} \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}$ $Z_C = \left( \operatorname{Stg} \varphi_1 - \frac{r}{\cos \varphi_1} + \frac{r}{\cos \varphi} - A \sin 2\pi f T p_i + A \sin 2\pi f T p_{i+1} \right) \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} + r - \frac{r}{\cos \varphi} + A \sin 2\pi f T p_i$ $X_D = S - r \sin \varphi$ $Z_D = r(1 - \cos \varphi_1) + A \sin 2\pi f T p_{i+1}$ $X_{Ei} = S p_i; Z_{Ei} = A \sin 2\pi f T p_{i+1}$
Лезвие с радиусом	$X^2 = [Z - (r + A \sin 2\pi f T p_i)]^2 = r^2$ $0 \leq X \leq X_B$ $(X - S)^2 + [Z - (r + A \sin 2\pi f T p_{i+1})]^2 = r^2$ $X_C \leq X \leq X_E$	$Z_C = r - \frac{A}{2} (\sin 2\pi f T p_{i+1} + \sin 2\pi f T p_i) - \sqrt{\frac{r^2 S^2}{S^2 + A^2 (\sin 2\pi f T p_{i-1} - \sin 2\pi f T p_i)^2} - \frac{S^2}{4}}$ $X_C = \frac{S^2 + A (\sin 2\pi f T p_{i+1} + \sin 2\pi f T p_i)}{2S^2} + \frac{1}{S^2} \sqrt{\frac{r^2 S^2}{S^2 + A^2 (\sin 2\pi f T p_{i-1} - \sin 2\pi f T p_i)^2} - \frac{S^2}{4}}$ $X_{Ei} = S p_i$ $Z_{Ei} = A \sin 2\pi f T p_i$

Лезвие с зачист- ной кромкой	$Z = Xtg\varphi + A\sin 2\pi f T p_i$ $0 \leq X \leq X_C$ $Z = -Xtg\Omega + A\sin 2\pi f T p_{i+1} + Stg\Omega$ $X_C \leq X \leq X_E$	$X_C = \frac{Stg\Omega}{tg\varphi + tg\Omega} + (\sin 2\pi f T p_{i+1} - \sin 2\pi f T p_i) \frac{A}{tg\varphi + tg\Omega}$ $Z_C = \frac{Stg\Omega tg\varphi}{tg\varphi + tg\Omega} + (tg\varphi \sin 2\pi f T p_{i+1} - tg\Omega \sin 2\pi f T p_i) \frac{A}{tg\varphi + tg\Omega}$ $X_{Ei} = S p_i$ $Z_{Ei} = A \sin 2\pi f T p_i$
<p>*где <math>r</math> - радиус при вершине инструмента; <math>A</math> - амплитуда вынужденных гармонических колебаний; <math>f</math> - частота вынужденных гармонических колебаний; <math>T</math> - период оборота заготовки; <math>S</math> - подача; <math>P_i</math> - номер оборота заготовки; <math>\varphi</math> - угол резца в плане ; <math>\Omega</math> - угол определяющий погрешность установки резца.</p>		

При рассмотрении влияния упругой деформации на увеличение высотных параметров текстуры поверхности необходимо определить разность, связанную с неодинаковой величиной упругого восстановления выступа и впадины элемента первичного профиля текстуры поверхности.

Эта величина определяется уравнением (3):

$$H_{\text{упр}} = \frac{\sqrt{4r^2 - S^2} - \sqrt{4(r - H_{\text{уд}})^2 - S^2}}{2} - H_{\text{уд}} \quad (3)$$

где  $H_{\text{уд}}$  – величина упругого деформирования (восстановления) впадины элемента первичного профиля текстуры поверхности.

При упругом восстановлении элемента первичного профиля текстуры поверхности, образованного инструментом с зачистной кромкой на режущем лезвии, увеличение высотных параметров текстуры поверхности определяется величиной упругой деформации и вычисляется по формуле (4):

$$H_{\text{уд}} = \rho (1 - \cos Q) \quad (4)$$

где  $\rho$  – радиус скругления режущего лезвия;  $Q$  – угол скалывания.

Процесс тонкого точения в большинстве случаев протекает в условиях (высокая скорость резания, инструмент с доведенными режущими кромками, наличие СОЖ), поэтому влияние пластической деформации на микрогеометрию обработанной поверхности выражается в боковом выдавливании обрабатываемого материала в сторону соседнего следа, оставленного вершиной резца.

Анализируя влияние шероховатости режущего лезвия на параметры первичного профиля текстуры обработанной поверхности, можно сделать вывод, что при работе инструментом с радиусом при вершине микронеровности режущего лезвия полностью переносятся на обработанную поверхность. При работе инструментом с зачистной кромкой на режущем лезвии шероховатость обработанной поверхности зависит от коэффициента перекрытия  $k$  и соотношения между подачей  $S$  и шагом между неровностями режущего лезвия.

Методика расчета первичного профиля текстуры поверхности при тонком точении состоит в определении величины каждого фактора входящего в периодическую составляющую по вышеприведенным формулам. По рассчитанным координатам вершин и впадин элементов первичного профиля текстуры поверхности строится профиль, соответствующий рельефу поверхности обработанной детали. Этот рельеф поверхности является профилограммой данной поверхности. По полученной профилограмме определяются все параметры первичного профиля и его составляющих профиля шероховатости и профиля волнистости поверхности.



В третьей главе рассмотрены методики проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились на четырех станках, выбранных в соответствии с рекомендациями для тонкого точения:

- токарно-винторезный полуавтомат повышенной точности модели 1716ПФЗ;
- универсальный токарный станок с ЧПУ *MASTURN 550i CNC*;
- станок токарный специальный особо точный МК6562;
- токарно-винторезный станок *TORNADO 230/1000V*;

В качестве режущего инструмента для материала Д16Т использовались проходные резцы Томилинского завода алмазного инструмента из синтетического алмаза АСПК «Карбонадо», природного алмаза «Борт».

Для материала 12Х18Н10Т была выбрана пластина фирмы ООО «Вириал» *VNMT110402-F-MF*. Геометрические параметры инструментов измерялись с помощью измерительного микроскопа *MarVision MM 320* фирмы *Mahr* (Германия). Для проведения экспериментов использованы заготовки в воде проката диаметром 40 мм и тонкостенных цилиндров диаметром 30 мм. и длиной 250 мм. из алюминиевого сплава Д16Т и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Параметры текстуры поверхности обработанных заготовок определялась на профилографе-профилометре мод *MarSurf M 400* фирмы *Mahr* (Германия). Для обработки результатов измерения использовалось программное обеспечение *MarWin* фирмы *Mahr*.

В процессе проведения экспериментов менялись следующие технологические параметры: скорость от 100 до 700 м/мин; подача от 0,01 до 0,1 мм/об; глубина резания от 0,01 до 0,1 мм; амплитуда вынужденных гармонических колебаний от 0 до 1,5 мкм, а также геометрия инструмента: углы  $\varphi$  и  $\varphi_1$  от 15 до 45°; радиус скругления режущего лезвия от 0,5 до 50 мкм; ширина зачистной кромки на режущем лезвии от 0,2 до 1 мм.

Как видно из результатов, наибольшее влияние на текстуру поверхности оказывает подача  $S$  (рисунок 7). С увеличением подачи увеличиваются высотные и шаговые параметры текстуры поверхности, особенно это видно при работе инструментом с радиусом при вершине. При работе инструментом с зачистной кромкой эта связь менее заметна т.к. обычно при тонком точении ширина зачистной кромки больше подачи при этом коэффициент перекрытия равный отношению ширины зачистной кромки к величине подачи колеблется от 4 до 50.

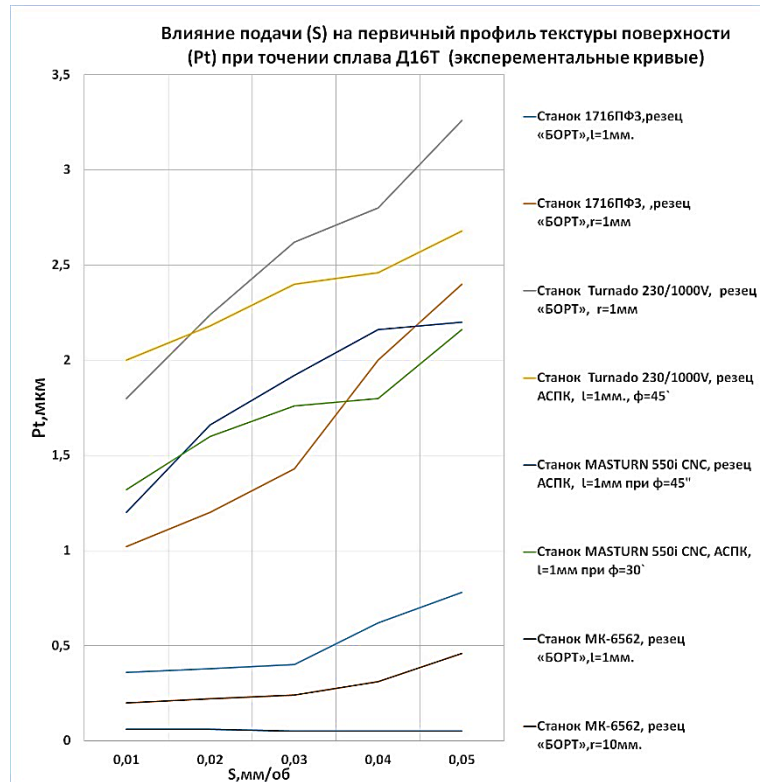


Рисунок 7 - Влияние подачи на первичный профиль текстуры поверхности при глубине резания  $t = 0,1\text{мм}$ , для сплава Д16Т

Наибольшее увеличение высотных параметров первичного профиля текстуры поверхности в некоторых экспериментах на станках 1716ПФЗ и *TORNADO 230/1000V* объясняется увеличением амплитуды вынужденных колебаний инструмента и обрабатываемой поверхности связанное с неуравновешенностью некоторых элементов конструкции станка.

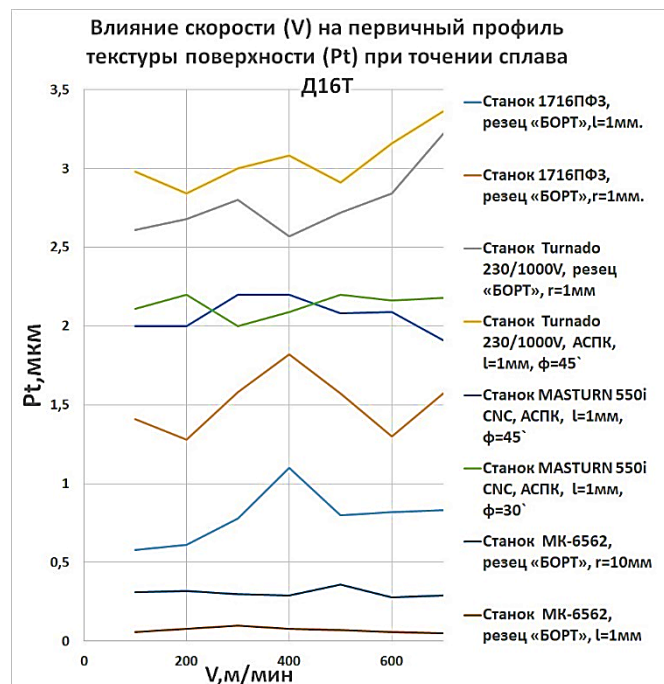


Рис.8 - Влияние скорости резания на первичный профиль текстуры поверхности при глубине резания  $t = 0,1\text{мм}$ , для сплава Д16Т

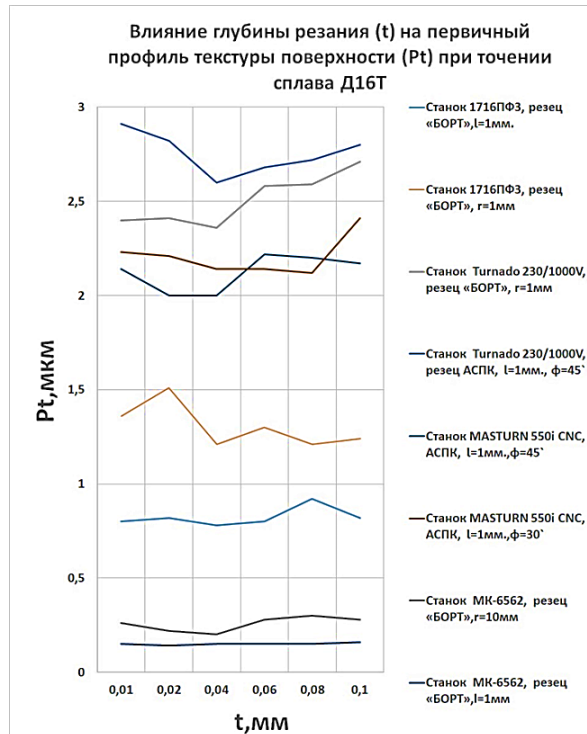


Рисунок 9 - Влияние глубины резания на первичный профиль текстуры поверхности при подаче  $S=0,05$  мм/об, для сплава Д16Т

Для материала 12X18Н10Т было проведено аналогичные исследования по влиянию скорости резания на первичный профиль текстуры поверхности (рисунок 10) и по влиянию радиуса при вершине резца на первичный профиль текстуры поверхности (рисунок 13).



Рисунок 10 - Влияние скорости резания на первичный профиль текстуры поверхности для материала 12X18Н10Т

Из геометрических параметров инструмента существенное влияние на параметры первичного профиля текстуры обработанной поверхности оказывает радиус при вершине (рисунок 11) и радиус скругления режущего лезвия (рисунок 12).

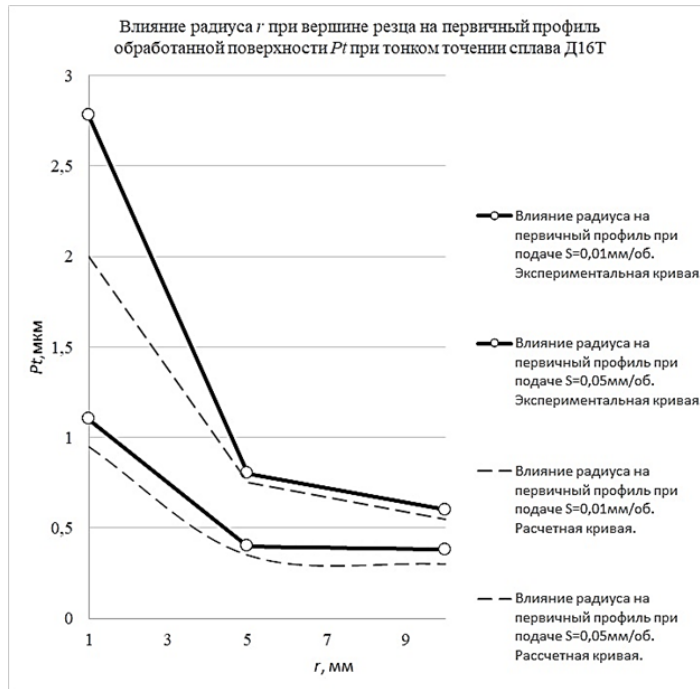


Рисунок 11- Влияние радиуса  $r$  на первичный профиль обработанной поверхности  $Pt$  при подаче  $S = 0,01, 0,05$  мм/об, для сплава Д16Т

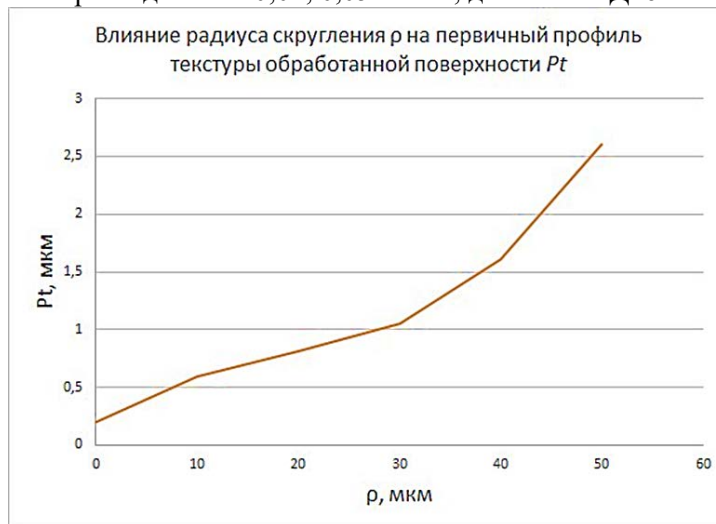


Рисунок 12- Влияние радиуса скругления на параметр  $Pt$  первичного профиля обработанной поверхности и высоту наплывов при боковом вытеснении материала

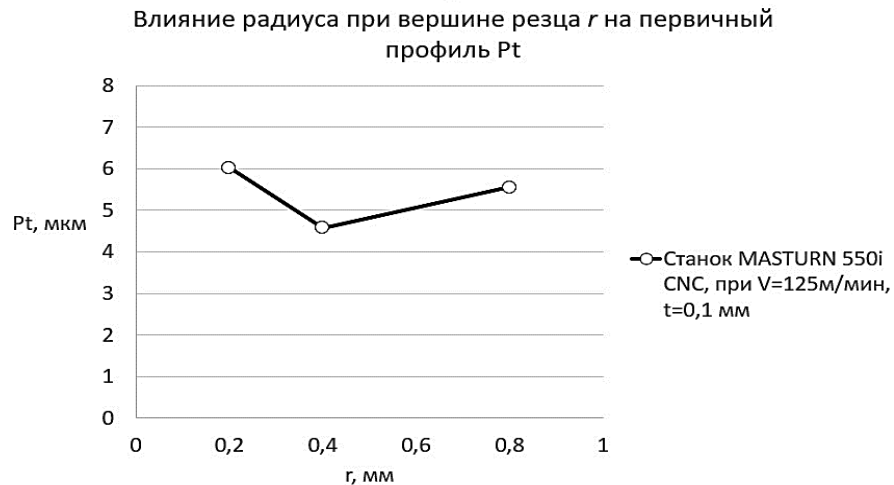


Рисунок 13 - Влияние радиуса при вершине на первичный профиль текстуры поверхности для материала 12Х18Н10Т

Как видно из графиков (рисунок 14), увеличение параметра  $Pt$  происходит за счет роста пластической деформации при увеличении радиуса скругления режущего лезвия

С изменением ширины зачистной кромки режущего лезвия при одной и той же подаче изменяется коэффициент перекрытия, увеличение коэффициента перекрытия свыше 20 не приводит к значительному уменьшению параметра  $Pt$  обработанной поверхности. .

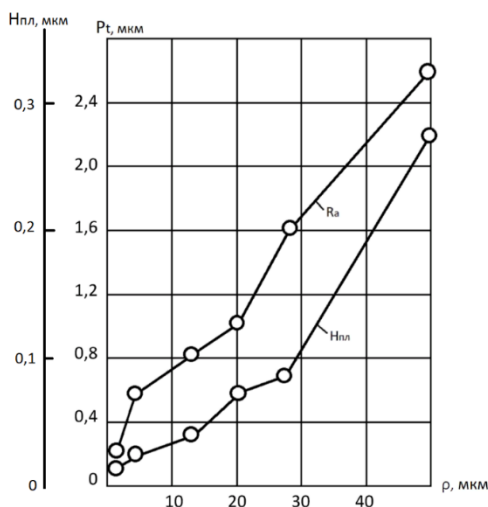


Рисунок 14- Влияние радиуса скругления режущего лезвия на параметр  $Pt$  первичного профиля поверхности и величину пластической деформации  $H_{пл}$ .

Экспериментальные исследования показали, что влияние скорости резания и глубины на параметры первичного профиля текстуры обработанной поверхности незначительное. Из режимов резания наибольшее влияние оказывает подача и амплитуда вынужденных гармонических колебаний заготовки и инструмента (рисунок 15). При увеличении амплитуды колебаний от 0,2 до 1,5 мкм параметр  $Pt$  первичного профиля текстуры поверхности увеличивается от 0,12 до 2,4 мкм.

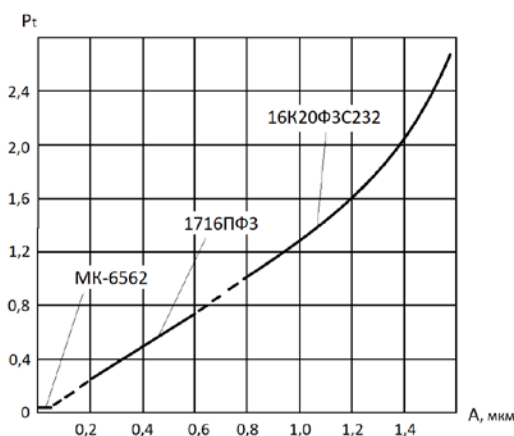


Рисунок 15- Влияние амплитуды вынужденных гармонических колебаний на параметр  $Pt$  первичного профиля обработанной поверхности

На рассматриваемых выше графиках представлены теоретические кривые, рассчитанные по предлагаемой методике. Из графиков видно, что предлагаемая методика рас-

чета параметров первичного профиля текстуры обработанной поверхности позволяет считать шероховатость поверхности при тонком точении с достаточной, для практического применения, степенью точности.

**В четвертой главе** разработаны технологические рекомендации для операции тонкого точения алюминиевых сплавов обеспечивающие параметры первичного профиля текстуры поверхности  $Pt = 0,12 \dots 0,2$  мкм., параметр профиля шероховатости поверхности  $Ra = 0,1 \dots 0,05$  мкм. И минимальное значение волнистости на обработанной поверхности. Как отмечалось ранее, одними из факторов, сильно влияющих на первичный профиль текстуры поверхности при тонком точении, особенно в области  $Pt = 0,12 \dots 0,2$  мкм., является радиус скругления режущей кромки резца, радиус при вершине, а из режимов резания - подача. На основании теоретических и экспериментальных исследований в производственных и лабораторных условиях, разработаны практические рекомендации для обеспечения шероховатости поверхности  $Pt = 0,2 \dots 0,1$  мкм при тонком алмазном точении алюминиевых сплавов. Для обеспечения заданной шероховатости необходимо использовать станки моделей МК 6562 или 1716ПФЗ (предпочтительно, станок МК 6562). Режущий инструмент должен быть из природного алмаза и иметь радиус округления режущего лезвия  $\rho$  не более 1 мкм, радиус при вершине резца должен быть не менее 5 мм, а для инструмента с зачистной кромкой ее ширина должна быть не менее 0,5 мм. Скорость резания выбирается в пределах от 100 до 700 м/мин, исходя из условия минимума вынужденных гармонических колебаний, подача до 0,05 мм/об. Обязательное использование в качестве СОЖ спирта или керосина.

На основании предложенных рекомендаций, были разработаны технология тонкого алмазного точения цилиндров из алюминиевого сплава Д16Т, обеспечивающая стабильное получение шероховатости поверхности по параметру  $Ra = 0,05 \dots 0,02$  мкм. и технология изготовления тонкостенных корпусов для гаммы индуктивных датчиков и цифровых головок ИГПЦ из сплава 12Х18Н10Т, позволяющая обеспечить заданную шероховатость  $Ra = 0,2 \dots 0,1$  мкм.

В приложении представлены акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

К основным научным и практически ценным результатам исследования, впервые и защищаемых автором, относятся:

1. Решена актуальная научная задача, состоявшая в разработке научно-методического аппарата технологического обеспечения и повышения качества поверхности тонкостенных цилиндров при тонком точении, на основе математической модели формирования первичного профиля текстуры поверхности за счет достижения цели исследования.

2. Определены граничные условия и сформулированы требования к математической модели формирования первичного профиля текстуры поверхности при тонком точении тонкостенных цилиндров.

3. Предложена методика расчета параметров первичный профиль текстуры поверхности на основе математической модели тонкого точения тонкостенных цилиндров, учитывающая режимы резания, макро- и микрогеометрию профилирующего лезвия режущего инструмента, а также возможных вынужденных колебаний в технологической системе.

4. Анализ математической модели первичного профиля текстуры поверхности показал, что форма профилирующего лезвия оказывает существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности.

5. Предварительные расчеты по математической модели показали:

- увеличение радиуса при вершине инструмента свыше 10 мм существенного влияния на шероховатость поверхности не оказывает.

- увеличение подачи приводит к резкому увеличению высоты шероховатости обработанной поверхности особенно для инструмента с радиусом менее 1 мм.

- увеличение амплитуды вынужденных колебаний на 0,1 мкм приводит к увеличению волнистости от 0,05 до 0,1 мкм в зависимости от периода колебаний.

6. Экспериментально подтверждено, что расчетное значение параметра  $Pt$  первичного профиля по предложенной математической модели отличается от реального профиля в меньшую сторону, не более чем на 12%, что говорит о адекватности предложенной модели, а, следовательно, ее можно использовать для в условиях реального производства.

7. Экспериментально определена взаимосвязь режимов резания, геометрии режущего лезвия и колебаний технологической системы на формирование первичного профиля текстуры поверхности, которая показывает:

- скорость в диапазоне 100...700 м/мин и глубина резания в диапазоне 0,01...0,1 мм существенно влияния на первичный профиль текстуры обработанной поверхности не оказывает.

- увеличение коэффициента перекрытия свыше 20, у резцов с фаской при вершине, не приводит к значительному уменьшению высоты параметра  $Pt$  первичного профиля обработанной поверхности.

- радиус скругления режущего лезвия  $\rho$  оказывает значительное влияние на величину упругопластической деформации поверхностного слоя детали. Увеличение  $\rho$  на 1 мкм приводит к увеличению параметра  $Pt$  первичного профиля обработанной поверхности на 0,05 мкм.

8. Применение СОЖ препятствует образованию наклепа на режущем лезвии, это снижает величину пластической и упругой деформации в зоне резания, а, следовательно, уменьшает значение параметра  $Pt$  первичный профиль текстуры обработанной поверхности. Наименьшее значение параметров  $Pt$  первичного профиля при обработке сплава Д16Т можно получить, применяя в качестве СОЖ спирт.

9. Разработаны практические рекомендации по выбору макро и микрогеометрии режущего инструмента при точении алюминиевого сплава Д16Т и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

9. Для обеспечения  $Ra=0,01...0,05$  мкм при обработке алюминиевого сплава Д16Т рекомендуется в качестве СОЖ использовать спирт и подавать его в зону резания под давлением в распыленном виде.

10. Разработан комплекс параметров текстуры поверхности для селенированных цилиндров состоящий из параметров:  $Ra$ ,  $Rsk$ ,  $Rku$ .

11. На основе предлагаемых рекомендаций разработана технология тонкого точения цилиндров полиграфических машин, обеспечивающая получение на поверхности цилиндра комплекс параметров текстуры поверхности:  $Ra = 0,05...0,02$  мкм,  $Rsk = 0$ ,  $Rku = 1,5...3,5$  мкм.

12. Разработан комплекс параметров текстуры поверхности корпусов индуктивных датчиков, состоящий из параметров:  $Ra$ ,  $Wt$ .

13. На основе предлагаемых рекомендаций разработана технология тонкого точения корпусов индуктивных датчиков, обеспечивающая получение на поверхности корпуса комплекс параметров текстуры поверхности:  $Ra \leq 0,2$  мкм,  $Wt \leq 5$  мкм.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

1. Черных Л.Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля, с учетом относительных колебаний / Л.Г. Черных, С.Н. Степанов, И.Н. Хрусталева // Наука и бизнес. Пути развития. – 2023. – № 4(142) . – С. 109-113.

2. Черных Л.Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля текстуры поверхности / Л.Г. Черных // Металлообработка. – 2023. – № 2. – С. 19–24.

### **Патенты:**

10. Патент №165795 Устройство для контрольно-измерительного прибора (профилометр) / А.В. Зеленин; заявитель и патентообладатель СПбГЛТУ МПК G01B 3/00, 10.11.2016. Заявка № 2016122559/28 от 07.06.2016.



11. Патент № 218214 Устройство для измерения текстуры поверхности деталей типа «вал» / Степанов С.Н., Хрусталева И.Н., Шабалин Д.Н. заявитель и патентообладатель СПбПУ. МПК G01B 3/00. 17.03.2023. Заявка № 2022110265 от 15.04.2022.

**Публикации в других изданиях:**

3. Черных Л.Г. М.М. Расчет систематической составляющей первичного профиля при участии вершины резца с радиусом, главной и вспомогательной режущих кромок, и подачи/ С.Н. Степанов, М.М. Радкевич// Инновационные технологии в машиностроении: Материалы научно-технической конференции (Новополоцк, 18-19 апреля) - Новополоцк, 2023 г. С.38-41.

4. Евсеева Изучение влияния алюминия на адгезию при газопламенном напылении образцов из конструкционной стали, с различной шероховатостью. / Евсеева Е.Н., Д.А. Нифонтов, А.С. Быстрова, Л.Г. Черных, И.Н. Хрусталева // Инновационные идеи в машиностроении : матер. науч. конф. молодых ученых, 24–26 мая 2022 года Институт машиностроения, материалов и транспорта. В 1 ч. Ч. 1. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 186-190.

5. Григорьев О.Д. Методика измерения параметров шероховатости поверхности на валах, с помощью устройства для привода профилометра. / К.В. Плюснина, Р.О. Кириченко, Л.Г. Черных, В.И. Слатин // Инновационные идеи в машиностроении: матер. науч. конф. молодых ученых, 24–26 мая 2022 года Институт машиностроения, материалов и транспорта. В 1 ч. Ч. 1. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 191-195.

6. Черных Л.Г. Влияние радиуса скругления лезвия на параметры первичного профиля поверхности при тонком точении. / С.Н. Степанов // LIII Международная научно-практическая конференция EurasiaScience:, 15 мая 2023 года Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2023. – 408 с.- С.64-67.

7. Войнаш С.А. Методы измерения значений шероховатости поверхности с применением прибора профилометр TR 100. / Л.Г. Черных, В.А. Марков, В.А. Соколова, В.И. Кретинин, А.М. Иванов // Машиностроение: новые концепции и технологии: матер. науч. конф. молодых ученых, 23–24 октября 2019 года – Красноярск, 2023. – С. 93-101.

8. Черных Л.Г. Оценка влияния шероховатости поверхности на повышение прочности сцепления с основой / С.А. Войнаш, В.А. Соколова, В.А. Марков // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: матер. науч. конф. с междунар. уч., 27–28 октября 2017 года – Рубцовск, 2017. – С. 218-224.

9. Черных Л.Г./ Композиционная модель формирования первичного профиля текстуры поверхности при тонком точении//Метрология поверхности. Доклад.-Санкт-Петербург. СПбПУ. 23-24 апреля 2019.