

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование кафедры)

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Технология машиностроения

(направленность (профиль)/ специализация)

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Повышение эффективности процессов обработки на основе  
нейросетевого моделирования

Студент	<u>А.А. Севастьянов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>Д.А. Расторгуев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>Н.В. Зубкова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>П.А. Корчагин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>А.Г. Егоров</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>О.Н. Брега</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

Название бакалаврской работы: Повышение эффективности процессов обработки на основе нейросетевого моделирования.

Выпускная работа посвящена вопросу моделирования процессов обработки металлов с помощью искусственных нейронных сетей.

В первом разделе работы рассмотрено понятие искусственной нейронной сети, приведены наиболее популярные архитектуры сетей. Описываются примеры применения искусственных нейронных сетей для решения задач моделирования, возникающих при анализе закономерностей механической обработки различных материалов.

Во втором разделе содержится описание технологии твердого точения. Приведены отличия представленного метода от шлифования, а также его особенности.

В третьем разделе описан эксперимент по твердому точению заготовок из закаленной инструментальной стали. Приведены результаты проведенного эксперимента, отражающие влияние режимов обработки на качество поверхности и тип стружки при твердом точении.

В четвертом разделе представлены результаты моделирования экспериментальных данных при помощи аппарата искусственных нейронных сетей. Описаны результаты классификации режимов обработки по качеству поверхности и типу получаемой при резании стружки.

Произведена оценка безопасности технического объекта и экономический расчет.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 47 страниц, содержащей 12 таблиц, 20 рисунков и графической части, содержащей 7 листов А1.

## **ABSTRACT**

The title of the graduation project is “Improving efficiency of machining processes on the basis of neural network modeling”.

The graduation project is devoted to the problem of metal machining processes modeling using artificial neural networks.

The first section includes the definition of artificial neural network and the set of the most common architectures of neural networks. Examples of using neural networks for solving modeling problems are described. These problems appear in analysis of mechanism of different materials machining.

The second section includes a description of hard turning technology. Differences between hard turning and grinding and features of hard turning are considered.

The third section includes description of experimental study of hard turning of hardened tool steel workpieces. Experimental results show the influence of cutting modes on surface quality and type of chip.

The fourth section includes results of modeling of experimental data using artificial neural network. The results of classification of cutting modes on the criterion of surface quality and type of chip are described.

The estimation of the technical object safety and economical calculations are done.

The graduation project consists of explanatory note in size of 47 pages including 12 tables, 20 figures and graphical part including 7 lists A1.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Искусственные нейронные сети.....	7
1.1 Общие сведения.....	7
1.2 Устройство.....	8
1.3 Популярные архитектуры.....	9
1.4 Применение в промышленности.....	13
2 Твердое точение.....	15
2.1 Общие сведения.....	15
2.2 Сравнение твердого точения и шлифования.....	15
2.3 Качество поверхности при твердом точении.....	16
2.4 Механизм стружкообразования при твердом точении.....	18
3 Экспериментальные исследования.....	21
4 Нейросетевое моделирование.....	28
5 Безопасность и экологичность технического объекта.....	33
6 Экономическая эффективность работы.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	47

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современное машиностроение предъявляет всё более высокие требования к эффективности производства. Чтобы оставаться конкурентоспособными, промышленные предприятия должны активно внедрять инновации в производство. Одними из самых прогрессивных и быстро развивающихся технологий на сегодняшний день являются разработки, связанные с созданием искусственного интеллекта. К ним, в частности, относятся исследования в области искусственных нейронных сетей (ИНС).

Искусственные нейронные сети уже доказали свою эффективность при решении ряда эвристических задач, которые ранее считались под силу только человеку. Так, нейронные сети зарекомендовали себя как мощный инструмент при решении вопросов, связанных с научными исследованиями в самых разных областях человеческой деятельности, таких как космос, промышленность, медицина. ИНС используются для обработки больших массивов данных, в частности, результатов экспериментов, с целью моделирования различных явлений, процессов, закономерностей. С их помощью эффективно решаются задачи распознавания образов, идентификации динамических систем, адаптивного управления.

Актуальность темы подтверждается Указом Президента РФ от 01.12.2016 N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (п. 20а): «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

В свою очередь, предприятия всё чаще сталкиваются с проблемой обработки высокопрочных сплавов и твёрдых материалов, в частности,

закалённых сталей. В связи с этим представляет большой интерес технология лезвийной обработки материалов твёрдостью свыше 47 HRC, получившая название «твёрдое точение». Использование данного метода позволяет существенно повысить производительность обработки за счёт высокой концентрации операций на одном станке. При этом из производственного процесса исключается операция шлифования, в связи с чем возрастает производительность, экономичность и экологическая безопасность производства.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование моделирования процессов обработки с помощью искусственных нейронных сетей на примере твёрдого точения.

# 1 Искусственные нейронные сети

## 1.1 Общие сведения

Нейронные сети – это раздел искусственного интеллекта, в котором для обработки сигналов используются явления, аналогичные происходящим в нейронах живых существ [1]. По сути, нейронные сети представляют собой математическую модель головного мозга живого существа (в частности, человека), способную успешно решать различные эвристические задачи.

Преимущества ИНС:

- Способность к самообучению;
- Адаптивность;
- Высокая обобщающая способность и др.

Недостатки ИНС:

- Большой объём используемой памяти (при работе с многомерными векторами);
- Необходимость использования высокопроизводительной вычислительной техники (особенно при обучении сети).

В целом, нейронные сети хорошо зарекомендовали себя при решении различных задач в машиностроении, электронике, медицине и других отраслях человеческой деятельности, связанных с обработкой информации.

Задачи, решаемые с помощью ИНС, можно условно разбить на несколько групп:

- 1) Аппроксимация функциональных зависимостей;
- 2) классификация данных и распознавание образов;
- 3) идентификация систем;

#### 4) ассоциативное управление.

С точки зрения математики искусственную нейронную сеть можно рассматривать как универсальную аппроксимирующую модель нелинейных функций. Эта особенность находит широкое применение при построении и исследовании сложных зависимостей между входными и выходными параметрами. По отношению к резанию материалов входными параметрами нейронной сети могут быть режимы резания (скорость, подача и глубина). В свою очередь, в качестве выходных параметров можно принять шероховатость обработанной поверхности, тип получаемой при резании стружки, состояние инструмента и многие другие показатели процесса обработки.

### 1.2 Устройство

Основной функциональной единицей искусственной нейронной сети является нейрон. На рисунке 1.1 представлена модель МакКаллока-Питса, которая является одной из первых моделей нейрона [2].

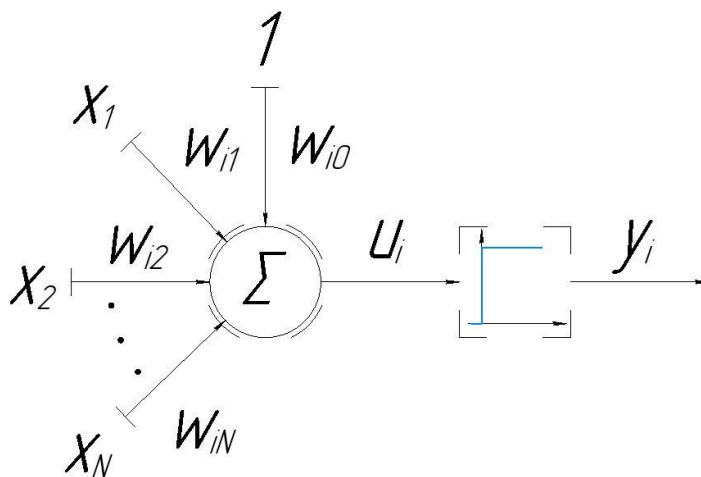


Рисунок 1.1 – Нейрон МакКаллока-Питса

Принцип действия представленного выше нейрона заключается в следующем. На вход суммирующего блока подаются взвешенные входные сигналы  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), а также величина смещения  $w_{i0}$ . После этого



суммарный сигнал подается на вход ступенчатой функции активации. Выходной сигнал нейрона  $y_i$  при этом определяется выражением

$$y_i = f \left( \sum_{j=1}^N w_{ij} x_j + w_{i0} \right) . \quad (1.1)$$

Здесь  $f(u_i)$  – функция активации. Для нейрона МакКаллока-Питса имеем:

$$f(u) = \begin{cases} 1, & u > 0 \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Таким образом, представленный выше нейрон состоит из сумматора и блока активации. Различные нейронные сети могут иметь в своем составе нейроны, состоящие из блоков вычисления расстояния между векторами, блоков произведения, а также имеющих другие функции активации.

Чтобы искусственная нейронная сеть правильно отражала функциональные зависимости между входами и выходами, необходимо настроить значения весов  $w_{ij}$  и смещения  $w_{i0}$ . Это достигается при обучении сети.

Существует два метода обучения нейронных сетей: обучение с учителем (англ. Supervised learning) и обучение без учителя (англ. Unsupervised learning).

Для обучения с учителем необходимо заранее знать не только вектор входных сигналов  $x$ , но и вектор целевых сигналов  $d$  (от англ. Destination). В этом случае настройка значений весов происходит с целью минимизации расхождений между фактическим вектором выходов нейронной сети  $y$  и целевым вектором  $d$ .

Обучение без учителя применяется, если априори неизвестны целевые значения  $d$ . Стратегия обучения строится на основании конкуренции нейронов между собой, либо с учетом взаимосвязи выходных и входных сигналов (обучение по Хеббу).

### 1.3 Популярные архитектуры

Архитектуры нейронных сетей отличаются друг от друга по различным параметрам. Тип используемого нейрона относится к главным особенностям, определяющим свойства нейронной сети и сферу её применения. Рассмотрим основные типы искусственных нейронных сетей, отличающиеся применением различных нейронов.

1) Персептрон (рисунок 1.2). Это один из исторически первых видов искусственных нейронных сетей. В качестве основного структурного элемента сети используется нейрон, схожий с нейроном МакКаллока-Питса, однако в качестве функции активации может использоваться сигмоидальная функция активации («сигмоид»):

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}; \quad (1.3)$$

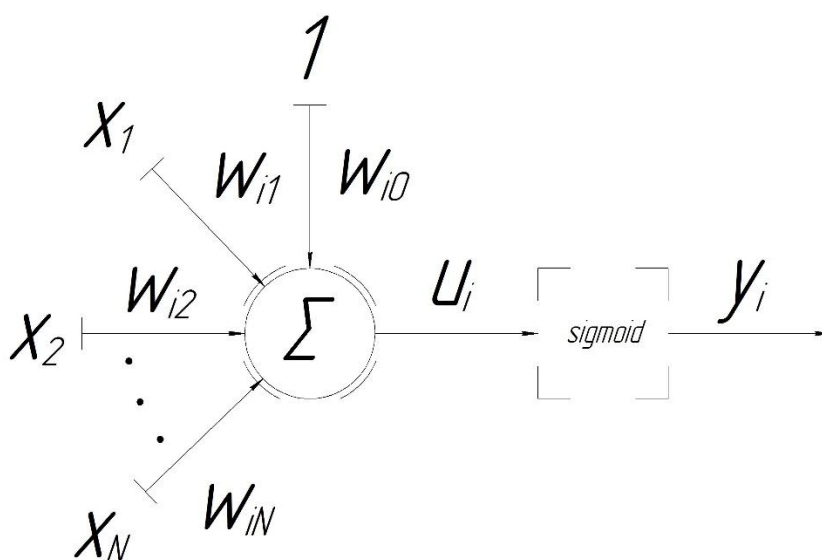


Рисунок 1.2 – Персептронный нейрон

Персептроны используются для решения задач классификации. Одним из основных ограничений персептронов является необходимость линейной разделимости классифицируемых векторов, что существенно ограничивает список решаемых персептронами задач;

2) Линейные сети (рисунок 1.3). Данный вид нейронных сетей аналогичен перцептрон, однако в нем используется линейная функция активации нейронов;

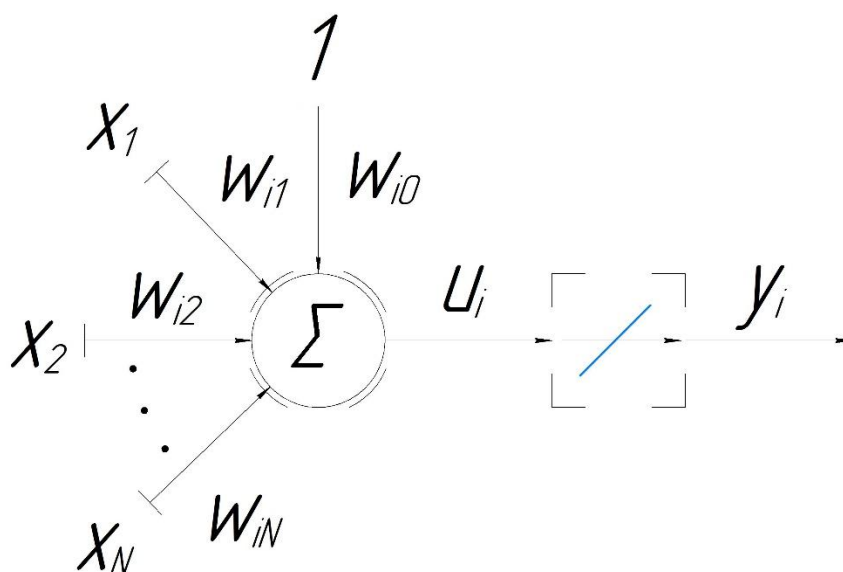


Рисунок 1.3 – Линейный нейрон

Как и перцептроны, линейные сети имеют ограничение по линейной разделимости классифицируемых данных. В то же время алгоритм обучения линейных сетей более мощный, чем у перцептронов, что позволяет достичь минимума ошибки обучения;

3) Радиально-базисные нейронные сети (рисунок 1.4). Данный тип нейронов работает следующим образом. Входной вектор подается на блок вычисления расстояния «dist», который рассчитывает дистанцию между вектором входа  $\mathbf{p}$  и вектором весов  $i$ -го нейрона  $\mathbf{w}_i$ . Полученное значение умножается на смещение  $\mathbf{b}$  и подается на вход радиально-базисной функции активации:

$$\text{radbas } x = e^{-x^2}; \quad (1.4)$$

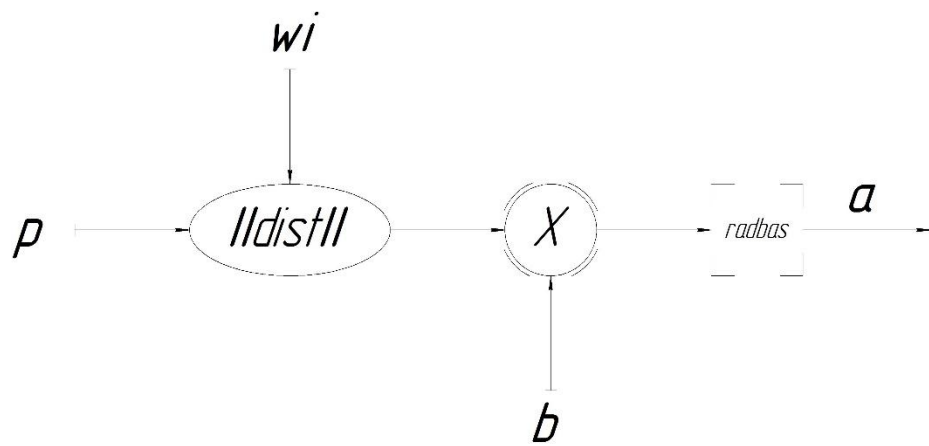


Рисунок 1.4 – Радиально-базисный нейрон

Радиально-базисные нейронные сети эффективно используются для решения задач аппроксимации и классификации данных. Они требуют меньше времени на своё создание и весьма эффективны при большом объёме входных данных;

4) Слой Кохонена (рисунок 1.5) состоит из нейронов с конкурентной функцией активации, работающей по принципу «победитель получает всё» (англ. WTA – «Winner Takes All»).

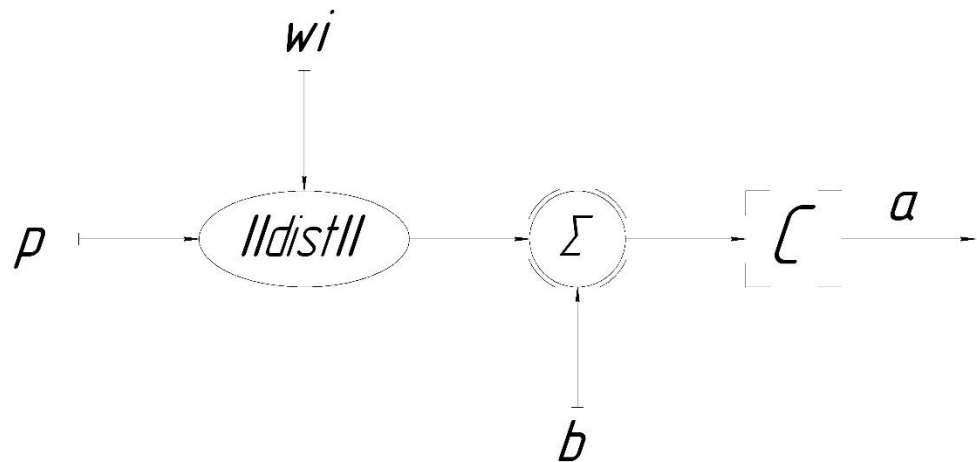


Рисунок 1.5 – Нейрон Кохонена

Слой Кохонена могут быть объединены в нейронную сеть, получившую название карта Кохонена. Она часто используется при решении задачи кластеризации данных.

## 1.4 Применение в промышленности

Для моделирования сложных явлений и процессов, происходящих в технологических системах, также успешно используются искусственные нейронные сети.

В статье [3] использован многослойный персептрон для исследования влияния твёрдости заготовки и скорости вращения шпинделя на шероховатость обработанной поверхности при твёрдом точении стали AISI 4140 (российский аналог 40ХФА) инструментом из кубического нитрида бора. При этом нейронная сеть позволила достичь более точных результатов моделирования, показав своё преимущество перед регрессионным анализом.

В работе [4] использована гибридная нейро-нечёткая сеть для диагностики состояния режущего инструмента при токарной обработке. На вход сети подавали четыре параметра: время обработки, силы резания, вибрации и сигнал акустической эмиссии.

Исследование [5] посвящено созданию нейросетевого устройства, которое генерирует управляющие программы для вертикально-фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ без вмешательства оператора. Как описано в упомянутой работе, для создания устройства использованы различные искусственные нейронные сети, выполняющие функции предсказания стратегии фрезерования, качества обработанной поверхности и оптимизации технологических параметров фрезерования.

Новый метод оценки диаметров отверстий и шероховатости обработанной поверхности для прецизионного сверления предложен в работе [6]. В качестве заготовок использованы композитные плитки, состоящие из верхнего слоя титанового сплава Ti6Al4V (российский аналог ВТ6), наклеенного на плиту из алюминиевого сплава AA 2024T3 (российский аналог Д16). Метод использует сигналы, полученные в ходе обработки с помощью мультисенсорной системы, установленной на режущем

инструменте. После предварительной математической обработки сигналы подаются на вход искусственной нейронной сети. В результате обучения сеть способна оценивать шероховатость обработанной поверхности и диаметр отверстия на основе входных сигналов и параметров процесса резания. Экспериментальные исследования подтвердили высокую точность предложенного метода.

Искусственные нейронные сети также могут быть использованы для предсказания шероховатости поверхности и среднеквадратической скорости вибраций заготовки при растачивании [7]. Так, в представленной работе варьируются входные параметры, включающие в себя радиус закругления вершины резца, скорость резания и подачу. Скорость вибраций заготовки из стали AISI1040 (российский аналог сталь 40) оценивалась бесконтактным методом с помощью лазерного доплеровского вибromетра. Применение многослойной сети прямого распространения, обученной с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, позволило добиться поставленной цели с высокой точностью.

В целом, искусственные нейронные сети активно применяются для повышения эффективности машиностроительного производства по следующим направлениям:

- 1) экспертная система, используемая для помощи инженеру-технологу или оператору металлорежущего станка при подборе режимов резания для обработки;

- 2) система диагностики, ставящая своей целью онлайн-мониторинг различных параметров процесса резания. Например, такая система может решать задачу определения износа режущего инструмента;

- 3) система автоматического управления технологическим процессом (САУ ТП). Применяется для адаптивного управления ходом обработки.

## 2 Твёрдое точение

### 2.1 Общие сведения

Твёрдое точение (англ. Hard turning) – это токарная обработка материала твёрдостью более 47 HRC [8]. Данный метод обработки часто используется предприятиями при изготовлении подшипников, зубчатых колес, валов и других деталей машин в качестве альтернативы шлифованию [9]. В данном разделе будут подробно рассмотрены особенности твердого точения, а также проведено сравнение данного метода со шлифованием.

### 2.2 Сравнение твердого точения и шлифования

Одно из главных отличий твердого точения от шлифования заключается в альтернативной организации технологического маршрута обработки заготовок деталей машин. Из этого отличия вытекает множество преимуществ твердого точения (рисунок 2.1).

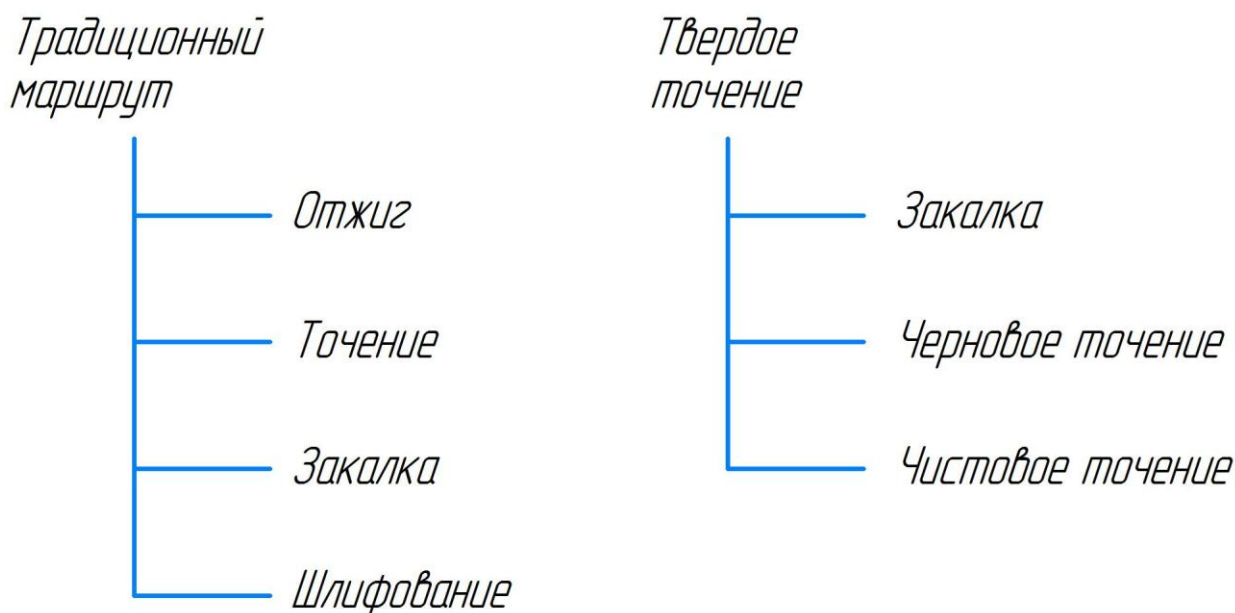


Рисунок 2.1 – Сравнение традиционного маршрута и твердого точения

Как видно из рисунка 2.1, твердое точение включает в себя меньше технологических операций, чем традиционный маршрут, что влечет за собой дополнительные преимущества в виде сохранения энергии, сокращения

машинного времени путем отказа от вторичной термической обработки и шлифования [10].

Твердое точение имеет большую гибкость по сравнению со шлифованием. Оно также предоставляет возможность обработки сложной геометрии заготовки за один установ. Скорость съема материала при твердом точении намного выше, чем при шлифовании, что приводит к сокращению машинного времени. Геометрия и качество поверхности сравнимы с получаемыми шлифованием [11]. Самое существенное отличие твердого точения от шлифования заключается в том, что твердое точение может привести к относительно глубоким остаточным напряжениям сжатия. Однако в целом глубокие остаточные напряжения сжатия после твердого точения предпочтительны для повышения усталостной выносливости, например, в парах трения качения [12].

Чтобы твердое точение стало реальной альтернативой шлифованию, необходимо правильно назначать параметры обработки в каждом конкретном случае. Параметры процесса при твердом точении имеют более узкие диапазоны приемлемых значений по сравнению с обычной токарной обработкой. В свою очередь, ошибка при оптимизации процесса может привести к комбинации нежелательных последствий, таких, как низкая стойкость инструмента, низкое качество поверхности, неприемлемая точность размеров или возникновение вибраций [13]. Также при твердом точении важно определить механизмы и факторы, приводящие к образованию пилообразной стружки.

### **2.3 Качество поверхности при твердом точении**

Для процесса твердого точения важно рассмотреть вопросы, связанные с качеством обработанной поверхности. Одним из важнейших показателей качества обработанной поверхности являются остаточные напряжения.



Остаточные напряжения представляют собой напряженное состояние, которое существует в заготовке после снятия всех внешних нагрузок. При оценке качества поверхности остаточные напряжения часто рассматриваются как один из наиболее значимых параметров, поскольку они оказывают прямой эффект на усталостную выносливость деталей машин. Эффекты остаточных напряжений могут быть как положительными, так и отрицательными, что влияет на поведение при деформации, усталостную выносливость, динамическую прочность, химическую стойкость и магнитные свойства обработанных материалов [14]. Остаточные напряжения могут возникнуть из-за термической обработки, механической обработки, охлаждения или других процессов. Хорошо известно, что остаточные напряжения сжатия на поверхностях заготовок деталей машин имеют положительные эффекты по отношению к усталостной выносливости, распространению трещин и коррозионную устойчивость материалов, в то время как остаточные напряжения растяжения оказывают негативное воздействие на свойства материала. Как видно из рисунка 2.2, а, б, напряжения сжатия приводят к формированию закрытой трещины, в то время как растягивающие напряжения увеличивают напряженное состояние в трещине. Поскольку трещинообразование является главной причиной усталостного разрушения, для процесса механической обработки необходимо выбрать такие параметры, которые могут привести к остаточным напряжениям сжатия [11].

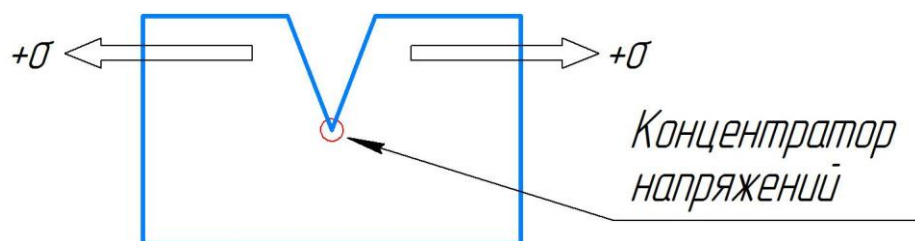


Рисунок 2.2 а – Эффект остаточных напряжений растяжения

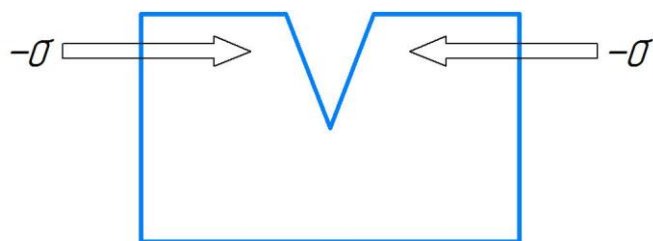


Рисунок 2.2 б – Эффект остаточных напряжений сжатия

Проведено исследование остаточных напряжений после твердого точения [15]. Испытания на усталостную выносливость показывают, что данный параметр для заготовок, обработанных твердым точением, сопоставим со значением после шлифования из-за высоких остаточных напряжений сжатия в приповерхностных слоях заготовки. Также из экспериментальных данных известно, что глубина резания и подача незначительно влияют на остаточные напряжения приповерхностных слоев материала. Однако, геометрия режущей кромки инструмента играет доминирующую роль в формировании профиля остаточных напряжений.

#### **2.4 Механизм стружкообразования при твердом точении**

Виды стружки при механической обработке определяются комбинацией эффектов свойств материала заготовки, параметров резания и геометрией инструмента. Понимание механизма стружкообразования играет важную роль в оптимизации процесса механической обработки. Процесс стружкообразования при твердом точении в общем приводит к локализованному сдвигу и сегментной стружке [13]. При твердом точении из-за применения инструмента с отрицательным передним углом высокие напряжения сжатия имеют место в инструменте и заготовке. Эти высокие напряжения сжатия приводят к формированию трещин вместо пластической деформации вблизи к первичной плоскости сдвига стружки. Эти трещины начинаются на свободной поверхности стружки (которая не находится под гидростатическим давлением) и распространяются глубоко по направлению к носовой части инструмента, высвобождая накопленную энергию и действуя

как поверхность скольжения для сегмента материала. Одновременно происходит нагрев и пластическая деформация материала. После отделения сегмента стружки давление резания возобновляется, образуется новая трещина и, таким образом, весь цикл начинается заново. Сегменты стружки, сформированные таким путем, связаны маленькой порцией материала, пластически деформированного и нагретого до высокой температуры [16]. Ввиду хрупкости закаленной стали, высокие напряжения сжатия первоначально приводят не к течению материала, а к формированию трещины. Эта трещина высвобождает накопленную энергию и, следовательно, действует как поверхность скольжения для сегмента материала, позволяя ему быть вытесненным между поверхностями частей заготовки. В то же время, нагрев и пластическая деформация стали происходят на переднем крае инструмента. Процесс циклический: в тот момент, когда сегмент стружки ускользнул прочь, обновленное давление резания приводит к формированию новой трещины и нового сегмента стружки [17]. Для значения переднего угла  $-6^\circ$  микроструктура стружки показывает индивидуальные сегменты стружки (серые зоны), связанные малой пропорцией материала, пластически деформированного и нагретого до высокой температуры (белые зоны). Меньшая несформированная толщина стружки ведет к меньшему пилообразному зубу, что приводит к поперечным сечениям, похожим на те, что имеют место при непрерывной стружке, но две зоны сформированного и несформированного материала показывают тот же механизм стружкообразования. Пластическая деформация становится доминирующим фактором в механизме стружкообразования. Формирование пилообразной стружки ввиду малой пластичности материала заготовки ведет к снижению сил резания несмотря на высокую прочность закаленной стали [18].

В ходе точения стали AISI 4340 (российский аналог 40ХН2МА) инструментом с низким содержанием КНБ установлено, что при низкой

скорости резания образуется непрерывная стружка. При увеличении скорости резания тип стружки меняется на пилообразный. Следовательно, чем выше скорость резания, тем более заметна пилообразная стружка. Среднее расстояние сегментации увеличивается с ростом скорости резания. Переходная скорость резания между непрерывным и пилообразным типами стружки находится в интервале от 80 м/мин до 130 м/мин. Критическая скорость резания, приводящая к формированию пилообразной стружки, около 130 м/мин [19].

Результаты исследований морфологии стружки показывают, что на высоких скоростях резания при твердом точении инструментальной стали D2 (российский аналог X12МФ) при малых глубинах резания механизм стружкообразования изменяется от непрерывного течения стружки, вызванного гомогенным сдвигом, до пилообразного типа стружки. Изменения механизма стружкообразования зависят от состояния инструмента (острозаточенный или изношенный) и величин сил резания. Формирование ожидаемой «пилообразной» стружки начинается, когда износ инструмента по задней поверхности достигает 0,1 мм [20].

### 3 Экспериментальные исследования

#### 3.1 Методика эксперимента

Проведён эксперимент по твёрдому точению на токарном станке с ЧПУ модели 16B16T1C1 с системой ЧПУ FlexNC, приложение А [21]. Заготовки представляли собой кольца из стали ХВГ ГОСТ 5950-2000 твердостью 55 HRC. Геометрические параметры заготовок: наружный диаметр 55 мм, внутренний диаметр 30 мм, толщина 20 мм. Химический состав стали ХВГ приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав стали ХВГ

C	0,9 - 1,05
Si	0,1 - 0,4
Mn	0,8 - 1,1
Ni	до 0,35
S	до 0,03
P	до 0,03
Cr	0,9 - 1,2
Mo	до 0,3
W	1,2 - 1,6
Cu	до 0,3
Fe	~94

Физико-механические свойства стали ХВГ: твердость 55 HRC, предел прочности  $\sigma_b=760$  МПа. Сталь ХВГ используется при изготовлении мерительного и режущего инструмента в случаях, когда отклонения размеров заготовки после закалки должны быть минимальны.

Торцовое точение колец проведено инструментом PCLNR 2525M 12 пластина NP-CNGA120404GA2 Mitsubishi, материал пластины – кубический нитрид бора (КНБ). В ходе резания СОЖ не применялась. Режимы обработки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы обработки

№ образца	v, м/мин	s, мм/об	t, мм	№ образца	v, м/мин	s, мм/об	t, мм
1	150	0,1	0,1	25	150	0,2	0,1
2	150	0,1	0,2	26	150	0,2	0,2
3	150	0,1	0,3	27	150	0,2	0,3
4	250	0,1	0,1	28	150	0,2	0,4
5	250	0,1	0,2	29	250	0,2	0,1
6	250	0,1	0,3	30	250	0,2	0,2
7	250	0,1	0,4	31	250	0,2	0,3
8	250	0,3	0,1	32	250	0,2	0,4
9	250	0,3	0,2	33	300	0,2	0,1
10	250	0,3	0,3	34	300	0,2	0,2
11	250	0,3	0,4	35	300	0,2	0,3
12	300	0,1	0,1	36	300	0,2	0,4
13	300	0,1	0,2	37	400	0,1	0,1
14	300	0,1	0,3	38	400	0,1	0,2
15	300	0,1	0,4	39	400	0,1	0,3
16	300	0,3	0,1	40	400	0,1	0,4
17	300	0,3	0,2	41	400	0,3	0,1
18	300	0,3	0,3	42	400	0,3	0,2
19	300	0,3	0,4	43	400	0,3	0,3
20	150	0,3	0,1	44	400	0,3	0,4
21	150	0,3	0,2	45	400	0,2	0,1
22	150	0,3	0,3	46	400	0,2	0,2
23	150	0,3	0,4	47	400	0,2	0,3
24	150	0,1	0,4	48	400	0,2	0,4

Здесь  $v$  – скорость резания на внешнем диаметре, м/мин;  $s$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм.

Получены фотографии обработанной поверхности и фрагментов стружки с увеличением  $\times 4$ ,  $\times 10$  и  $\times 40$  с помощью оптического микроскопа «Лабомет». Фотографии предназначены для исследования качества обработанной поверхности по критерию размеров следов вибраций, а также анализа типа и формы стружки. На всех фотографиях обработанных поверхностей четко видны следы от вершины резца, перемещающегося в направлении поперечной подачи. Оценка качества поверхности проводилась

по фотографиям с увеличением  $\times 40$  следующим образом: высокое качество – для образцов без видимых следов вибраций (поперечных «рисок»), среднее – для образцов с едва заметными следами вибраций (неглубокие, узкие поперечные риски) и низкое – для образцов со следами сильных ударов (заметные неоднородные углубления на всей поверхности). Высота рисок в оценке качества поверхности не учитывалась. Оценка производилась субъективно визуально, без количественных параметров. Если по оценке образца возникали разногласия, давалось среднее значение оценки.

Во время токарной обработки велась запись сигналов диагностической системы станка с ЧПУ, в частности, получены значения силы тока привода главного движения станка с частотой дискретизации 227 Гц (рисунок 3.1). Модель двигателя главного привода токарного станка – АИР132S4У3. Сбор сигнала осуществлялся в системе РМАС. Регистрировались показания с момента включения до момента выключения станка. На графике четко видны пиковые нагрузки в моменты включения и выключения. При выходе на установившийся режим работы (5 секунда) сигнал показывает уровень нагрузки на холостом ходу. С 9 секунды начинается процесс резания. Токковая нагрузка возрастает скачкообразно и постепенно снижается по причине уменьшения скорости резания по мере того, как резец перемещается радиально к оси заготовки.

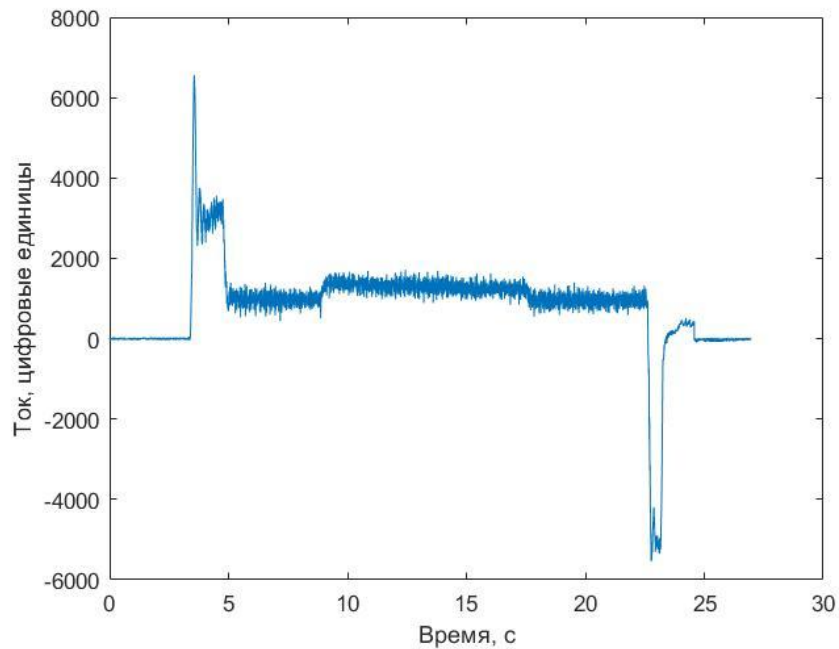


Рисунок 3.1 – График силы тока привода шпинделя от времени

Параметры токовых нагрузок привода главного движения токарного станка с ЧПУ дают возможность получения информации о силах резания, имеющих место в ходе обработки заготовок на различных режимах. Сопоставляя значения токовых нагрузок в приводе, можно установить вид зависимости сил резания от скорости резания, глубины резания и подачи. Оценка статической составляющей силы резания проводится по величине скачка от среднего значения токовой нагрузки холостого хода. Размах сигнала позволяет судить о динамической составляющей силы резания.

Формирование обработанной поверхности и силы резания связаны с процессом стружкообразования. С целью изучения данной взаимосвязи проводилась фотосъемка стружки с ее последующей классификацией по виду для каждого эксперимента.

В ходе анализа данных эксперимента особое внимание уделено качеству обработанной поверхности, а также типу получившейся при резании стружки. Поверхность по качеству делилась на «чистую», переходную и с «муаром» (рисунки 3.2, 3.3). Оценка проводилась визуально по фотографиям с максимальным увеличением поверхности. «Муар»



является признаком поверхности низкого качества и отличается не только повышенной шероховатостью, но и заметной неоднородностью микронеровностей.

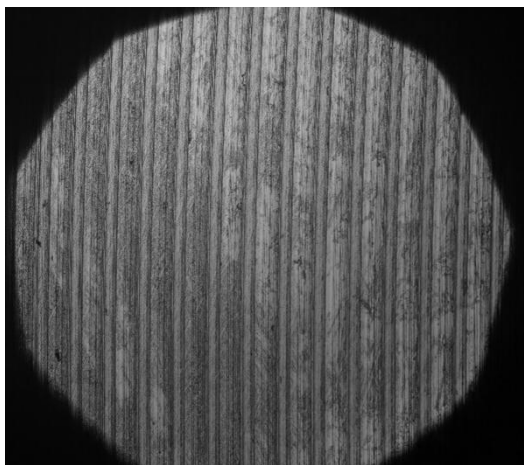


Рисунок 3.2 – Чистая поверхность

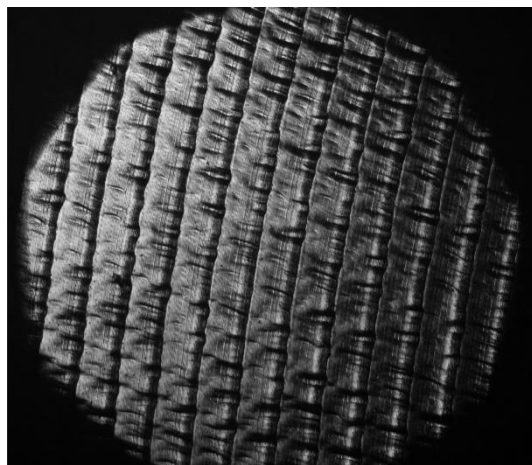


Рисунок 3.3 – Поверхность со следами вибраций

Стружка делилась на сливную ленточного типа, элементную (надлома) и переходного типа (рисунки 3.4 – 3.6). При обработке закаленных сталей в большинстве случаев получается стружка переходного типа с явно выраженной пилообразной формой. На низких режимах резания (опыты №1, 25) процесс стружкообразования устойчивый. Вид стружки сливной (№25) или переходный (№1), причем сливная стружка в данном случае представляет собой сильно связанные по плоскостям сдвига, но четко выделенные сегменты менее деформированного материала стружки. В данном случае при увеличении толщины срезаемого слоя стружка становится более связанной, и длина непрерывной стружки повышается. При максимальной площади срезаемого слоя (опыты №23, 44) тип стружки – элементный. Из-за предельной деформации в плоскости сдвига стружка распадается на отдельные сегменты. Рост скорости резания ведет к повышению температуры и скорости деформации в плоскости сдвига, что также снижает сплошность стружки и при предельных параметрах приводит к формированию стружки надлома. Усиление цикличности формирования стружки с ее полным разделением на отдельные сегменты приводит к

повышению динамической составляющей силы резания. Сигнал токовой нагрузки свидетельствует об усилении размаха динамической составляющей силы резания. Процесс стружкообразования проходит на частотах порядка несколько тысяч герц, что сопоставимо с собственной частотой резца, закрепленного в резцедержателе. При усилении динамичности в зоне стружкообразования, что сопровождается соответствующими изменениями в силе резания, происходит повышение уровня относительных колебаний резца и заготовки. С учетом высоких частот стружкообразования на максимальной скорости резания, которые близки к собственной частоте колебаний резца, происходит рост амплитуды колебаний инструмента. После обработки при сочетании параметров режимов, где хотя бы один фактор находится на максимальном уровне (кроме опыта №37, где скорость резания максимальная), наблюдается низкое качество поверхности и стружка, как правило, элементная. Это однозначно свидетельствует о том, что без назначения рациональных режимов обработки, обеспечивающих устойчивый процесс стружкообразования, нужного качества поверхности добиться невозможно.



Рисунок 3.4 – Сливная стружка

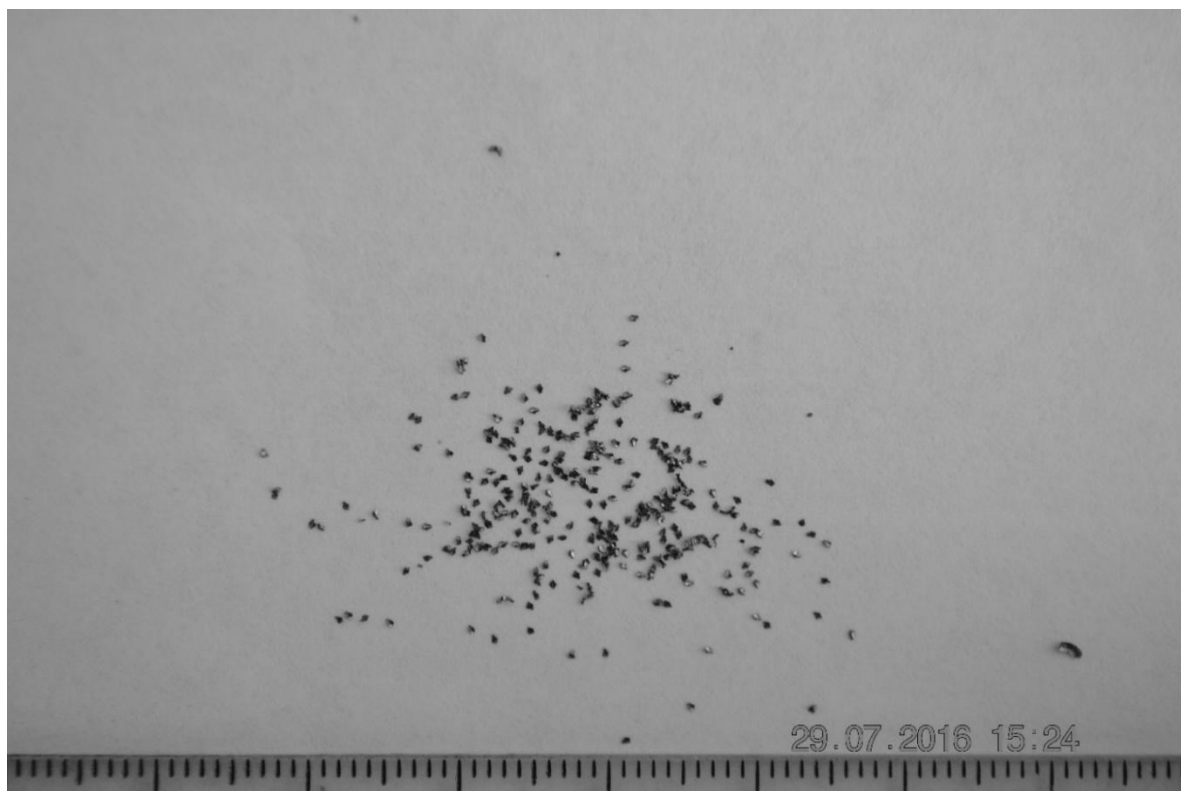


Рисунок 3.5 – Стружка элементная (надлома)

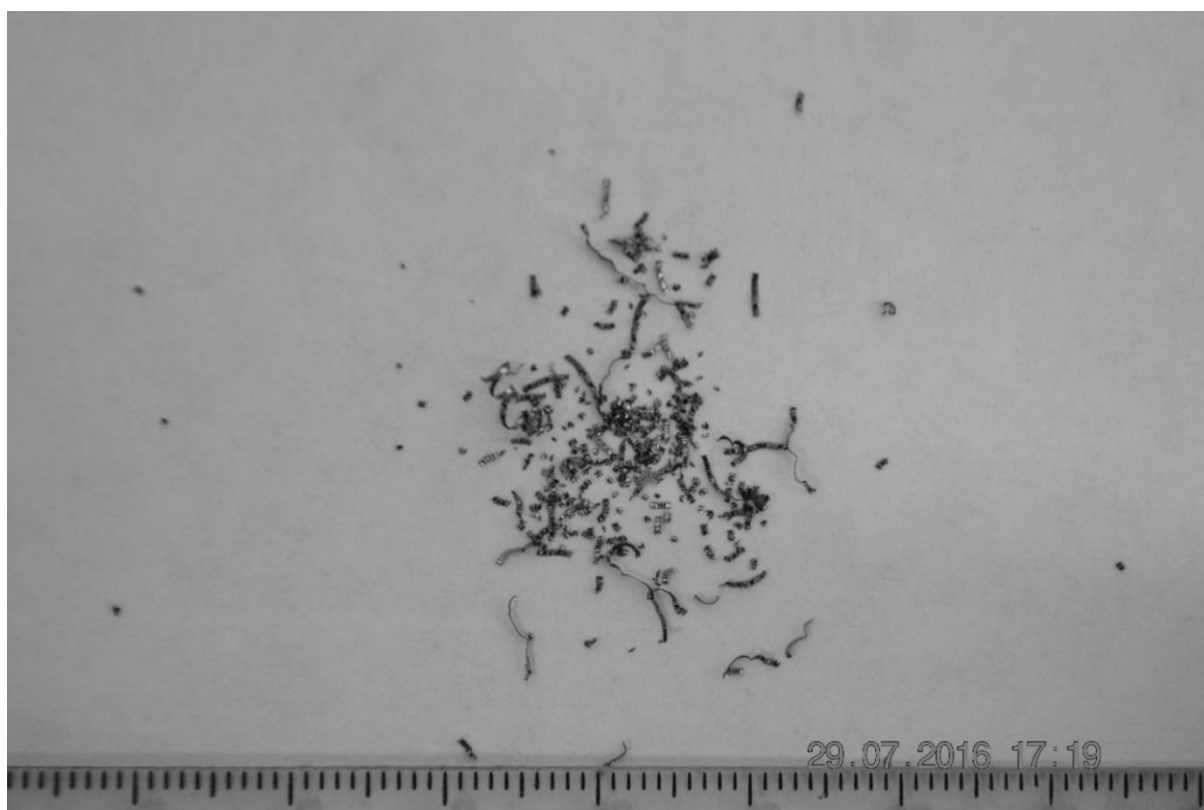


Рисунок 3.6 – Стружка переходного типа

## 4 Нейросетевое моделирование

Для исследования результатов эксперимента использован аппарат искусственных нейронных сетей. Так, произведена классификация режимов обработки по параметрам качества поверхности и типу полученной при резании стружки.

Для классификации режимов резания по качеству обработанной поверхности использовались три архитектуры искусственных нейронных сетей: вероятностная нейронная сеть (англ. Probabilistic Neural Network, PNN), сеть квантования векторов (англ. Learning Vector Quantization, LVQ) и двухслойная сеть прямого распространения. Архитектуры используемых нейронных сетей представлены на рисунках 4.1 – 4.3.

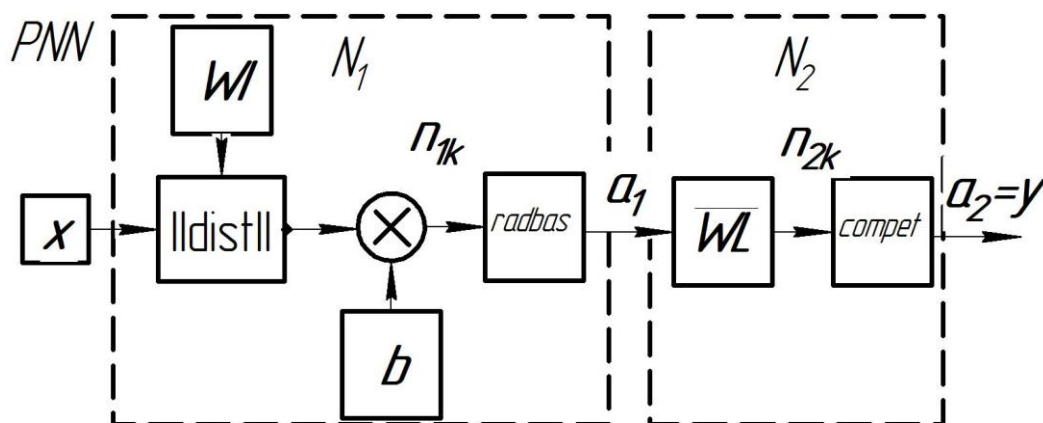


Рисунок 4.1 – Архитектура сети PNN

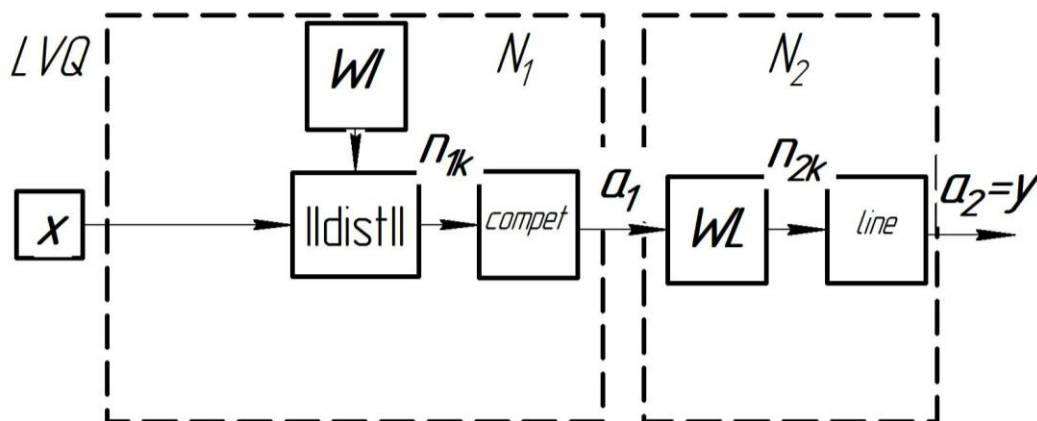


Рисунок 4.2 – Архитектура сети LVQ

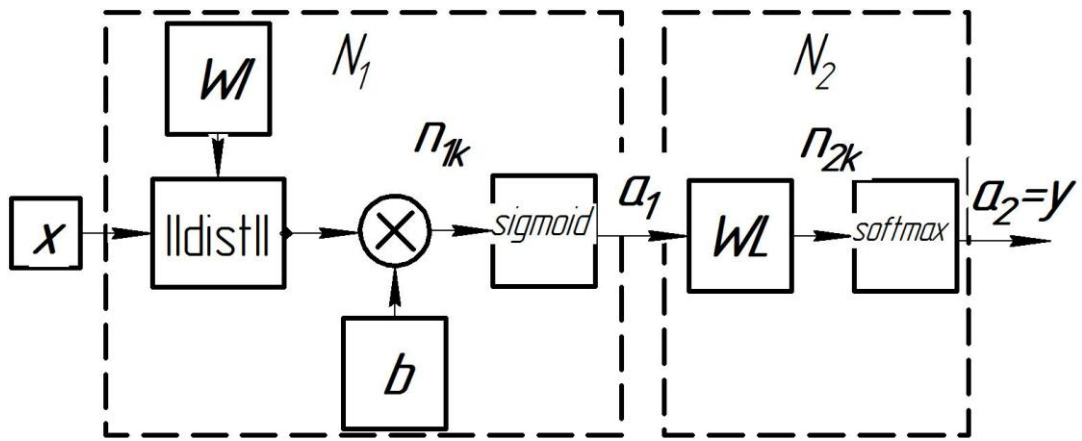


Рисунок 4.3 – Архитектура двухслойной сети прямого распространения

Моделирование нейронных сетей проводилось в пакете прикладных программ MATLAB (рисунок 4.4).

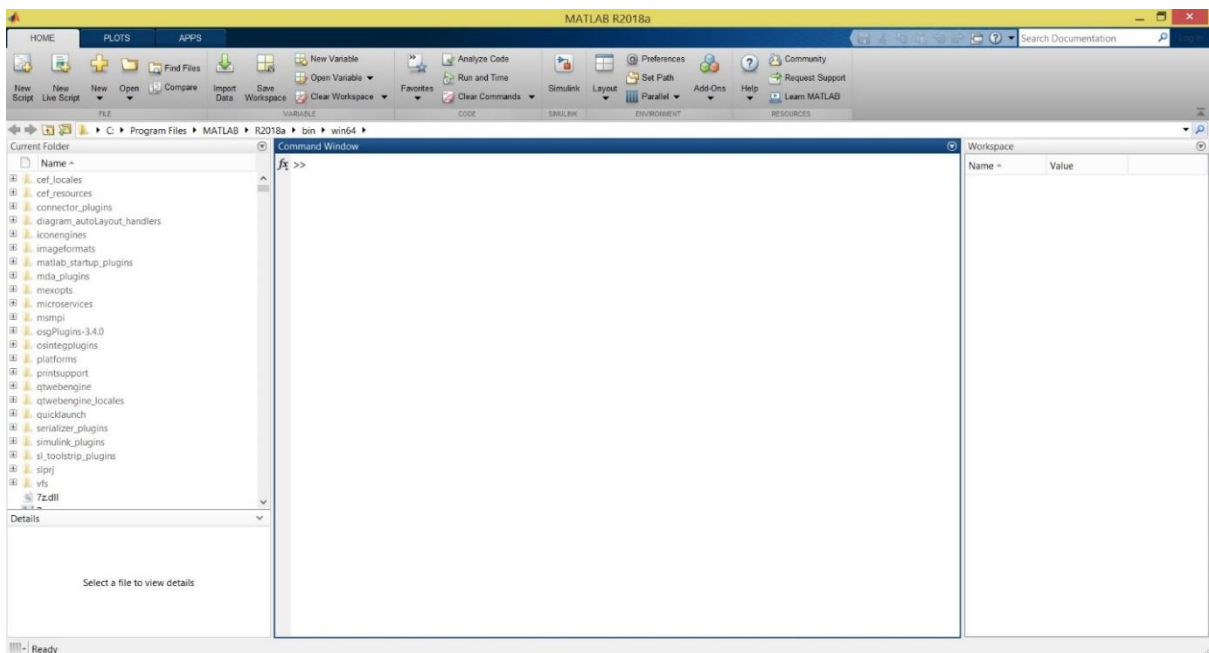


Рисунок 4.4 – Интерфейс MATLAB

Исходные данные для 48 образцов разбиты на обучающую, проверочную и тестовую выборки в пропорции 75–15–10 %. Проверка необходима для исключения переобучения сети. Тестирование проводится для оценки эффективности работы нейронной сети после обучения. В качестве входного вектора для обучения использован вектор  $\mathbf{P}$ ,

представляющий собой матрицу размером 3x36. Данная матрица содержит данные для 36 образцов, включающие следующие параметры: скорость резания на внешнем диаметре  $v = (150; 250; 300; 400)$  м/мин, подача  $s = (0,1; 0,2; 0,3)$  мм/об и глубина резания  $t = (0,1; 0,2; 0,3; 0,4)$  мм. Чтобы свести все числовые значения к одному масштабу, проводится их нормализация по формуле

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4.1)$$

где  $X_i$  – актуальное значение нормализуемого параметра;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – минимальное и максимальное значение параметра соответственно,  $x_i$  – значение параметра после нормализации.

Каждый из образцов соотносится с одним из классов по качеству поверхности: класс 1 для «чистой» поверхности, класс 2 для переходной поверхности и класс 3 для поверхности со следами вибраций. Согласно экспериментальным данным сформирован вектор индексов классов  $Y$  размером 1x36. Данный вектор далее трансформируется в матрицу целевых классов  $T$  размером 3x36.

В случае, если результаты обучения являются неудовлетворительными, часть данных, использованных для проверки и тестирования, перемещается в обучающую выборку, а из неё, в свою очередь, перемещаются данные в проверочную и тестовую выборки взамен предыдущих данных. Алгоритм работы с нейронной сетью изображен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Алгоритм работы с нейронной сетью

После обучения, проверки и тестирования сеть способна верно классифицировать режимы обработки по критериям качества поверхности и типа стружки. Результаты обучения нейронной сети в виде матрицы соответствия представлены на рисунке 4.6.

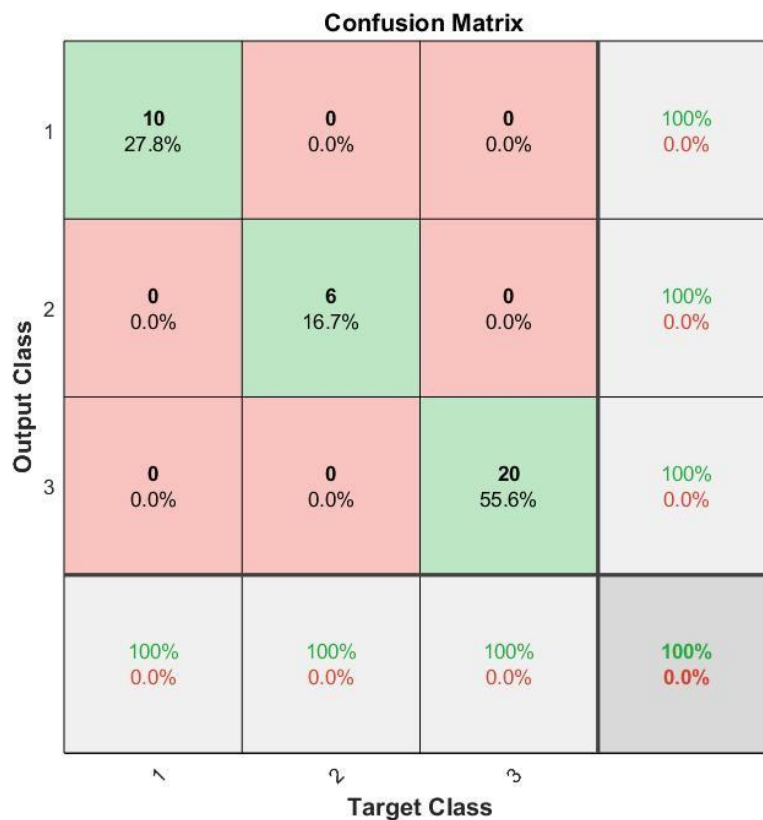


Рисунок 4.6 – Результаты обучения искусственной нейронной сети

Полученный результат может быть использован для разработки приложения, способного правильно подбирать режимы обработки для твердого точения. Программа может оказаться полезной как для оператора станка с ЧПУ, на котором проводится соответствующая обработка, так и для инженера-технолога. Также метод моделирования с использованием искусственных нейронных сетей может быть использован для диагностики процесса резания в режиме реального времени.



## 5 Безопасность и экологичность технического объекта

### 5.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта

Сведения о материалах, операциях и оборудовании, используемом в технологическом процессе, представлены в таблице 5.1 [22].

Таблица 5.1 – Технологический паспорт объекта

Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию	Оборудование, техническое устройство, приспособление	Материалы, вещества
ТП твердого точения	Токарная	Оператор станков с программным управлением, наладчик станков и манипуляторов с программным управлением	Токарный станок с ЧПУ 16Б16Т1С1	Легированная сталь

### 5.2 Идентификация профессиональных рисков

Таблица 5.2 – Идентификация профессиональных рисков

Производственная и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Опасный и/или вредный производственный фактор	Источник опасного и/или вредного производственного фактора
Токарная	Физические: движущиеся машины и механизмы, их незащищенные подвижные части, острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхности заготовок, инструмента и оборудования	Вращающийся шпиндель станка, заготовка и инструмент
	Повышенная температура поверхностей оборудования, материала и инструмента	Поверхность заготовки и инструмента
	Психофизические: перенапряжение анализаторов, повышенные значения напряжения в электрической цепи	Экраны стойки управления, ток в электрической цепи, к которой подключен станок

### 5.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков

Построим таблицу средств защиты от коллективных и индивидуальных опасных факторов (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Методы и средства снижения негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов

Опасный и/или вредный производственный фактор	Организационно-технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и/или вредного производственного фактора	Средства индивидуальной защиты работника
1	2	3
Движущиеся машины и механизмы	Применение специальных ограждений, проведение инструктажа	Костюм для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий, фартук для защиты от общих производственных загрязнений, ботинки кожаные с защитным подноском, наколенники, каска защитная, подшлемник
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	Надежная изоляция электропроводки, наличие предохранителей	Рукавицы комбинированные или перчатки с полимерным покрытием
Острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхности заготовок, инструмента и оборудования	Введение в техпроцесс слесарных переходов по скруглению острых углов и удалению заусенцев	Рукавицы комбинированные или перчатки с полимерным покрытием
Повышенная запыленность, загазованность воздуха рабочей зоны	Введение средств вентиляции, ведение работ в зоне, отделенной от человека, применение пылесборников	Средство индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), очки защитные
Перенапряжение анализаторов	Увеличение времени перерывов	-

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3
Повышенный уровень шума на рабочем месте	Применение звукоизоляционных материалов при изготовлении оборудования	Наушники противошумные или вкладыши противошумные
Повышенный уровень вибрации	Применение демпфирующих опор	Ботинки кожаные с защитным подноском

#### 5.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта

Класс пожара, информация о технических средствах борьбы с пожаром и организационно-технические мероприятия представлены в таблицах 5.4-5.6.

Таблица 5.4 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

Участок, подразделение	Оборудование	Класс пожара	Опасные факторы пожара	Сопутствующие проявления факторов пожара
Токарный	Токарный станок с ЧПУ 16Б16Т1С1	Е	Высокая температура, задымленность, выделение ядовитых и канцерогенных паров при сгорании легкоплавких веществ	Части объектов, разрушившихся при возгорании, распространение тока при повреждении проводки, вредные выбросы в атмосферу из очага пожара из-за повреждения защитных сооружений, отравление окружающей среды средствами ликвидации пожара

Пожару присваивается класс Е, так как электрический шкаф токарного станка с ЧПУ находится под высоким напряжением, что может стать причиной пожара.

Таблица 5.5 – Технические средства обеспечения пожарной безопасности

Первичные средства пожаротушения	Мобильные средства пожаротушения	Стационарные установки системы пожаротушения	Средства пожарной автоматики	Пожарное оборудование
Песок, пенный огнетушитель	Пожарная мотопомпа	Аэрозольная система пожаротушения	Прибор управления пожарный	Пожарный шкаф

Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре	Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)	Пожарные сигнализация, связь и оповещение
Респираторы, промышленные противогазы	Лопата совковая, багор, ведро	Извещатели пожарные

Таблица 5.6 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Наименование технологического процесса	Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий	Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты
ТП твердого точения	Организация пожарной охраны, проведение мероприятий по обучению сотрудников действиям во время пожара, идентификация пожароопасных веществ и определение правил их хранения и транспортировки	Допустимая концентрация легковоспламеняющихся веществ, хранение пожароопасных веществ в отдельном помещении, скорейшая утилизация пожароопасных отходов, наличие температуры и давления воздуха, препятствующего быстрому распространению пламени, установка молниеотводов

### 5.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта

После идентификации антропогенных воздействий технологического процесса на различные среды, составляется перечень мероприятий по предотвращению негативного влияния этих воздействий (таблицы 5.7-5.8).

Таблица 5.7 – Идентификация негативных экологических факторов технического объекта

Наименование технического объекта, производственно-технологического процесса	Структурные составляющие технического объекта, производственно-технологического процесса	Воздействие технического объекта на атмосферу	Воздействие технического объекта на гидросферу	Воздействие технического объекта на литосферу
ТП твердого точения	Токарный станок с ЧПУ 16Б16Т1С1	–	–	Образование отходов в виде стружки стали ХВГ

Воздействия технического объекта на атмосферу и гидросферу отсутствуют, так как технологический процесс твердого точения не требует применения смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Таблица 5.8 – Разработанные организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия технического объекта на окружающую среду

Наименование технического объекта	ТП твердого точения
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на атмосферу	–
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на гидросферу	–
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на литосферу	Сбор, измельчение, брикетирование стружки и дальнейшая отправка в службу приема металлолома для повторного использования

## 5.6 Заключение по разделу «Безопасность и экологичность технического объекта»

1. В разделе «Безопасность и экологичность технического объекта» содержится комплексная характеристика технологического процесса твердого точения, приведены технологические операции, должности

работников, производственно-техническое и инженерно-техническое оборудование, используемые сырьевые технологические и расходные материалы, комплектующие и производимые изделия (таблица 5.1).

2. Осуществлен анализ профессиональных рисков по реализуемому технологическому процессу твердого точения, применяемым технологическим операциям, типам производимых работ (таблица 5.2).

3. Описаны организационно-технические мероприятия, содержащие технические устройства снижения профессиональных рисков, и подобраны необходимые средства индивидуальной защиты работников (таблица 5.3).

4. Приведено описание мероприятий по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. Осуществлена идентификация класса и опасных факторов пожара и разработка средств, методов и мер обеспечения пожарной безопасности (таблица 5.4). Предложены средства, методы и меры обеспечения пожарной безопасности (таблица 5.5). Проанализированы мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на техническом объекте (таблица 5.6).

5. Произведена идентификация экологических факторов (таблица 5.7) и представлены разработанные мероприятия по обеспечению экологической безопасности на техническом объекте (таблица 5.8).

В результате приведенного выше комплексного анализа технологического процесса, реализующего технологию твердого точения, сделан вывод о полном соответствии технического объекта требованиям производственной, пожарной и экологической безопасности.

## 6 Экономическая эффективность работы

### 6.1 Определение содержания и последовательности выполнения научно-исследовательской работы (НИР)

В данном разделе произведены расчеты расходов на применение в технологическом процессе твердого течения технологии моделирования на основе искусственных нейронных сетей [23].

Перечень работ по решению поставленной задачи в выпускной квалификационной работе содержится в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Приводимый перечень работ

Стадии проведения исследований	Этапы научно-исследовательской работы	Содержание проводимых работ
Подготовительная стадия	Выполнение комплекса подготовительных работ	1. Разработка (получение) задания на НИР
		2. Исследование имеющихся решений проблемы. Поиск литературы
Теоретическая разработка	Разработка теоретической части исследования	3. Изучение методики нейросетевого моделирования
		4. Написание обучающего алгоритма
		5. Подготовка исходных данных
Экспериментальные работы	Проведение комплекса экспериментальных работ	6. Осуществление процедуры обучения искусственной нейронной сети с последующими улучшениями параметров и архитектур
Заключительная стадия	Обобщение, выводы и предложения	7. Анализ и сопоставление полученной информации
		8. Оформление результатов исследований
		9. Заключение по итогам моделирования

### 6.2 Определение трудоёмкости и длительности цикла выполнения работ

Трудоёмкость:

$$T = f D_{\text{ц}} \times P, \text{ дни;} \quad (6.1)$$

где  $D_{\text{ц}}$  – длительность цикла выполнения научно-исследовательской работы, дни;  $P$  – количество участников.

Ожидаемая трудоёмкость:

$$T_{\text{ож}} = 3T_{\text{min}} + 2T_{\text{max}} / 5, \text{ дни;} \quad (6.2)$$

где  $T_{\min}$  – оптимистическая оценка трудоёмкости, дни;  $T_{\max}$  – пессимистическая оценка трудоёмкости, дни.

Ожидаемая трудоёмкость исполнения каждого этапа вычисляется суммированием трудоёмкости исполнения входящих в данный этап работ.

Длительность цикла выполнения:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{ож}} / P, \text{ дни}; \quad (6.3)$$

где  $T_{\text{ож}}$  – ожидаемая трудоёмкость.

Результаты расчётов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Расчёт трудоёмкости и длительности цикла выполнения работ

№ этапов	№ работ	Трудоёмкость выполнения работ, дней			Численность работников			Длительность выполнения работ и этапов с учётом численности работников, дней
		$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\text{ож}}$	Руков. проекта	Студент	Итого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	5	10	7	1		1	7
	2	28	33	30		1	1	30
Итого				37				37
2	3	18	23	20		1	1	20
	4	10	15	12	1	1	2	12
	5	5	10	7	1	1	2	7
Итого				39				39
3	6	10	15	12		1	1	12
Итого				12				12
4	7	5	10	7		1	1	7
	8	5	10	7		1	1	7
	9	4	9	6	1	1	2	6
Итого				20				20
Всего				108				108

Таким образом, ожидаемая трудоёмкость исполнения всей совокупности научно-исследовательских работ составляет 108 человеко-дней и длительность цикла выполнения работ с учётом численности исполнителей составляет 108 дней.

Для создания сетевого графика приведем перечень событий и работ, необходимых для выполнения научно-исследовательской работы, который представлен в Приложении Б.



### 6.3 Расчёт сроков свершения событий до оптимизации сетевого графика

Ранние сроки свершения события:

$$T_{pi+1} = T_{pi} + D_{i- i+1} , \text{ дни} \quad (6.4)$$

где  $T_{pi}$  – ранний срок совершения события, из которого выходит работа, дни;  $D_{i- i+1}$  – продолжительность выполнения работы, дни.

Поздние сроки свершения события:

$$T_{ni+1} = T_{ni} - D_{i- i-1} , \text{ дни} \quad (6.5)$$

где  $T_{ni}$  – поздний срок совершения последующего события, дни.

Резервы события:

$$R_i = T_{ni} - T_{pi} , \text{ дни} \quad (6.6)$$

Длительность путей:

$T_1 = 0-2-3-4-6-8-9 = 30 + 20 + 12 + 12 + 7 + 6 = 87$  дней – критический (max);

$T_2 = 0-1-3-5-6-7-9 = 7 + 0 + 7 + 0 + 7 + 0 = 21$  день – не напряжённый.

Длительность оптимального пути:

$$T_{\text{опт}} = \frac{\sum_i^m T_i}{m} , \text{ дни;} \quad (6.7)$$

где  $T_i$  – длительность пути, дни;  $m$  – количество путей.

Сетевой график до оптимизации представлен на рисунке 6.1.

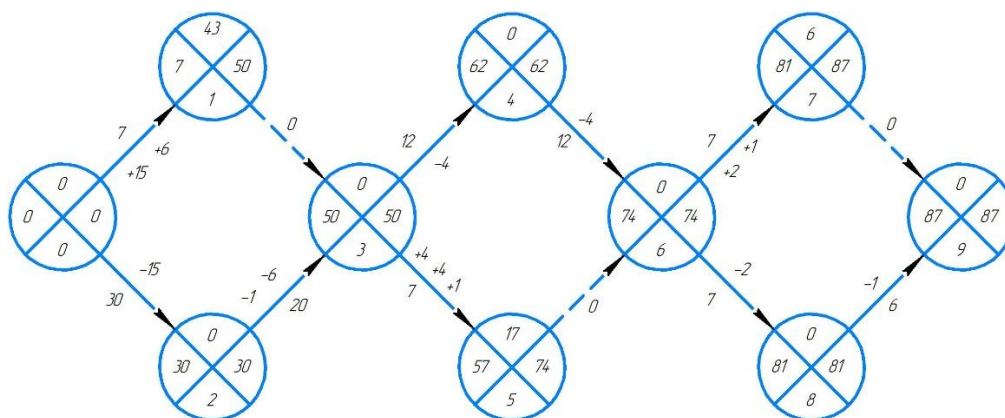


Рисунок 6.1 – Сетевой график до оптимизации

Сетевой график после оптимизации представлен на рисунке 6.2.

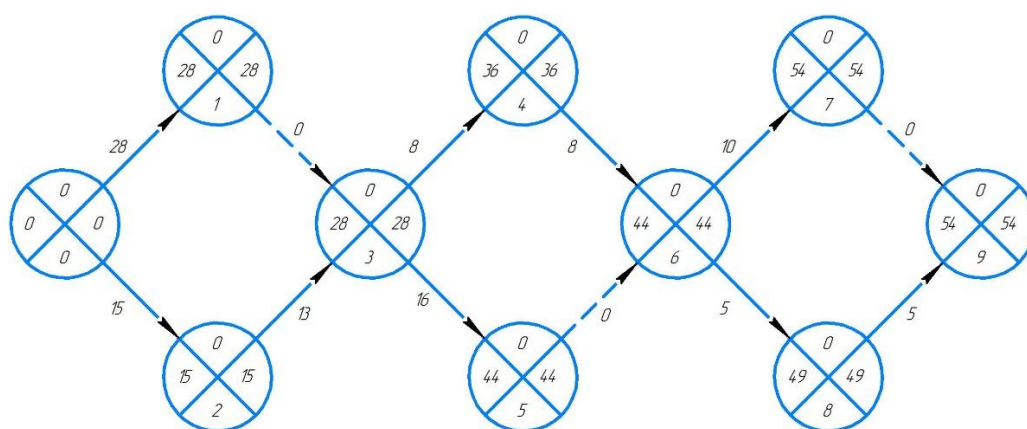


Рисунок 6.2 – Сетевой график после оптимизации

#### 6.4 Определение затрат на НИР

Затраты на проведение НИР в данном случае включают в себя текущие затраты на проведение исследований, которые определяются по формуле:

$$C_{\text{НИР}} = Z_{\text{пл}} + H_{\text{зпл}} + P_{\text{э}} + C_{\text{об}}, \text{ руб.}; \quad (6.9)$$

где  $Z_{\text{пл}}$  – затраты на заработную плату, руб. (Приложение В);  $H_{\text{зпл}}$  – отчисления на социальное страхование (30,0% к заработной плате), руб;  $P_{\text{э}}$  – стоимость потребляемых энергетических ресурсов, руб;  $C_{\text{об}}$  – стоимость оборудования, в данном случае  $C_{\text{об}} = 50000$  руб. – стоимость стационарного компьютера и программного обеспечения.

$$C_{\text{НИР}} = 59769 + 17930,7 + 86,56 + 50000 = 127786,26 \text{ руб.}$$

Приведенная сумма незначительна, поскольку данное исследование способствует прогрессу в управлении процессом твердого точения, дает возможность повысить качество выпускаемой продукции в части уменьшения шероховатости поверхности и сократить количество бракованных деталей в 3 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы выполнены следующие задачи:

1. Изучена актуальная научная литература по искусственным нейронным сетям;
2. Изучены основные проблемы, связанные с технологией твердого точения;
3. Проведен эксперимент по твердому точению;
4. Проведено нейросетевое моделирование полученных экспериментальных данных;
5. Выполнен анализ безопасности и экологичности технического объекта;
6. Выполнен расчет экономической эффективности.

Успешно разработана нейросетевая модель классификации режимов обработки при твердом точении по критериям качества поверхности и типа получаемой при резании стружки. В результате подтверждена возможность эффективного применения нейросетевого моделирования для анализа закономерностей процессов обработки, в частности твердого точения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. McCulloch, W. S. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity / W. S. McCulloch, W. H. Pitts // Bull. Math. Biophysics – 1943. – Vol. 5. P. 115–119.
3. Zare Chavoshi, S. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool / S. Zare Chavoshi, M. Tajdari // Int J Mater Form – 2010. – Vol. 3. P. 233–239.
4. Gajate, A. Tool wear monitoring using neuro-fuzzy techniques: a comparative study in a turning process / A. Gajate, R. Haber, R. del Toro et al // J Intell Manuf – 2012. – Vol. 23. P. 869–882.
5. Balic, J. Neural-Network-Based Numerical Control for Milling Machine / J. Balic // Journal of Intelligent and Robotic Systems – 2004. – Vol. 40. P. 343–358.
6. Cruz, C.E.D. Monitoring in precision metal drilling process using multi-sensors and neural network / C.E.D. Cruz, P.R. de Aguiar, Á.R. Machado, et al // Int J Adv Manuf Technol – 2013. – Vol. 66. P. 151–158.
7. Rao, K.V. An artificial neural network approach to investigate surface roughness and vibration of workpiece in boring of AISI1040 steels / K.V. Rao, K.P. Vidhu, T.A. Kumar, et al // Int J Adv Manuf Technol – 2016. – Vol. 83. P. 919–927.
8. Козочкин, М.П. Исследование виброакустического сигнала в момент врезания при обработке закаленных сталей / М.П. Козочкин, А.Е. Селезнев // Вестник МГТУ Станкин – 2015. – № 4. С. 52–58.
9. Rigal, J.F. Saw tooth chip formation in hard turning and the approach to separate process segmentation and machine assembly vibration frequencies / J.F.

Rigal, M. Zapciu, T. Mabrouki, S. Belhadi // Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS. – USA: Editura Academiei Române, 2006. – P. 133–136.

10. Ko, T. J. Air-Oil Cooling Method for Turning of Hardened Material / T. J. Ko, H. S. Kim, B. G. Chung // International Journal of Advance Manufacturing Technology – 1999. – Vol. 15, Issue 7. P. 470–477.

11. Boothroyd, G. Fundamentals of Machining and Machine Tools: third edition / G. Boothroyd, W. A. Knight // CRC Taylor & Francis – 2005. P. 121–173.

12. Guo, Y. B. Hard turning versus grinding-the effect of process-induced residual stress on rolling contact / Y. B. Guo, D. W. Yen // Wear – 2004. – Vol. 256, Issues 3-4. P. 393–399.

13. Harrison, I. S. Detecting white layer in hard turned components using non destructive methods / I. S. Harrison // Masters thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology – 2004. P. 11–39.

14. Wu, D. W. Effect of hardness on residual stresses in orthogonal machining of AISI 4340 steel / D. W. Wu, Y. Matsumoto // Journal of Engineering for Industry – 1990. – Vol. 112, Issue 3. P. 245–252.

15. Matsumoto, Y. Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning / Y. Matsumoto, F. Hashimoto, G. Lahoti // CIRP Annals-Manufacturing Technology – 1999. – Vol. 48, Issue 1. P. 59–62.

16. Konig, W. Machining hard materials with geometrically defined cutting edges field of applications and limitations / W. Konig, M. Klinger, R. Link // Annals of the CIRP – 1990. – Vol. 39, Issue 1. P. 61–64.

17. Lei, S. Experimental Investigation of Thermo-Mechanical Characteristics in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics / S. Lei,

Y. C. Shin, F. P. Incropera // Journal of Manufacturing Science & Engineering – 2001. – Vol. 123, Issue 4. P. 639–646.

18. Stanimir, A. Chip formation and cutting force in the machining of hardened RUL IV steel / A. Stanimir, I.-C Pascu, Ş. Buzatu, I. Geonea // Annals of the ORADEA University, Fascicle of Management and Technological Engineering – 2008. – Volume VII (XVII). P. 1812–1817.

19. Lin, H. M. Wear behavior in turning high hardness alloy steel by CBN tool / H. M. Lin, Y. S. Liao, C. C. Wei // Wear – 2008. – Vol. 264, Issues 7-8. P. 679–684.

20. El-Wardany, T. I. Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part 1: Micrographical Analysis / T. I. El-Wardany, H. A. Kishawy, M. A. Elbestawi // Journal of Manufacturing Science and Engineering – 2000. – Vol. 122, Issue 4. P. 620-631.

21. Расторгуев, Д.А. Исследование твердого точения стали ХВГ / Д.А. Расторгуев, А.А. Севастьянов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета – 2018. – №4 (46). С. 24–32.

22. Горина, Л.Н. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта». Уч.-методическое пособие / Л.Н. Горина, М.И. Фесина. – Тольятти : изд-во ТГУ, 2016. – 51 с.

23. Зубкова, Н.В. Методические указания по расчету экономической эффективности / Н.В. Зубкова. – Тольятти : изд-во ТГУ, 2019. – 52 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Научная статья

УДК 621.941  
doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-24-32

© 2018

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОЧЕНИЯ СТАЛИ ХВГ

*Д.А. Расторгуев*, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств»  
*А.А. Севастьянов*, студент Института машиностроения  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** твердое точение; сталь ХВГ; стружкообразование; режимы резания; типы стружки; стружка надлома; сливная стружка; стружка переходного типа; качество поверхности; станки с ЧПУ.

**Аннотация:** Представлены результаты эксперимента по обработке кольцевых заготовок из стали ХВГ, предварительно закаленных до твердости HRC 55. Данный материал применяется для изготовления режущего и мерительного инструмента с высокими требованиями к точности размеров и отсутствию коробления после термической обработки. Эксперимент представлял собой подрезку торца кольца на станке модели 16B16T1C1 резцом, оснащенный пластиной из кубического нитрида бора без применения смазывающе-охлаждающей жидкости. В ходе трехфакторного эксперимента варьировали скорость резания, подачу и глубину резания. Для более широкого промышленного применения твердое точение требует дополнительных исследований, связанных с изучением особенностей формирования стружки, выявления зависимостей сил резания и температуры в зоне резания от режима обработки. Исследовался процесс стружкообразования и качество обработанной поверхности. Проведена систематизация видов стружки в зависимости от режимов резания. Основным технологическим фактором, определяющим вид стружки, является скорость резания. При ее возрастании вид стружки меняется от сливной, через переходную форму, к стружке надлома. При увеличении вида стружки видно отчетливое разделение стружки на сегменты. Они при увеличении скорости резания становятся более выраженными, что ведет к изменению ее характера. При критическом значении скорости стружка от элементной переходит к стружке надлома. Динамическая составляющая силы резания, связанная с процессом стружкообразования, при этом растет. Такое изменение динамики процесса резания сопровождается соответствующими следами от инструмента на обработанной поверхности. Устойчивый характер стружкообразования способствует формированию поверхности с регулярным микрорельефом минимальной высоты. Повышение динамичности стружкообразования при увеличении скорости резания приводит к формированию муара на обработанной поверхности. Выявлены оптимальные с точки зрения производительности, качества поверхности и типа стружки режимы обработки. Полученные результаты могут быть использованы для организации автоматизированного производства с использованием станков с ЧПУ и автоматических линий.

#### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в машиностроении, в том числе в автомобильном, наметилась тенденция перехода к использованию высокопрочных и твердых материалов. Обработка таких заготовок представляет собой сложный технологический процесс, требующий в классическом исполнении применения малопродуктивного и дорогого шлифовального оборудования. Шлифовальные операции проводятся, как правило, с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), что относит их к области экологически вредных производств. К тому же они имеют ограничение по номенклатуре обрабатываемых изделий и поверхностей. С целью повышения производительности и снижения себестоимости продукции предприятия используют технологично «сухой» и твердой лезвийной обработки металлов, частным случаем которой является твердое точение [1; 2]. Повсеместное внедрение данного метода обработки в промышленности затруднено ввиду отсутствия достаточного количества экспериментальных данных, справочной информации. Исследование призвано частично восполнить существующую нехватку информации о твердом точении.

Процесс твердого точения имеет ряд особенностей, отличающих его от обработки пластичных материалов. Это связано с тепловым потоком, который локализуется в зоне сдвига. В работе [3] приводятся результаты экспериментальных данных, свидетельствующих о зависимости силы резания от вида подложки режущего ин-

струмента, при помощи которой регулировали тепловод от реза. Различие сил резания составило 40%. Жесткость технологической системы должна быть высокой, причем по всем осям, не только для исключения автоколебаний, но и для сохранения заданной точности обработки, что в условиях твердого точения выполнить сложнее из-за больших сил резания [4].

Устойчивость процесса обработки определяется конкретным температурным режимом в зоне резания, нарушение которого из-за изменения физико-механических свойств материала заготовки может привести к автоколебаниям. Поэтому для устойчивого процесса резания температурный режим в зоне резания должен быть стабильным. В работе [5] даны результаты исследования зависимостей силы резания от режимов обработки по твердому точению для ряда материалов, включая сталь ХВГ с твердостью до HRC 50. Для скоростей резания всех материалов наблюдается минимум силы резания для значений в районе 370...400 м/мин. Для управления температурным режимом обработки с целью снижения шероховатости и повышения стойкости могут использоваться резы со встроенной системой охлаждения [6]. Одним из диагностических каналов процесса твердого точения может быть виброакустическая диагностика [7; 8], которая применяется для контроля состояния инструмента.

В работе [9] исследован процесс твердого точения стали ХВГ с оптимизацией режимов обработки при помощи инструмента из высокопрочной композиционной



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Перечень событий и работ по выполнению НИР

Таблица Б.1 – Перечень событий и работ по выполнению НИР

№ событий	Наименование работ и событий	Шифр работ	Продолжительность работ, дни
0	Принято решение о проведении научно-исследовательской работы		
1	1. Разработка (получение) задания на НИР	0-1	7
2	2. Исследование имеющихся решений проблемы. Поиск литературы	0-2	30
3	3. Изучение методики нейросетевого моделирования	2-3	20
4	4. Написание обучающего алгоритма	3-4	12
5	5. Подготовка исходных данных	3-5	7
6	6. Осуществление процедуры обучения искусственной нейронной сети с последующими улучшениями параметров и архитектур	4-6	12
7	7. Анализ и сопоставление полученной информации	6-7	7
8	8. Оформление результатов исследований	6-8	7
9	9. Заключение по итогам моделирования	8-9	6



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Штатное расписание исполнителей и расчет фонда заработной платы

Таблица В.1 – Штатное расписание исполнителей и расчет фонда заработной платы

Наименование должностей	Численность (чел.)	Месячный оклад (руб.)	Средняя дневная ставка (руб.)	Количество отработанных дней	Сумма заработной платы, руб.
Научный руководитель	1	30000	1153,85	32	36923
Студент	1	11000	423,08	54	22846
Итого					59769