

*На правах рукописи*



ВОРОНИН ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
СМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ  
ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2024

Работа выполнена на кафедре «Станки и инструменты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Научный руководитель **Артамонов Евгений Владимирович**,  
заслуженный работник высшей школы РФ, доктор  
технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Мокрицкий Борис Яковлевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (г. Комсомольск-на-Амуре),  
профессор кафедры «Машиностроение»

**Янов Евгений Сергеевич**  
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула), заместитель директора передовой инженерной школы «Тульская инженерная школа «Интеллектуальные оборонные системы»

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»**,  
(г. Москва)

Защита состоится «17» декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.417.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, учебный корпус 9, ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-01/voronin-vv-24-2-417-01>

Автореферат разослан «22» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Анцев Александр Витальевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Назначение режимов резания, обеспечивающих максимальную работоспособность сменных режущих твердосплавных пластин (СРТП) сборных резцов, т.е. минимальный относительный поверхностный износ резца по задней поверхности  $h_{onz}$  при минимальной главной составляющей силы резания  $P_z$ , требуется при точении крупногабаритных деталей газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых сталей и сплавов, когда необходимо обеспечить достаточную стойкость для завершения обработки за проход. Назначение режимов резания при освоении новых изделий или возобновлении производства осложняется отклонением механических свойств материала заготовок между партиями металла и широкой номенклатурой применяемых на производстве СРТП. Влияние высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала на вид стружки проявляется через выходные параметры процесса резания: температуру в зоне резания, относительный поверхностный износ по задней поверхности, главную составляющую силы резания  $P_z$ , среднеквадратичное значение (СКЗ) главной составляющей виброускорения  $A_z$ , позволяющие формировать условия максимальной работоспособности (УМР) СРТП сборных резцов на основе изменения скорости резания. Известные способы экспериментального назначения режимов резания требуют участия человека при проведении длительных, ресурсоемких исследований. Разработка метода определения и поддержания диапазона скоростей резания, формирующего УМР СРТП сборных резцов, реализуемого в автоматической системе управления скоростью резания при точении, является **актуальной научной задачей**.

**Степень разработанности темы.** Созданию методов адаптивного управления, диагностике станочного оборудования, повышению эффективности процесса резания металлов и режущего инструмента посвятили свои работы: Анцев А.В., Базров Б.М., Балакшин Б.С., Безъязычный В.Ф., Бобров В.Ф., Васин С.А., Верещака А.С., Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Грубый С.В., Древаль А.Е., Заковоротный В.Л., Зорев Н.Н., Игнатьев С.А., Кабалдин Ю.Г., Каширин А.И., Козочкин М.П., Колесов И.М., Коротков А.Н., Кузнецов В.А., Кутин А.А., Куц В.В., Лобанов Д.В., Лолодзе Т.Н., Макаров А.Д., Макаров В.Ф., Митрофанов В.Г., Мокрицкий Б.Я., Молодцов В.В., Мурашкин С.Л., Петухов Ю.Е., Подураев В.Н., Попов А.Ю., Резников А.Н., Реченко Д.С., Сабиров Ф.С., Силин С.С., Соломенцев Ю.М., Табаков В.П., Утешев М.Х., Шадский Г.В., Шаламов В.Г., Якубов Ч.Ф., Ямников А.С., Ямникова О.А., Янюшкин А.С.

Степень разработанности темы по применению вибрации сборного резца в качестве диагностического параметра процесса точения труднообрабатываемых сталей и сплавов на данном этапе не позволяет сделать выводов по способу использования вибрационных характеристик (виброперемещение, виброускорение) сборного резца при точении для назначения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов.

**Целью диссертационной работы** является формирование условий максимальной работоспособности СРТП сборных резцов в автоматическом режиме

при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе математического анализа вибрационных характеристик резца с использованием явления высокотемпературного охрупчивания обрабатываемых материалов.

#### **Задачи работы:**

1. Провести анализ текущего состояния научной задачи и установить необходимую совокупность теоретических основ для проведения экспериментальных исследований и интерпретации полученных данных.

2. Исследовать взаимосвязь главной составляющей силы резания  $P_z$  и главной составляющей виброускорения  $A_z$  сборного резца при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов в зависимости от скорости резания.

3. Исследовать взаимосвязь между виброускорением  $A_z$  резца, относительным удлинением обрабатываемых материалов  $\delta$ , видом стружки, относительным износом СРТП сборных резцов по задней поверхности  $h_{онз}$  и скоростью резания.

4. Разработать метод формирования условий максимальной работоспособности СРТП сборных резцов на основе явления высокотемпературного охрупчивания обрабатываемых материалов посредством математического анализа зависимости главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания при точении.

5. Разработать прототип системы автоматического определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов.

**Объектом исследования** является процесс точения деталей из труднообрабатываемых материалов (жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей и сплавов) сборными резцами с СРТП.

**Предметом исследования** является взаимосвязь вибрационных характеристик сборных резцов с СРТП и условий их максимальной работоспособности при точении.

#### **Научная новизна**

1. Установлена взаимосвязь между диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов, и изменением величины СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  при разных скоростях резания в процессе точения деталей из ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов в зоне высокотемпературного охрупчивания.

2. Установлена взаимосвязь между минимальными значениями главной составляющей силы резания  $P_z$ , относительным поверхностным износом резца по задней поверхности  $h_{онз}$ , изменением вида стружки и диапазоном скоростей резания, определенном по зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания.

3. На основании математического анализа установлено наличие критических точек зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения от скорости резания, позволяющих определить границы диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, при точении деталей из ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов в зоне высокотемпературного охрупчивания.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в обусловленном с точки зрения классической механики применении установленной взаимосвязи СКЗ главной составляющей виброускорения и скорости резания для диагностики процесса точения. На основе математического анализа установленной взаимосвязи определены точки, ограничивающие диапазон скоростей резания, обеспечивающий условия максимальной работоспособности СРТП сборных резцов.

#### **Практическая значимость**

1. Разработана методика определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, на основе математического анализа зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения  $A_z$  резца от скорости резания при точении деталей из ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

2. Разработан алгоритм математического анализа зависимости главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания, позволяющий определить диапазон скоростей резания, обеспечивающий УМР СРТП сборных резцов в автоматическом режиме.

3. Разработан прототип системы автоматического определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, на основе математического анализа зависимости главной составляющей виброускорения резца от скорости резания при точении ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

4. Результаты работы в виде методики формирования УМР СРТП сборных резцов, а также в виде прототипа автоматической системы определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, внедрены в производство.

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

1. Установленные взаимосвязи УМР СРТП сборных резцов и диапазонов скоростей резания, определенных в результате математического анализа зависимостей СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания при точении ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

2. Разработанный алгоритм математического анализа зависимости главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания и разработанный на его основе прототип системы автоматического определения и поддержания скорости резания, обеспечивающей УМР СРТП сборных резцов в процессе точения.

3. Разработанный метод формирования УМР СРТП сборных резцов на основе установленной зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения  $A_z$  резца от скорости резания при точении деталей из ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

**Методы исследования.** Анализ результатов исследований различных школ резания металлов и режущих инструментов, а также экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях. Обработка экспериментальных данных при помощи ПО «Matlab» с применением инструментов математического анализа и авторского программного обеспечения на языке «С».

Опытно-конструкторские работы, проводимые автором для создания системы автоматического управления скоростью резания.

**Степень достоверности полученных результатов.** Доказательства научной гипотезы, выводы и рекомендации, сформулированные автором, подтверждаются совокупностью фундаментальных теоретических положений следующих наук: теория резания, физика твердого тела, материаловедение, вибродиагностика. При проведении экспериментов использовались поверенные и прошедшие аттестацию измерительные приборы и их комплексы. Полученные в результате исследований данные показали повторяемость и системность в совокупности аналогичных, но независимых экспериментов. Результаты исследований не противоречат данным, полученным известными методами.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки», п. 6 «Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования» паспорта научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

**Личный вклад автора** заключается в проведении экспериментальных исследований и анализе полученных данных. Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве заключается в разработке и практической реализации метода формирования УМР СРТП сборных резцов, реализованного в прототипе автоматической системы управления скоростью резания в виде способа сбора данных и алгоритма их математической обработки. Основные положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались автором на 13 научно-технических конференциях ТИУ (2019 – 2023, Тюмень); «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, 2021, Екатеринбург); «Физика. Технологии. Инновации» (УРФУ, 2020, 2022, Екатеринбург); «Инновации в машиностроении – 2022» (АлГТУ, 2022, Барнаул); «Современные проблемы машиностроения» (ТПУ, 2022, Томск); «Инновации. Интеллект. Культура.» (ТИУ, 2023, Тобольск); «Наукоемкие технологии в машиностроении» (МГТУ им. Баумана, 2023, Москва), заседании кафедры инструментальной техники и технологии формообразования (МГТУ «СТАНКИН», 2024, Москва), расширенном научно-техническом семинаре кафедр станков и инструментов и технологии машиностроения (ФГБОУ ВО ТИУ, 2023, Тюмень).

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 1 публикация в издании, включенном в систему цитирования Scopus, 1 патент РФ на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Общий объем опубликованных работ 5,72 п.л, в том числе авторских 4,21 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 146 наименований. Основной текст содержит 149 страниц машинописного текста, включает 114 рисунков, 4 таблицы и 10 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы исследования, цель и задачи диссертационной работы, изложено ее краткое содержание.

**В первой главе** проанализированы известные методы оптимизации процесса резания металлов, в том числе, взаимосвязь температуры в зоне резания, относительного поверхностного износа резца, главной составляющей силы резания и скорости резания. Проанализировано понятие работоспособности инструмента как комплексного критерия по ГОСТ 25751-83 (рис. 1). При проведении экспериментов в рамках данной работы, все прочие исходные данные, кроме диапазона скоростей резания, были взяты из нормативных документов и рекомендаций, используемых в производстве, на базе которого проводились исследования.

Чертеж детали и обрабатываемый материал заданы картой эскизов конструкторского отдела. Вид инструмента, вид обработки и марка инструментального твердого сплава определены картой механической обработки. Геометрия инструмента, инструментальный твердый сплав, глубина резания и подача оставались неизменными и были назначены по стандартной методике технологического отдела ПАО «Тюменские моторостроители» (на основе Справочника технолога-машиностроителя А. Г. Косиловой). Область экспериментальных исследований в рамках данной работы – назначение диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов при точении ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов (рис. 2).



**Рисунок 1 – Работоспособность инструмента согласно ГОСТ 25751-83**



**Рисунок 2 – Блок-схема области экспериментальных исследований в рамках данной работы**

Рассмотрено текущее состояние вопроса по использованию вибрации резца в качестве диагностического параметра процесса резания.

Во второй главе проанализированы различия хрупкого и вязкого разрушения сталей и сплавов, основные механические характеристики, влияющие на процесс резания металлов. Установлено, что для ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов имеет место диапазон высоких температур, характеризующийся минимальными значениями относительного удлинения  $\delta$  образца при испытании на растяжение – явление носит название высокотемпературное охрупчивание (рис. 3). Зависимости, показанные на рис. 3, построены по результатам анализа справочных данных<sup>1</sup>.

Диапазон скоростей резания, вызывающий высокотемпературное охрупчивание, можно определить по изменению вида стружки. Однако, данный метод невозможно положить в основу системы автоматического управления. Поэтому, стоит задача – разработать метод, позволяющий устанавливать диапазон скоростей резания, обеспечивающих УМР СРТП сборных резцов, на основе высокотемпературного охрупчивания, который можно положить в основу автоматической системы, то есть не требующей участия человека.

Рассмотрим колебания вершины резца с точки зрения классической механики в следующей системе: резец представляет собой консольную балку (рис. 4), на свободный конец которой вертикально воздействует внешняя периодическая сила (составляющая  $P_z$ ). В рамках анализа взаимосвязи допустим, что  $P_z$  изменяется по гармоническому закону  $P_z = P_0 \cos(\omega t)$ , а вершина резца совершает прямолинейные колебания, поскольку смещение вершины от положения равновесия мало по сравнению с длиной вылета. Уравнение динамики для описания колебаний такой системы примет вид (1):

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2\beta \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = \frac{P_0}{m} \cos(\omega t), \quad (1)$$

где  $z$  – смещение от положения равновесия;  $\beta = b/2m$ ;  $b$  – коэффициент сопротивления среды;  $\omega_0^2 = k/m$  – собственная частота свободных незатухающих колебаний осциллятора;  $k$  – коэффициент жёсткости;  $P_0$  – амплитуда внешней

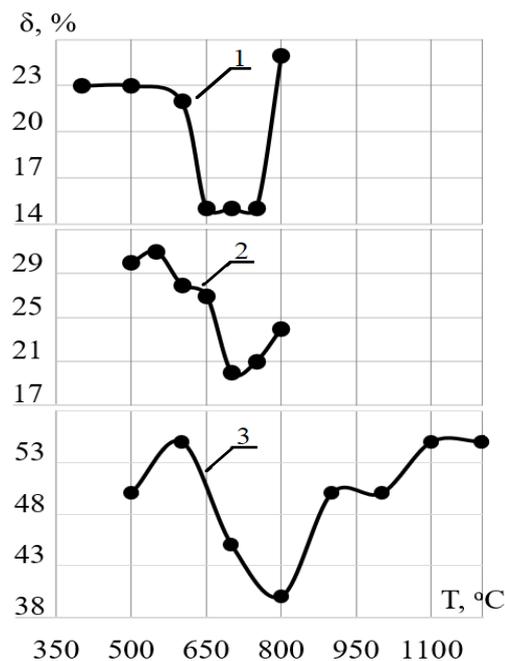


Рисунок 3 – Зависимости относительного удлинения  $\delta$  сталей и сплавов от температуры:  
1 – 10X11H23T3MP;  
2 – 12X18H10T; 3 – ХН60ВТ

<sup>1</sup> Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы, 1969;

Масленников С. Б. Стали и сплавы для высоких температур, 1991;

Либерман Л. Я. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении, 1955.

силы;  $m$  – масса,  $\omega$  – циклическая частота внешней силы. ( $b = const, k = const$ , поскольку считаем систему линейной)

Таким образом, согласно положениям классической механики Ньютона, каждая гармоника спектра составляющей силы резания  $P_z$  должна выступать в качестве вынуждающей силы колебаний вершины резца  $a_z$ , следовательно, частотный состав спектров колебаний силы  $P_z$  и вибрации вершины резца  $a_z$  в области вынужденных колебаний должен содержать аналогичные гармоники.

Учитывая вышеизложенное, сформулирована научная гипотеза, что формирование УМР СРТП сборных резцов при точении возможно путем определения диапазона скоростей резания (температур резания), обеспечивающего изменение механических свойств обрабатываемого материала в результате высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала, приводящего к изменению вида стружки со сливной в элементную, что определяет состав колебаний главной составляющей  $P_z$  и связанной с ней главной составляющей виброускорения  $A_z$ .

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований колебаний составляющей  $P_z$  силы резания при точении.

Для оцифровки и записи временного сигнала колебаний составляющей  $P_z$  автором был применен проксиметр в системе с резцом, выступающим в качестве упругого элемента (рис. 4). Зависимость смещения  $\Delta z$  резца от силы  $P_z$  была получена экспериментально с помощью эталонного механического динамометра и индикатора часового типа повышенной точности, установленного вместо проксиметра (рис. 5, «эксперимент») и подтверждена расчетом (рис. 5, «теория») согласно теории о сопротивлении материалов (2):

$$\Delta z = \frac{6P_z L^3}{Edh^3}, \quad (2)$$

где  $L$  – вылет резца,  $E$  – модуль Юнга,  $d$  – ширина державки,  $h$  – высота державки.

Зависимости, показанные на рис. 5, обосновывают правомерность использования проксиметра для исследования колебаний  $P_z$  в процессе резания (рис. 6). Данный способ позволяет оцифровать колебания  $\Delta z$  в диапазоне частот от 0 Гц до 10 кГц и получить  $P_z$  по формуле (2) при условии постоянства параметров  $L, E, d, h$ . Ряд экспериментов с одновременной

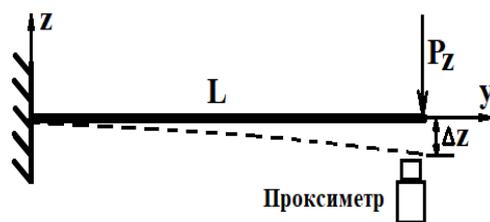


Рисунок 4 – Схема размещения проксиметра для регистрации смещения резца под действием  $P_z$

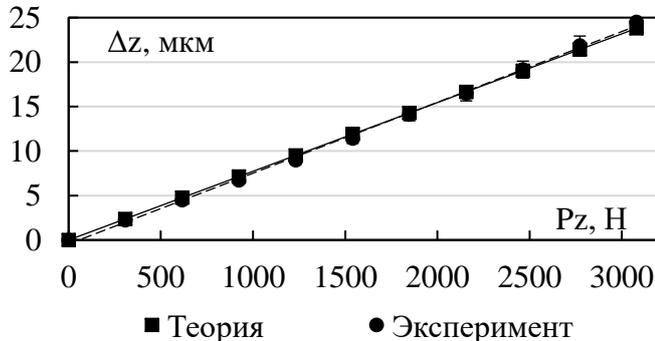


Рисунок 5 – Сравнение экспериментального и расчетного смещения вершины резца под нагрузкой

экспериментов с одновременной записью колебаний главной составляющей

силы резания  $P_z$  (проксиметр) и главной составляющей виброускорения  $A_z$  (акселерометр) показал наличие одинаковых гармоник в составе спектров данных сигналов (рис. 7).

В качестве инструмента математического анализа для поиска одинаковых частотных компонент сигналов  $P_z$  и  $A_z$  была использована функция когерентности, результат расчета приведен на рис. 7.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют взаимосвязь главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  и главной составляющей силы резания  $P_z$ , а также обоснованность применения виброускорения резца для диагностики процесса точения.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований вибрации резца при точении деталей из ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

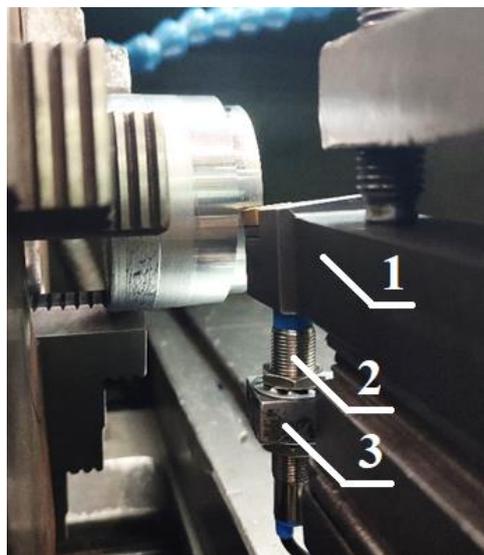


Рисунок 6 – Установка проксиметра при точении: 1 – резец; 2 – проксиметр; 3 – кронштейн

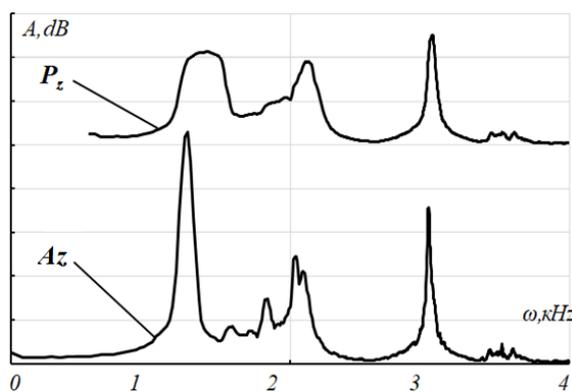


Рисунок 7 – Взаимосвязь частотного состава спектров  $P_z$  и  $a_z$ , записанных одновременно при точении (14X17H2, T15K6,  $t = 0,5$  мм,  $s = 0,2$  мм/об)

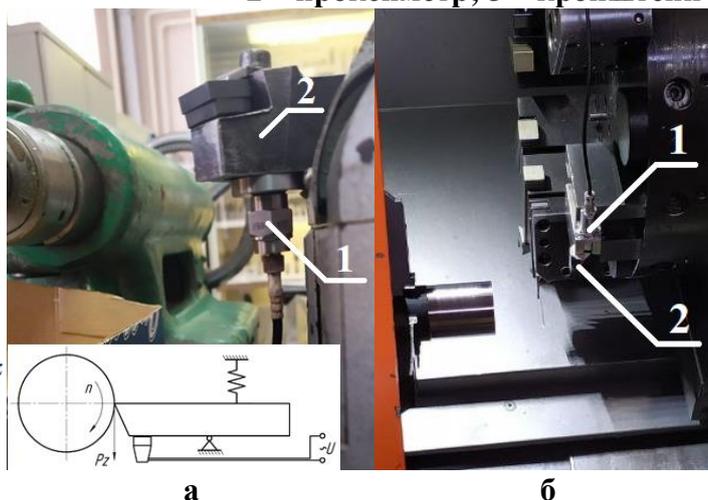


Рисунок 8 – Расположение акселерометра на резце при экспериментах на станках: а – 1К62; б – Victor VTurn 26; 1 – акселерометр; 2 – резец

Для проведения экспериментальных исследований с записью сигнала главной составляющей виброускорения  $A_z$  были спроектированы и изготовлены системы для лабораторных и производственных условий. Расположение акселерометра показано на рис. 8. Ввиду невозможности точного выделения вынужденных колебаний из временного сигнала виброускорения, эффективно показал себя способ с подавлением основных выявленных сторонних компонент спектра для повышения соотношения «сигнал/шум», где в качестве «сигнала» принимается вынужденная составляющая спектра, а за «шум» принимается доля спектра,

включающая вибрации станка на холостом ходу с добавлением гармоник на собственных резонансных частотах ближайших к зоне резания узлов.

Далее под «приведенным спектром виброускорения» понимается спектр виброускорения с примененной совокупностью фильтров, подавляющих «шум». Количественная оценка вибрации при дальнейших исследованиях проводилась по СКЗ главной составляющей виброускорения  $A_z$ , определенному по приведенному спектру.

Экспериментальные исследования на примере точения деталей из стали 10X11H23T3MP проводились следующим образом. Запись сигнала виброускорения проводится во время точения с разными скоростями резания. Минимальное значение относительного удлинения  $\delta$  (рис. 3) наблюдается в диапазоне 650 – 750 °С, что при точении детали из стали 10X11H23T3MP (BK8,  $t = 1$  мм,  $s = 0,39$  мм/об) соответствует скорости резания 30 – 50 м/мин (рис. 9). Величины  $P_z$  и  $h_{онз}$  минимальны в диапазоне скоростей 35 – 50 м/мин. Как и предполагалось, при данных скоростях происходит изменение вида стружки со сливной в элементную (рис. 9). На этом рисунке указаны три диапазона скоростей резания, характеризующиеся разными видами стружки. Диапазон №1 – менее 40 м/мин, Диапазон №2 – 40-50 м/мин, Диапазон №3 – более 50 м/мин. Для диапазона скоростей резания №1 характерна сливная стружка ( $k_s = 0,81$ , строка №1 табл. 1). В диапазоне скоростей резания №2 характерна суставчатая стружка ( $k_s = 0,42$ , строка №2 табл. 1). В диапазоне скоростей резания №3 наблюдается элементная стружка ( $k_s = 0,23$ , строка №3 табл. 1).

Таким образом, на примере стали 10X11H23T3MP диапазон скоростей резания, обеспечивающий УМР СРТП сборных резцов и определенный по вибрации резца, находится в диапазоне 40 – 50 м/мин.

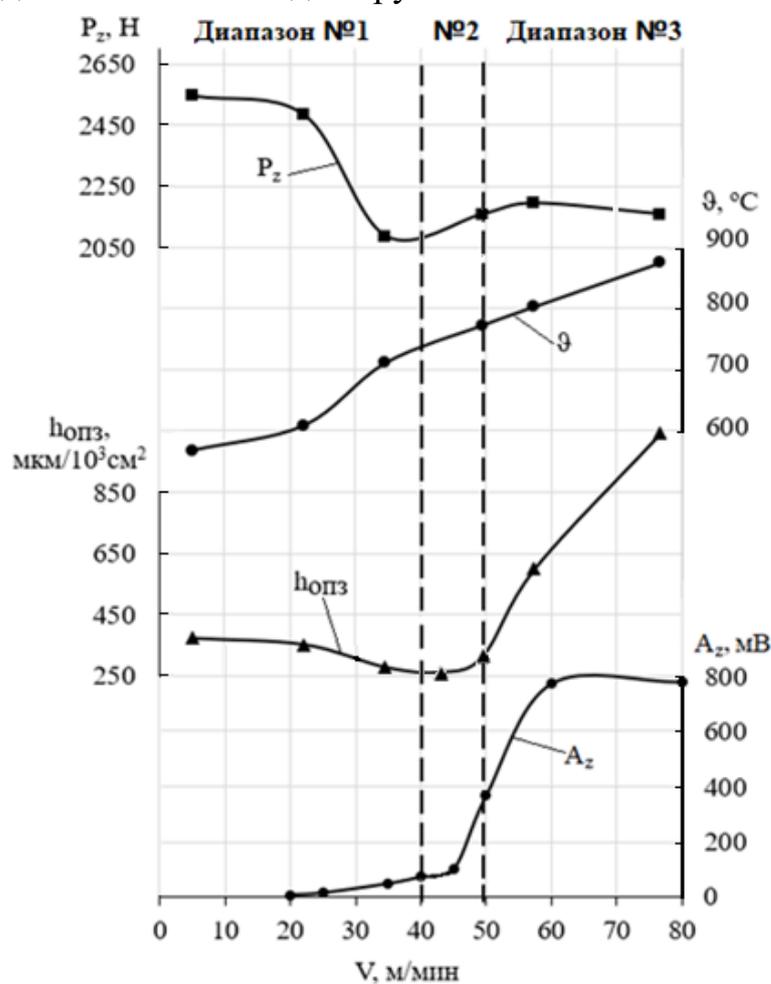
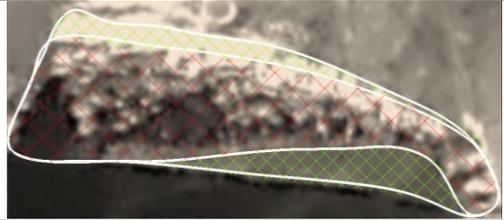
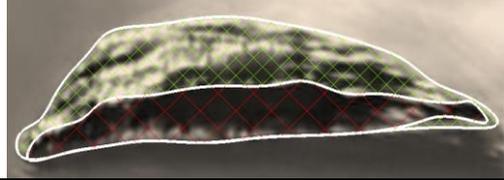
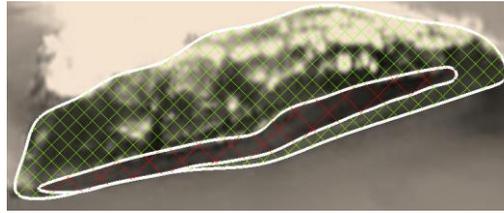


Рисунок 9 – Зависимости главной составляющей силы резания  $P_z$ , температуры в зоне резания  $\Theta$ , относительного износа по задней поверхности  $h_{онз}$ , главной составляющей виброускорения  $A_z$  от скорости резания  $V$  при точении деталей из стали 10X11H23T3MP, BK8,  $t = 1$  мм,  $s = 0,39$  мм/об.

Таблица 1 – Зависимость вида стружки от скорости резания при точении

	Вид стружки	Поверхность разрушения
Сливная стружка ( $k_s = 0,81$ ): сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 35$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм		
Суставчатая стружка ( $k_s = 0,42$ ): сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 45$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм		
Элементная стружка ( $k_s = 0,23$ ): сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 60$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм		

Аналогичные результаты получены при точении деталей из сталей 14X17H2, 12X18H10T и сплавов ХН78Т, ХН60ВТ.

В пятой главе изложена практическая реализация разработанного метода, основные этапы и результат опытно-конструкторских работ по разработке системы автоматического определения и поддержания диапазона скоростей резания при точении.

Система управления скоростью резания основана на взаимодействии четырех основных узлов: микроконтроллера (МК), преобразователя частоты (ПЧ), акселерометра, главного привода станка (рис. 10). Вычислительное ядро системы – 32-разрядный микроконтроллер (МК) с ARM архитектурой. Методика и алгоритм определения целевых условий процесса резания реализованы в прошивке МК (свид. о регистрации программы для ЭВМ №2023685988) с использованием авторских библиотек на языке «С».

На рис. 11 показаны зависимости СКЗ виброускорения резца при точении деталей из стали 10X11H23T3MP от скорости резания  $A_z(V)$ , ее первая (K1) и вторая (K2) производные. По результатам приведенных выше исследований, искомые скорости резания лежат между двумя критическими точками: локальный минимум первой производной, после которого идет интенсивный рост значения

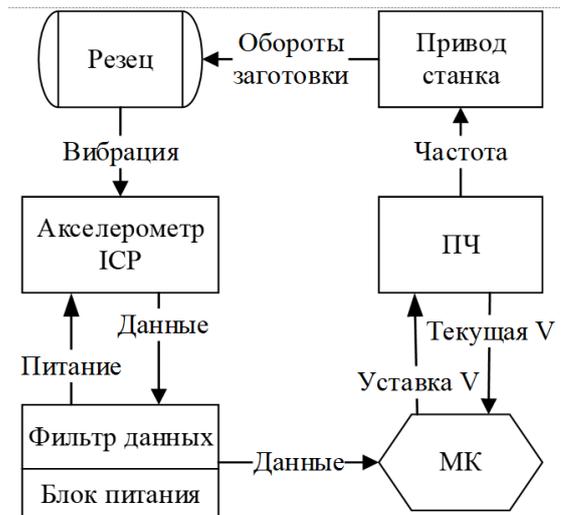


Рисунок 10 – Блок-схема системы управления: БП – блок питания, МК – микроконтроллер, ПЧ – преобразователь частоты

(>200%) и перегиб функции  $A_z(V)$ , который определяется по изменению знака второй производной.

Система автоматического управления примет решение о достижении условий максимальной работоспособности по вибрации резца при выполнении двух условий, соответствующих граничным точкам диапазона: на текущей итерации цикла опроса процентный прирост скорости изменения СКЗ виброускорения резца составил более 200% после локального минимума; при дальнейшем повышении скорости резания значение второй производной поменяло знак, что свидетельствует о точке перегиба. В качестве заданной скорости резания для автоматического поддержания выбирается средняя скорость установленного диапазона.

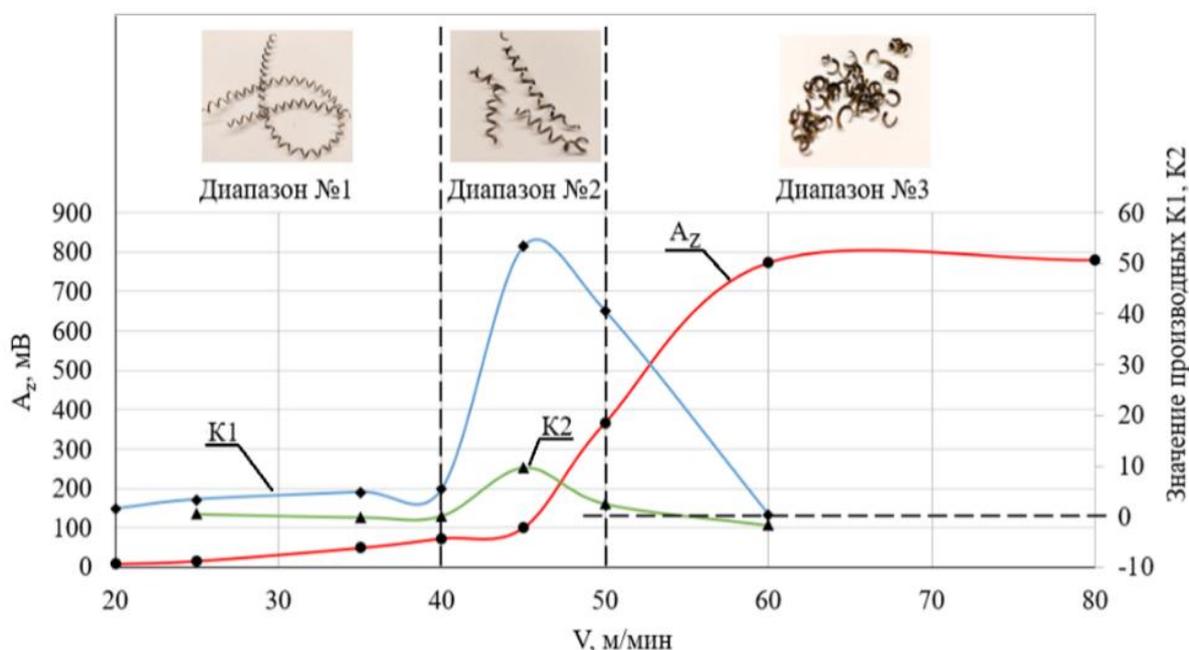


Рисунок 11 – Зависимость СКЗ  $A_z$  и ее первой (K1) и второй (K2) производных от скорости резания при точении стали 10X11H23T3MP, BK8,  $t = 1$  мм,  $s = 0,39$  мм/об.

Аналогичные результаты были получены при точении деталей из сталей 12X18H10T, 14X17H2, сплавов ХН78Т, ХН60ВТ.

Реализация разработанной методики в виде блока управления частотным преобразователем привода главного движения внедрена в производство на предприятиях ПАО «Тюменские моторостроители» и ООО НПО «Базовое машиностроение», где широко применяются обрабатываемые материалы, исследованные в данной работе, для изготовления деталей газотурбинных двигателей.

Результаты исследований по обрабатываемым материалам, используемым в данной работе сведены в табл. 2 (сборные резцы с СРТП производства КЗТС) и табл. 3 (сборные резцы с СРТП производства ISCAR). Отклонение полученных автором скоростей резания в автоматическом режиме в среднем не более 7,5% от оптимальных по методу А. Д. Макарова и в среднем не более 6,5% по методу С. С. Силина. Диапазон скоростей резания, установленный по методу автора в автоматическом режиме, позволяет уточнить диапазон скоростей резания, рекомендованный производителем СРТП (КЗТС, ISCAR), в среднем на 69%.

Таблица 2 – Сравнение результатов разработанного автором метода с классическими методами назначения скорости резания для обрабатываемых материалов предприятия «Тюменские моторостроители»

Обрабатываемый материал	Скорость резания (м/мин)					
	Производитель СРТП (КЗТС)	Справочник*	$h_{опз} = f(V)$ (по методу А.Д. Макарова)	$P_z = f(V)$ (по методу С. С. Силина)	По методу автора	
					Диапазон	Средняя скорость
14X17H2	70 – 150	120 – 150	125	120	115 – 145	130
10X11H23T3MP	20 – 50	50 – 60	43	38	40 – 50	45
12X18H10T	80 – 160	120 – 150	130	120	120 – 140	130
ХН78Т	15 – 90	30 – 40	37	43	35 – 45	40
ХН60ВТ	15 – 90	40 – 50	41	48	40 – 60	50

\* Я.Л. Гуревич *Режимы резания труднообрабатываемых материалов (1986)*

Таблица 3 – Сравнение результатов разработанного автором метода с данными, полученными технологами в результате стойкостных испытаний для обрабатываемых материалов предприятия «Тюменские моторостроители»

Обрабатываемый материал	Скорость резания (м/мин)			
	Производитель СРТП (ISCAR)	Данные технологов ПАО «Тюменские моторостроители»	По методу автора	
			Диапазон	Средняя скорость
14X17H2	100 – 180	130	120 – 150	135
10X11H23T3MP	35 – 80	45	40 – 50	45
ХН78Т	35 – 85	45	38 – 48	43

Таким образом, в результате внедрения разработанной методики на ПАО «Тюменские моторостроители» и ООО НПО «Базовое машиностроение» решаются задачи, сформулированные выше, которые возникают по формированию условий максимальной работоспособности сборных инструментов при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача по разработке и практической реализации метода формирования условий максимальной работоспособности СРТП сборных резцов на основе выявленной взаимосвязи явления высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала и параметров виброускорения сборного резца при резании ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов, имеющая важное значение в области металлообработки.

1. Экспериментально установлена взаимосвязь между изменением величины СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  при разных скоростях резания и диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов в процессе точения деталей из сталей 12X18H10T, 14X17H2,

10X11H23T3MP и сплавов ХН60ВТ, ХН78Т в зоне высокотемпературного охрупчивания.

2. Установлена взаимосвязь между изменением вида стружки и диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов, определенном по зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания.

3. Установлена взаимосвязь между минимальными значениями относительного поверхностного износа СРТП сборных резцов по задней поверхности  $h_{онз}$  и диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов, определенном по зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания.

4. Установлена взаимосвязь между минимальными значениями главной составляющей силы резания  $P_z$  и диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов, определенном по зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения резца  $A_z$  от скорости резания.

5. Разработан алгоритм математического анализа зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения от скорости резания для формирования УМР СРТП сборных резцов на основе явления высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала в автоматическом режиме при точении. Отклонение полученных автором скоростей резания в автоматическом режиме в среднем не более 7,5% от оптимальных по методике А. Д. Макарова и в среднем не более 6,5% по методике С. С. Силина.

6. Разработан и изготовлен прототип системы автоматического формирования скорости резания при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с применением математического анализа зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения сборного резца  $A_z$  от скорости резания. Диапазон скоростей резания, установленный по методу автора в автоматическом режиме, позволяет уточнить диапазон скоростей резания, рекомендованный производителем СРТП (КЗТС, ISCAR), в среднем на 69%.

7. Результаты работы внедрены в производство на ПАО «Тюменские моторостроители» и ООО НПО «Базовое машиностроение».

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертационной работы является расширение перечня марок обрабатываемых материалов и инструментальных твердых сплавов.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В 18-ТИ ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ, ОСНОВНЫМИ ИЗ КОТОРЫХ ЯВЛЯЮТСЯ**

#### **Публикации в журналах из перечня ВАК РФ:**

1. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Воронин В. В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. №4. С. 18-28.

2. Артамонов Е. В., **Воронин В. В.**, Помигалова Т. Е. Исследование колебаний главной составляющей силы резания при токарной обработке // Омский научный вестник. 2021. №6. С. 5-10.

3. Артамонов Е. В., Костив В. М., Васильев Д. В., **Воронин В. В.** Определение условий максимальной обрабатываемости труднообрабатываемых материалов при точении на основе параметров вибрации // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. №2 С. 4-12.

4. Артамонов Е. В., Утешев М. Х., Костив Т. Е., **Воронин В. В.** Управление процессом обработки металлов резанием на основе взаимосвязи работоспособности твердосплавных пластин сборных резцов и обрабатываемости материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №1. С. 464-470.

5. Артамонов Е. В., **Воронин В. В.**, Костив Т. Е., Штин А.С. Определение скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность сборных резцов по параметрам виброускорения, при точении деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов // Вестник МГТУ «Станкин». 2024. №2(69). С. 33-39.

**Публикации в журналах, входящих в систему цитирования Scopus:**

6. E. Artamonov, D. Vasilyev, and **V. Voronin** Rapid diagnostic test of metal turning by cutting using vibration parameters analysis // AIP Conference Proceedings 2313. 2020. 060031. DOI: 10.1063/5.0032239.

**Патенты:**

7. Патент № 2806933 Российская федерация. Способ определения скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резца при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с помощью сборных резцов со сменными режущими твердосплавными пластинами / Артамонов Е.В., **Воронин В. В.**, Костив В. М., Васильев Д. В., Костив Т. Е. Опубл. 08.11.2023 Бюл. № 31.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023685988. Программа для автоматического определения и поддержания скорости резания при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов / **Воронин В. В.** Опубл. 01.12.2023.

*В других изданиях и материалах конференций опубликовано  
11 работ объемом 2,8 п.л. с долевым участием автора 1,9 п.л.*

Подписано в печать 11.10.2024

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Тираж 100 экз. Заказ № 300

Отпечатано в ИП Рянин Александр Александрович

"Цифровая типография РА"

625001, г. Тюмень, ул. Нагорная, д. 2, офис 109