

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Заслуженный работник высшей школы РФ
доктор технических наук, профессор
Артамонов Евгений Владимирович

Тюмень – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Состояние вопроса об обеспечении работоспособности режущих инструментов при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов.....	12
1.2 Известные методы оптимизации процесса резания	13
1.3 Анализ различий хрупкого и вязкого разрушения обрабатываемых материалов	20
1.4 Связь работоспособности инструмента и обрабатываемости материала	24
1.5 Известные способы применения вибрации режущего инструмента для диагностики процесса резания.....	27
1.6 Выводы по главе.....	30
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	31
2.1 Высокотемпературное охрупчивание труднообрабатываемых сталей и сплавов	31
2.2 О взаимосвязи вибрации резца и колебаний силы резания при точении на основе уравнения динамики колебательного движения	37
2.3 Научная гипотеза.....	43
2.4 Вибрационные характеристики механического осциллятора и измерение их параметров.	44
2.5 Методы математического анализа сигналов вибрационных характеристик во временной и частотной областях.....	52
2.6 Блок-схема диссертации.....	59
2.7 Выводы по главе.....	61
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ.....	62

3.1 Экспериментальная установка.....	62
3.2 Разработка и изготовление измерительного преобразователя для электрического динамометра.....	63
3.3 Калибровка по эталонному механическому динамометру	66
3.4 Способ измерения и анализа колебаний главной составляющей силы резания P_z с помощью проксиметра.....	69
3.5 Исследование главной составляющей силы резания	72
3.6 Результаты	74
3.7 Главная составляющая силы резания, как вынуждающая сила колебаний сборного резца.....	79
3.8 Выводы по главе.....	83
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЯ РЕЗЦА ПРИ ТОЧЕНИИ	84
4.1 Экспериментальная установка.....	84
4.2 Проведение экспериментов и обработка результатов.....	90
4.2.1 Анализ спектра общего уровня вибрации технологической системы станка.....	90
4.2.2 Проведение эксперимента на стали 10X11H23T3MP	93
4.2.3 Проведение эксперимента на стали 14X17H2	98
4.2.4 Проведение эксперимента на стали 12X18H10T	101
4.2.5 Проведение эксперимента на сплаве ХН78Т	104
4.2.6 Проведение эксперимента на сплаве ХН60ВТ	108
4.3 Сводная таблица результатов	110
4.4 Выводы по главе.....	111
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.....	113
5.1 Метод определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего условия максимальной работоспособности СРТП сборных резцов.....	113
5.2 Разработка функциональной схемы системы автоматического управления	116
5.3 Реализация алгоритма управления по функциональной схеме.....	120

5.4 Формирование УМР СРТП сборных резцов в условиях автоматизированного машиностроения.....	125
5.5 Выводы по главе.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	133
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ З	165
ПРИЛОЖЕНИЕ И	166
ПРИЛОЖЕНИЕ К	167

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Ответственные детали газотурбинных двигателей изготавливают из труднообрабатываемых материалов, к которым относятся жаростойкие, жаропрочные и коррозионностойкие стали и сплавы. Некорректный выбор режимов резания токарной обработки деталей из таких материалов приводит к высокому проценту брака, быстрому износу или механическому разрушению сменных режущих твердосплавных пластин (СРТП) сборных резцов. Назначение режимов резания, обеспечивающих максимальную работоспособность СРТП, т.е. минимальный относительный износ резца по задней поверхности h_{onz} при минимальной главной составляющей силы резания P_z , требуется при точении крупногабаритных деталей турбин и компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД), когда необходимо обеспечить достаточную стойкость для завершения обработки за один проход. Назначение режимов резания в период освоения новых изделий или при возобновлении производства осложняется отклонением механических свойств материала заготовок между партиями металла и широкой номенклатурой применяемых на производстве СРТП. При назначении режимов резания труднообрабатываемых материалов необходимо учитывать эффект высокотемпературного окручивая. Влияние высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала на процесс резания проявляется через вид стружки и выходные параметры процесса резания: температуру в зоне резания, относительный поверхностный износ по задней поверхности, главную составляющую силы резания P_z , среднеквадратичное значение главной составляющей виброускорения A_z , позволяющие формировать условия максимальной работоспособности СРТП на основе изменения скорости резания. Известные способы экспериментального определения режимов резания требуют участия человека при проведения долговременных, ресурсоемких

экспериментальных исследований. Поэтому разработка метода определения и поддержания диапазона скоростей резания, формирующего условия максимальной работоспособности (УМР) СРТП сборных резцов, реализуемого в автоматической системе управления скоростью резания, 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., Денисенко А.Ф., 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.Д., Кутин А.А., Куц В.В., Лобанов Д.В., Лоладзе 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., Утенков В.М., 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.

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 сборного 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 δ , видом стружки, относительным поверхностным износом резца по задней поверхности $h_{онз}$ и скоростью резания.

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

5. Разработать функциональный прототип системы автоматического определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, на основе математического анализа виброускорения резца A_z при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Объектом исследования является процесс точения труднообрабатываемых сталей и сплавов сборными резцами с СРТП.

Предметом исследования является взаимосвязь вибрационных характеристик сборных резцов с СРТП и условий их максимальной работоспособности при точении ряда труднообрабатываемых сталей (12X18H10T, 10X11H23T3MP, 14X17H2) и сплавов (XH78T, XH60BT).

Научная новизна

1. Установлена взаимосвязь между диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП сборных резцов, и изменением величины среднеквадратичного значения 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. На основании математического анализа установлено наличие критических точек зависимости среднеквадратичного значения 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.

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

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

Практическая значимость

1. Разработана методика определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, на основе математического анализа зависимости среднеквадратичного значения 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 сборного 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 функционального прототипа автоматической системы определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, внедрены в производство ПАО «Тюменские моторостроители» и ООО НПО «Базовое машиностроение».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установленные взаимосвязи УМР СРТП сборных резцов и диапазонов скоростей резания, определенных в результате математического анализа зависимостей среднеквадратичного значения 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 среднеквадратичного значения 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». Опытнo-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 комплексы. Полученные в результате исследований данные показали повторяемость и системность в совокупности аналогичных, но независимых экспериментов. Основные результаты экспериментальных 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 непосредственном проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации 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 определения и поддержания диапазона скоростей резания. Основные положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на 13 научно-технических конференциях ТИУ (2019 – 2023, Тюмень); Конференции регионального уровня «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (Институт физики металлов

им. М. Н. Михеева УрО РАН, 2021, Екатеринбург); Международных научных конференциях «Физика. Технологии. Инновации» (УРФУ, 2020, 2022, Екатеринбург); Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении – 2022» (АлГТУ, 2022, Барнаул); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (ТПУ, 2022, Томск); Международной научно-практической конференции «Инновации. Интеллект. Культура.» (ТИУ, 2023, Тобольск); 15-ой Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (МГТУ им. Баумана, 2023, Москва), заседании кафедры «Инструментальной техники и технологии формообразования» (МГТУ «СТАНКИН», 2024, Москва) научно-техническом семинаре кафедр «Станки и инструменты» и «Технология машиностроения» (ФГБОУ ВО ТИУ, 2023, Тюмень).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 публикация в издании, включенном в базу цитирования Scopus, 1 патент на изобретение РФ, 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Формирование условий максимальной работоспособности СРТП сборных резцов необходимо при изготовлении крупногабаритных деталей ГТД в процессе их капитального ремонта для нужд машиностроительной и нефтегазовой отраслей, при этом широко применяются труднообрабатываемые стали и сплавы, способные обеспечить работоспособность деталей в тяжелых условиях и при высоких температурах. Лезвийная обработка таких деталей требует особого внимания, поскольку неверный выбор режимов резания приводит к высокому проценту брака, быстрому износу режущего инструмента или его преждевременному выходу из строя в результате механического разрушения, что не позволяет завершить обработку детали за один проход.

1.1 Состояние вопроса об обеспечении работоспособности режущих инструментов при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов

Особого внимания требует резание труднообрабатываемых сталей и сплавов, применяемых при изготовлении деталей ГТД. Некорректный выбор режимов резания здесь особенно быстро приводит к браку или выходу из строя инструмента. Труднообрабатываемые стали и сплавы отличаются узким диапазоном температур в зоне резания, в котором обеспечиваются требуемые показатели обрабатываемости материала и работоспособности режущего инструмента. Низкие скорости резания, соответствующие низким температурам в зоне резания, приводят к наростообразованию и в целом экономически не выгодны. Высокие скорости резания, приводят к интенсивному диффузионному износу, химическому взаимодействию компонентов обрабатываемого и инструментального материалов, к потере формоустойчивости режущего клина при превышении красностойкости

материала СРТП. Для труднообрабатываемых материалов обозначенный диапазон температур крайне узкий и может достигать 20 °С.

Изменение физико-химических свойств обрабатываемых материалов от партии к партии и широкая номенклатура применяемых инструментальных материалов приводят к необходимости повторного назначения режимов резания. Для каждой новой пары «обрабатываемый материал - инструментальный твердый сплав» необходимо проводить стойкостные испытания для экспериментального назначения скорости (температуры) максимальной работоспособности режущего инструмента, это осложняется сжатыми сроками на освоение нового изделия или возобновлением производства при переходе на металл другого поставщика или замене ИТС.

Необходим способ определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов, применимый на универсальных токарных станках, оснащенных преобразователем частоты привода главного движения для обеспечения бесступенчатой регулировки числа оборотов шпинделя и станков с ЧПУ, при условии возможности внешнего задания скорости резания через универсальный аналоговый или цифровой ввод.

1.2 Известные методы оптимизации процесса резания

Одной из фундаментальных задач при точении металлов является назначение режимов резания. Резание труднообрабатываемых материалов приводит к быстрому износу режущего инструмента. Главный фактор, определяющий комплекс сложных взаимосвязей при резании металлов – температура в зоне резания. В наибольшей степени на температуру в зоне резания оказывает влияние скорость резания, меньше – подача и глубина резания. Многогранная взаимосвязь механических процессов и физических явлений при резании металлов создает сложную задачу назначения оптимальных режимов резания [8, 12, 37, 101].

Скорость резания напрямую влияет на так называемую среднюю контактную температуру в зоне резания, во многом определяющую вид износа и стойкость

резца. При разных скоростях резания преобладают определенные виды износа, показанные на рисунке 1.1 [92, 98, 99].

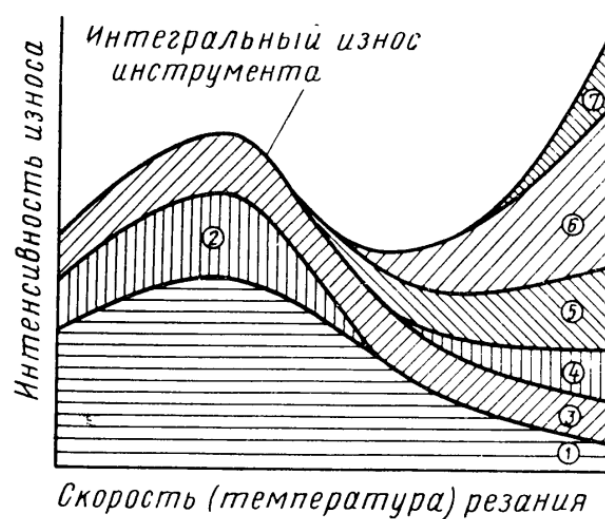


Рисунок 1.1 – Зависимость интенсивности износа от температуры резания:

- 1 – адгезионный износ, 2 – усталостный износ, 3 – абразивный износ,
4 – термоусталостное разрушение, 5 – окисление, 6 – диффузионный износ,
7 – пластическое течение [93]

При адгезионном износе происходит разрушение обоих материалов, инструментального и обрабатываемого, по причине протекающих процессов схватывания и дальнейшего разрушения участков адгезии. Поскольку материал инструмента прочнее обрабатываемого, отрыв островков схватывания происходит чаще со стороны последнего. Разрушение материала режущего инструмента приводит к образованию глубоких дефектов, повышающих интенсивность износа.

Адгезионный износ преобладает при низких температурах резания совместно с усталостным износом, заключающемся в усталостном разрушении материала вследствие циклических нагрузок (рисунок 1.1). Абразивный износ характерен для широкого спектра температур и заключается в истирании контактирующих поверхностей о твердые включения, содержащиеся как в инструментальном, так и в обрабатываемом материалах. Твердые выступающие неровности приводят к выкрашиванию, скалыванию, отрыву микрообъемов материала. Например, в структуре труднообрабатываемых материалов высокое содержание карбидов и интерметаллидов, способных разрушить инструментальный твердый сплав. С

ростом температуры интенсивность абразивного износа снижается по причине некоторого размягчения твёрдых включений и увеличения их пластичности. Однако, данный вид износа в качестве преобладающего или самостоятельного при резании труднообрабатываемых сталей и сплавов не встречается, а всегда сопровождается другими видами износа. Диффузионный износ напротив, имеет место лишь при высоких температурах резания и сильном механическом контакте. Механика данного вида износа заключается во взаимном проникновении компонентов контактирующих материалов друг в друга, сопровождающееся фазовыми и структурными превращениями. Снижение сопротивления разрушению материала твердого сплава при диффузионных явлениях сильно способствует повышению интенсивности абразивного и адгезионного видов износа. Наиболее распространенные процессы при диффузионном износе – это перенос атомов железа в твердый сплав и углерода в обрабатываемый материал. Для каждой пары материалов «обрабатываемый материал – инструментальный твердый сплав» существует некоторая критическая температура, после которой начинается интенсивное диффузионное растворение, эта температура контакта является предельно допустимой при резании в данной паре [98, 99].

Согласно исследованиям [98, 100, 101], при низких температурах преобладает адгезионный износ (левая ветвь функции $J = f(V)$, где J – интенсивность износа, V – скорость резания), интенсивность которого определяется отношением твердостей материала инструмента и материала в зоне контакта, а при высоких температурах резания (правая ветвь зависимости $J = f(V)$) износ в основном зависит от интенсивности диффузионных явлений [101]. В точке минимума на зависимости $J = f(V)$ происходит качественное изменение физики износа – диффузионный износ начинает преобладать над адгезионным (рисунок 1.2).

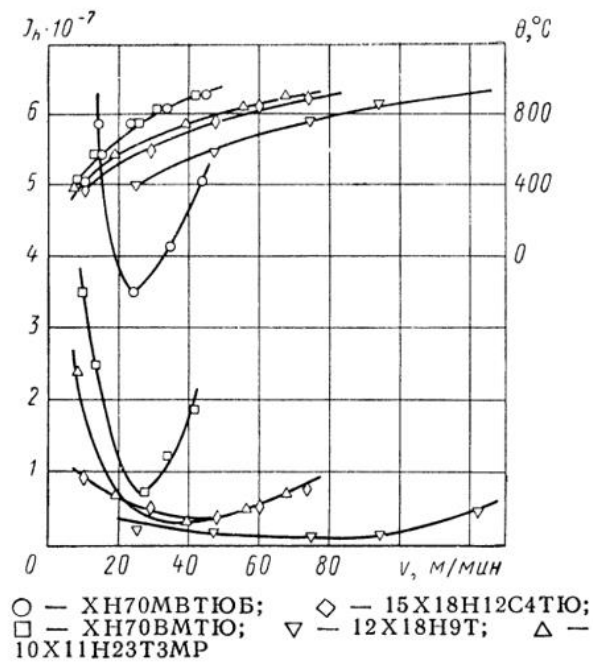


Рисунок 1.2 – Зависимость интенсивности износа сборного резца с СРТП от скорости резания при точении деталей из разных материалов (твердый сплав ВК8, $t = 0.5$ мм, $s = 0.09$ мм) [101]

Вопросам оптимизации процесса резания при точении деталей из труднообрабатываемых материалов посвящены труды А.Д. Макарова [100, 101], в которых вводится положение о постоянстве оптимальной температуры резания, заложенное в основу разработанного метода назначения оптимальных режимов резания. В полной мере исследованы взаимосвязи режимов резания со стойкостью и износом режущего инструмента, оснащенного пластинами из твердых сплавов.

На рисунке 1.3 показаны зависимости температуры в зоне резания, пути резания и относительного поверхностного износа по задней поверхности от скорости резания при точении стали 14X17H2 по данным А.Д. Макарова [101].

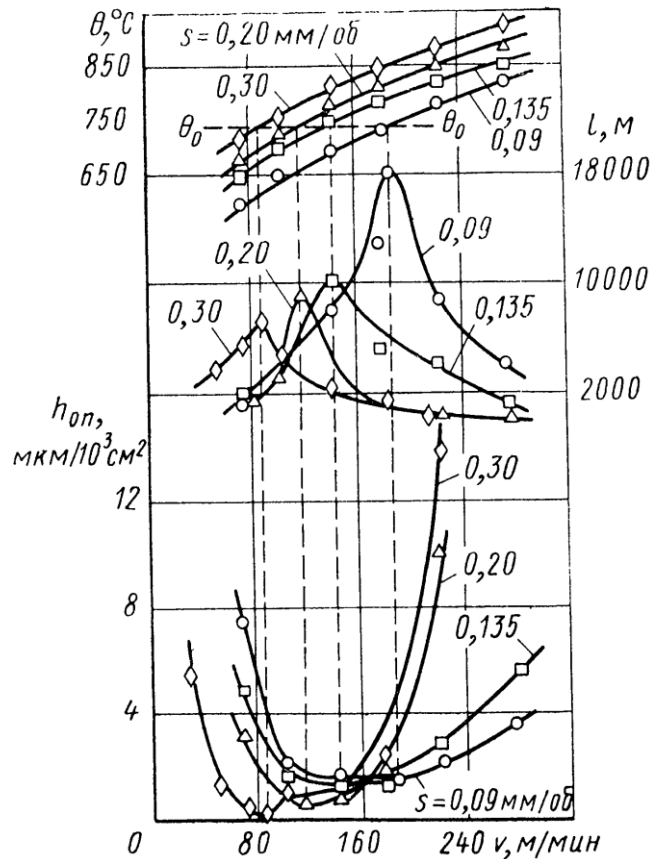


Рисунок 1.3 – Влияние скорости и глубины резания на температуру, путь резания и поверхностный относительный износ; 14X17H2, T15K6, $\gamma = \lambda = 0^\circ$,
 $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $t = 0.5$ мм, $r = 0.5$ мм [101]

По методике, изложенной в [101], определяется скорость резания, обеспечивающая оптимальную температуру в зоне резания и соответствующая минимальному значению износа, определяемому по зависимости относительного поверхностного износа $h_{опз}$ от скорости резания V .

Одним из результатов исследований взаимосвязи износа резца с температурой резания является автоматизированная система регулирования процесса резания при торцевом и продольном точении [102]. Разработанная система позволяет поддерживать оптимальную скорость резания, что достигается двумя различными изложениями функциональной схемы для торцевого и продольного точения. В случае торцевого точения перед началом работы оператором задается определённая заранее требуемая скорость резания, которая поддерживается системой за счет обратной связи от датчика положения с коррекцией по сигналу естественной термопары резец-деталь. При продольном

точении датчик положения не задействуется, вместо этого подключается стабилизация оборотов с помощью тахогенератора.

Аналогичная задача решена в труде С. С. Силина [127] с применением критериев подобия для раскрытия тесной взаимосвязи механических и тепловых явлений в процессе обработки металлов резанием. Подробно изложен анализ уравнений баланса механической и тепловой энергий для рассмотрения процессов трения и деформирования обрабатываемого материала с целью теоретического определения обрабатываемости сталей и сплавов. Установлены связи между обрабатываемостью материалов, силой, температурой и скоростью резания металлов посредством метода подобия, заключающегося в представлении функциональных зависимостей между безразмерными комплексами.

Метод определения оптимальной скорости резания, описанный профессором С. С. Силиным в [127], заключается в измерении главной составляющей силы резания при токарной обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов с увеличением скорости резания до тех пор, пока не завершится интенсивное уменьшение величины составляющей P_z с выходом на квазистационарное значение (рисунок 1.4).

Момент стабилизации функции $P_z(V)$ показывает скорость резания, считающуюся оптимальной при заданных значениях подачи и глубины резания. Полученная оптимальная скорость резания, при заданных подаче и глубине резания, обеспечивает оптимальную температуру в зоне резания. При проведении такого рода опытов необходимо сохранять постоянными геометрию инструмента, подачу S и глубину резания t . Режущий инструмент должен быть в достаточной степени приработан, чтобы исключить интенсивные вибрации в период приработки и интенсивного износа. Рекомендуемые параметры $t = (2...4)$ мм, $s = (0.2...0.5)$ мм.

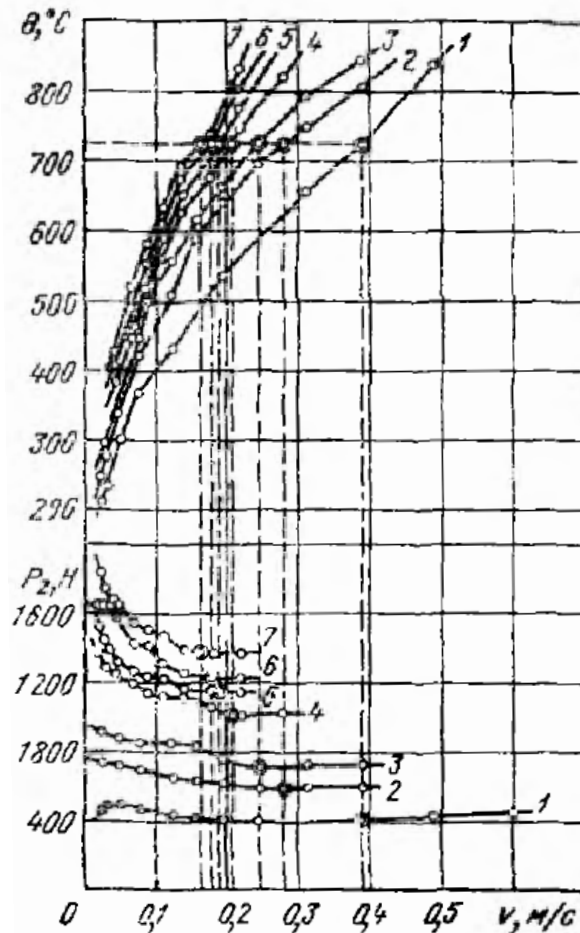


Рисунок 1.4 – Экспериментальное определение оптимальной температуры реза жаропрочного сплава резцами ВК8: а – ХН70ВМТЮ ($t = 1$ мм., $s = 0.21$ мм., $\alpha = 10^\circ$, $\gamma = 12^\circ$), б – ХН56ВМКЮ ($t = 1$ мм., $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 12^\circ$) [127]

Автоматизированная система регулирования скорости резания при торцевом точении, описанная в работе [127, 124], использует в качестве датчиков тахогенератор для контроля оборотов заготовки и естественную термопару для контроля температуры. Система реализует три режима управления – постоянная скорость резания, постоянная температура резания и постоянное число оборотов заготовки. Заранее определенная оптимальная скорость резания приблизительно устанавливается оператором в автоматизированной системе с помощью задатчика регулятора режима резания в виде величины сигнала настройки. Далее, ручную скорость резания и температуру доводят до совпадения с требуемым оптимальным значением, после чего ручное управление переключается на автоматическое поддержание полученной уставки.

1.3 Анализ различий хрупкого и вязкого разрушения обрабатываемых материалов

Одним из распространенных и информативных показателей механических характеристик является диаграмма растяжения – зависимость внутренних напряжений σ , вызванных внешней растягивающей силой, от деформации образца ε – представлена на рисунке 1.8 [31].

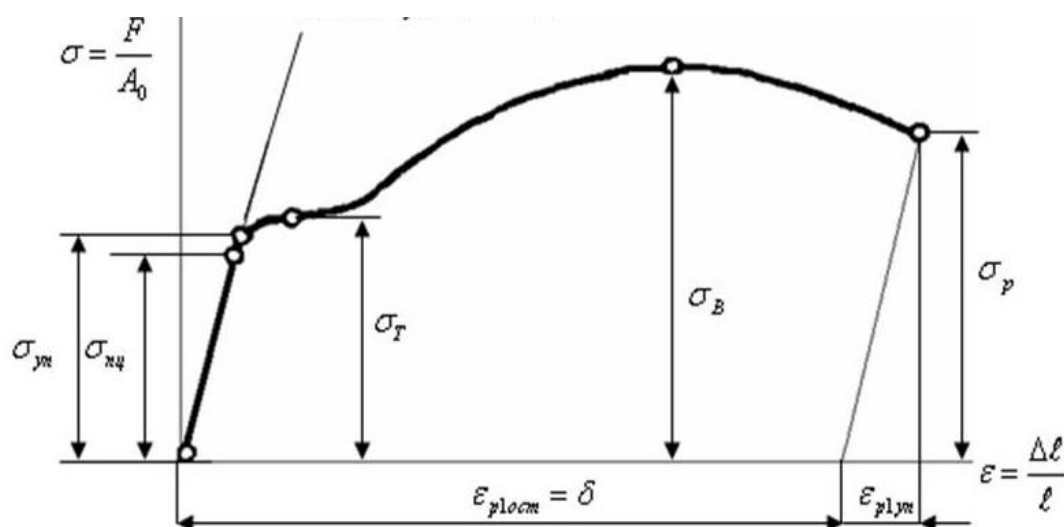


Рисунок 1.8 – Диаграмма напряжений при растяжении малоуглеродистой стали:

$\sigma_{пл}$, $\sigma_{уп}$, $\sigma_{т}$ – пределы пропорциональности, упругости, текучести; $\sigma_{в}$ – временное сопротивление (предел прочности); $\sigma_{р}$ – напряжение в момент разрыва,

Характерные диаграммы растяжения для пластического и хрупкого материалов показаны на рисунках 1.9 и 1.10.

Схема напряженного состояния может изменяться в процессе разрушения из-за дефектов структуры, образования трещин, локальных упрочнений и участков ползучести. Условия перехода между хрупким разрушением отрывом и пластическим срезом описываются зависимостями напряжений и деформаций от различных условий. Известен метод, предложенный Я. Б. Фридманом, который учитывает коэффициент мягкости $\alpha = t_{max} / S_{max}$ и отношение сопротивление отрыву $S_{от}$ к сопротивлению срезу $t_{ср}$. Если $S_{от} \ll t_{ср}$ материал должен быть склонен к хрупкому разрушению отрывом, иначе, $S_{от} \gg t_{ср}$ – должно наблюдаться вязкое разрушение срезом [120 – 123].

$$\Delta l(\text{пластичного}) \gg \Delta l(\text{хрупкого})$$

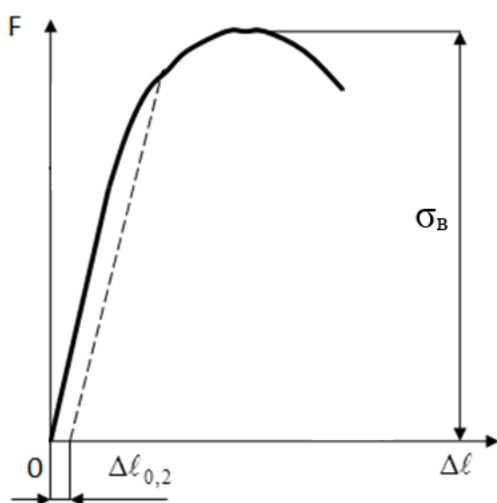


Рисунок 1.9 – Диаграмма растяжения, характерная для пластичного материала (низколегированная сталь)

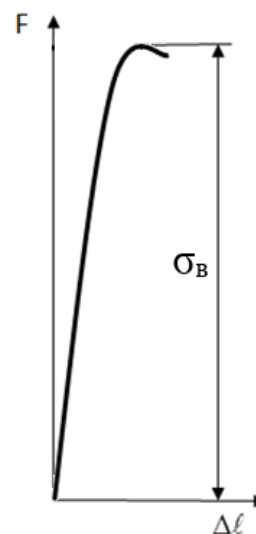


Рисунок 1.10 – Диаграмма растяжения, характерная для хрупкого материала (чугун).

При хрупком разрушении поверхность отрыва практически перпендикулярна вектору внешней силы, что подтверждает преобладание напряжений отрыва. Пластическое разрушение происходит под углом 45° к вектору внешней силы и характеризуется сдвиговыми деформациями. Оба вида разрушения можно разделить на два основных этапа: зарождение и распространение трещины. Специфические изменения связаны с различной энергоемкостью процесса, связанной со скоростью распространения трещин. Скорость распространения трещины сопоставима скорости деформации образца в случае вязкого разрушения, а при хрупком может достигать половины скорости распространения звука в испытуемом материале.

Энергоемкость хрупкого разрушения меньше, чем пластического, поскольку во втором случае необходимо совершить значительную работу по деформации всего объема материала вокруг трещины и по всему объему образца. В первом случае, деформации концентрируются в узкой области на вершинах зародыша трещины. Процесс пластической деформации при образовании стружки во всем диапазоне режимов резания имеет периодический характер, связанный с осцилляциями технологической системы станка. Это явление носит название

«неоднородность пластической деформации» и имеет место даже при образовании сливной стружки. Данный факт подтверждается наблюдением четких пластин, разделенных рядами очень тонких плоскостей, называемых фронтами сдвига. Толщина этих пластин в случае сливной стружки составляет порядка микрометра. То есть сдвиговый процесс происходит неоднородно, колебания имеют место при образовании всех видов стружки, однако при сливной их амплитуда минимальная, с увеличением же амплитуды сливная стружка переходит в суставчатую и далее в элементную.

Одной из ключевых характеристик обрабатываемого материала, влияющей на параметры колебаний системы «режущий инструмент – заготовка», является предельная величина степени деформации, при которой начинается разрушение. Основное влияние на предельную величину степени деформации оказывает температурно-скоростной фактор и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Действительная степень деформации зависит от общих параметров режима резания: толщины срезаемого слоя, подачи, контактных явлений на поверхности инструмента. Отношение действительной степени деформации в процессе резания к предельной степени деформации для данного обрабатываемого материала определяют амплитуду колебаний процесса пластической деформации в зоне резания и вид сходящей стружки. При увеличении данного соотношения амплитуда колебаний растет [81, 104]. Наиболее сильное влияние скорости резания на температуру в зоне резания и вид сходящей стружки заметно при резании труднообрабатываемых сталей и сплавов.

В работах [80 – 82] приведены результаты исследований по изучению взаимосвязи типа кристаллической решетки с механикой процесса стружкообразования при резании. «Рассмотрен механизм образования суставчатой (сегментной) стружки при высоких скоростях резания. Показано, что это связано с ростом предела текучести металла и снижением его пластичности при увеличении скорости резания... Возрастание скорости деформирования вызывает менее энергоёмкий хрупкий механизм разрушения элемента стружки, что ... приводит к снижению степени деформации срезаемого слоя, сил резания и усадки стружки»

[80]. Пластическая деформация при образовании суставчатой (сегментной) стружки протекает неоднородно и периодически вследствие ряда факторов: адгезии инструментального и обрабатываемого материалов, неравномерного сдвига прирезцовых слоев, деформационного упрочнения.

Тип кристаллической решетки обрабатываемого материала влияет на вид стружки через величину ее энергии дефекта упаковки (ЭДУ), которая влияет на вид структуры дислокаций в зоне стружкообразования. На рисунке 1.11 «показано влияние ЭДУ обрабатываемых материалов на критическую скорость резания $V_{кр}$, при которой наблюдается переход от сливной стружки к суставчатой (сегментной). При этом, чем меньше ЭДУ, тем ниже $V_{кр}$.

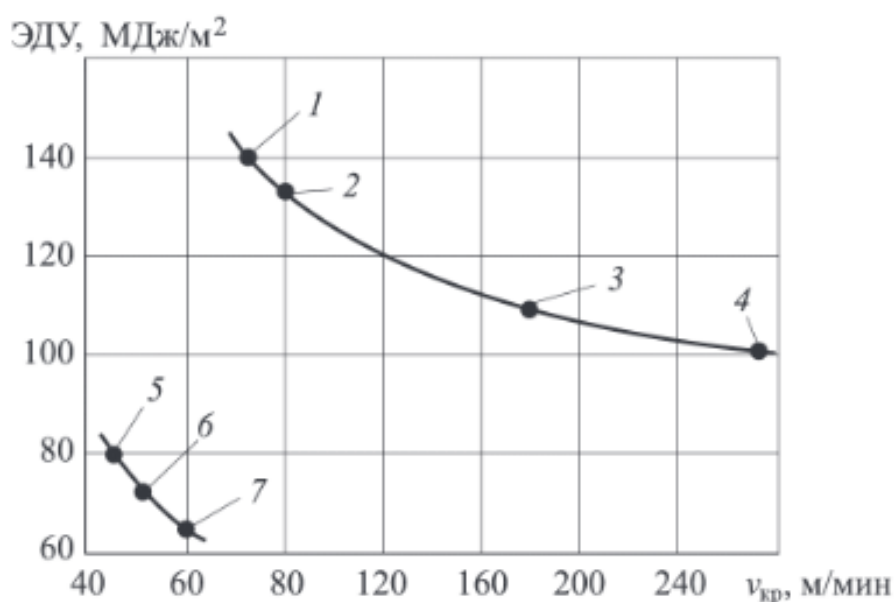


Рисунок 1.11 – Влияние ЭДУ обрабатываемых материалов на критическую скорость резания $V_{кр}$: 1 – сталь У12; 2 – сталь У8; 3 – сталь 40; 4 – сталь 20; 5 – титановые стали; 6 – нержавеющие стали; 7 – хромоникелевые жаропрочные сплавы [80]

Титановые, нержавеющие стали и хромоникелевые жаропрочные сплавы имеют низкие ЭДУ и, соответственно, невысокие $V_{кр}$.» [80]

1.4 Связь работоспособности инструмента и обрабатываемости материала

Согласно ГОСТ 25751-83 «Инструменты режущие. Термины и определения» работоспособность режущего инструмента – состояние инструмента, при котором обработка резанием выполняется при установленных условиях с установленными требованиями, то есть режущий инструмент сохраняет требуемые эксплуатационные характеристики.

Работоспособность режущего инструмента определяется совокупностью факторов (рисунок 1.12).

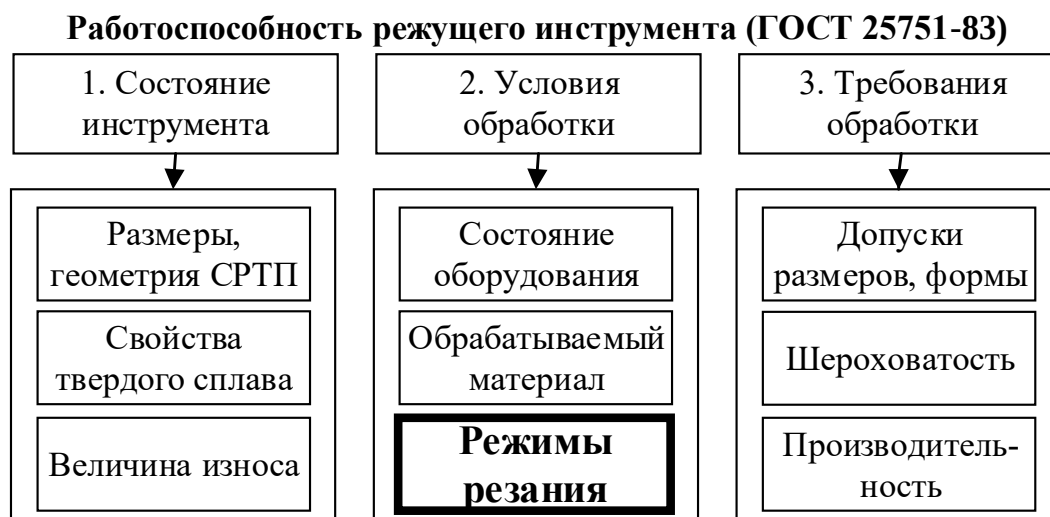


Рисунок 1.12 – Работоспособность инструмента согласно ГОСТ 25751-83

Состояние режущего инструмента определяется совокупностью его механических и геометрических параметров. Условия обработки включают обрабатываемый материал, режимы резания, технологическое оборудование и комплекс его обслуживания. Требования обработки включают допуски размеров и формы, допустимую шероховатость поверхности и производительность обработки.

В данной работе проводятся исследования для назначения скорости резания, обеспечивающей условия максимальной работоспособности, согласно пункту №2 «Условия обработки», включающему «режимы резания». Под максимальной работоспособностью СРТП сборных резцов в данной работе понимаются условия,

обеспечивающие совокупность минимального относительного износа резца по задней поверхности $h_{онз}$ при минимальной главной составляющей силы резания P_z .

При проведении экспериментов в рамках данной работы, все прочие исходные данные, кроме скорости, были взяты из нормативных документов и рекомендаций, используемых в производстве, на базе которого проводились исследования. Чертеж детали и обрабатываемый материал определены картой эскизов конструкторского отдела. Вид инструмента, вид обработки и марка инструментального твердого сплава определены картой механической обработки. Геометрия инструмента, глубина резания и подача оставались неизменными и были назначены по стандартной методике технологического отдела ПАО «ТМ» на основе справочника технолога-машиностроителя А. Г. Косиловой. Область экспериментальных исследований в рамках данной работы обозначена на блок-схеме (рисунок 1.13) – назначение скорости резания.



Рисунок 1.13 – Блок-схема области экспериментальных исследований в рамках данной работы

Исследования Томской и Тюменской школ резания доказывают, что температура в зоне резания является определяющим фактором во всей сложной взаимосвязи явлений при резании металлов. Обеспечение требуемой температуры в зоне резания наиболее эффективно осуществляется с помощью изменения скорости резания.

Вопросу формирования условий максимальной обрабатываемости сталей и сплавов при точении по виду стружки посвящены исследования и результаты, которые приведены в работе [12]. В ней описан метод расчета и анализа

коэффициента сплошности стружки k_s , который определяется как отношение полной площади поперечного сечения стружки к площади сплошного слоя в этом сечении. Коэффициент сплошности стружки выступает критерием условий максимальной обрабатываемости резанием труднообрабатываемых сталей и сплавов наряду с изменением вида стружки и угла ее текстуры. Согласно экспериментальным данным, приведенным в [11 – 15] (рисунок 1.14а), при достижении температур в зоне резания, вызывающих высокотемпературное охрупчивание обрабатываемого материала, изменяется вид стружки со сливной в суставчатую и элементную, которые характеризуются, соответственно, пластическим, хрупко-пластическим и хрупким видами разрушения.

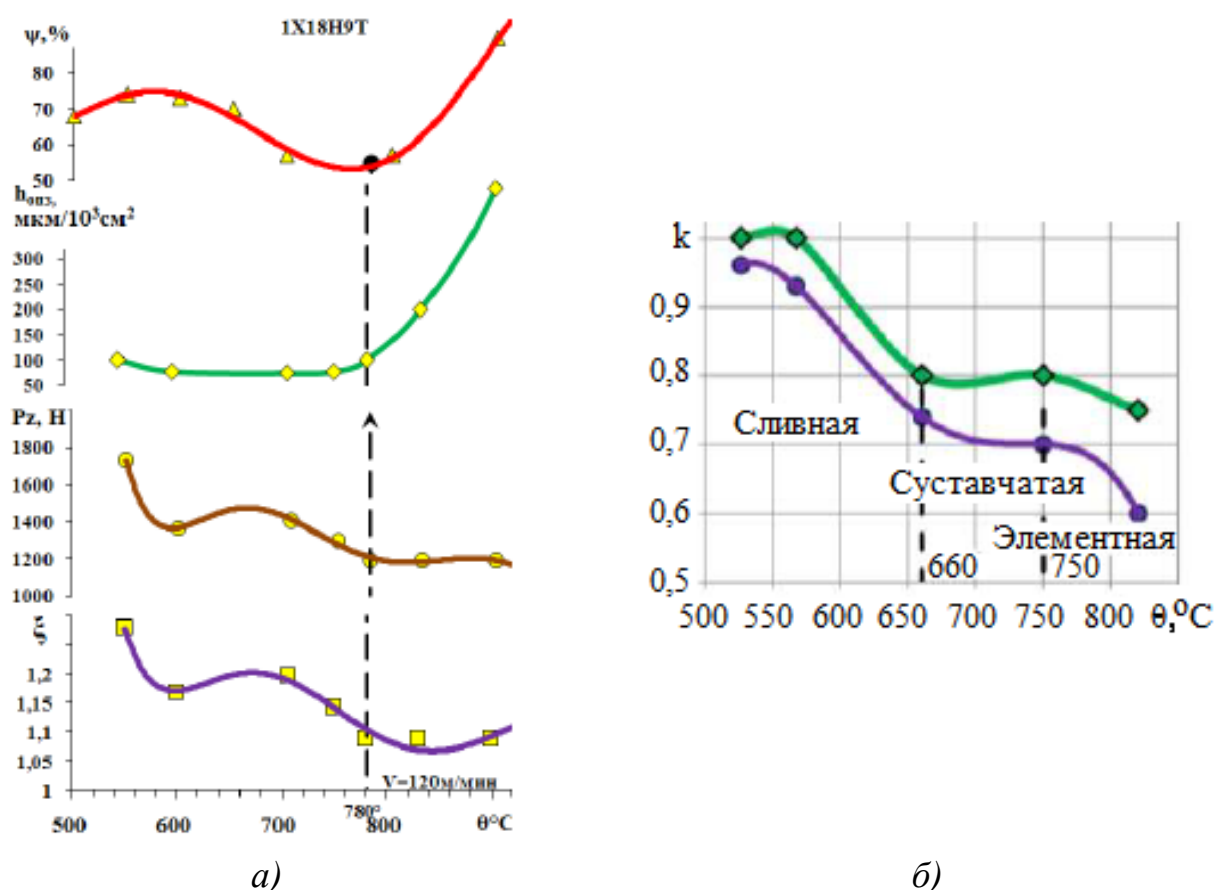


Рисунок 1.14 – Зависимости: *а* – относительного сужения ψ , относительного поверхностного износа по задней поверхности резца $h_{онз}$, силы резания P_z , коэффициента усадки стружки ξ от температуры резания θ [12] (1X18H9T, BK8, $s = 0.43$ мм/об, $t = 1,5$ мм); *б* – коэффициента сплошности k от температуры в зоне резания θ (30XГСА, BK8, $s = 0.43$ мм/об, $t = 1,5$ мм)

Данное заключение подтверждается увеличивающимся углом текстуры стружки и снижением ее коэффициента сплошности (рисунок 1.14б).

Способ определения условий максимальной обрабатываемости на основе коэффициента сплошности k_s стружки основан на визуально-оптическом исследовании стружки, полученной в результате эксперимента по предварительной обработке материала. Ввиду необходимости прерывать процесс резания для длительного визуально-оптического исследования стружки, метод не поддаётся автоматизации и не может быть выполнен без участия человека.

1.5 Известные способы применения вибрации режущего инструмента для диагностики процесса резания

При точении труднообрабатываемых сталей и сплавов вероятность хрупкого разрушения СРТП сборных резцов и скорость износа достаточно высоки, что приводит к необходимости постоянного контроля процесса резания со стороны оператора и снижению эффективности использования автоматизированного и автоматического оборудования. Опыт работы в области машиностроительного производства показывает, что технический персонал (токари, фрезеровщики), зачастую вынуждены самостоятельно выбирать режимы резания, поскольку инженеры не предоставляют исчерпывающей информации о необходимом технологическом процессе. Выбор делается исходя из личного опыта и общих рекомендаций производителя применяемого режущего инструмента. Использование многочисленных методик по расчетам и назначению режимов резания на практике производства сопряжено с рядом трудностей, поскольку предназначено для применения специально обученным высококвалифицированным инженерно-техническим персоналом. Необходимо снять часть нагрузки с персонала путем разработки нового метода формирования условий максимальной работоспособности СРТП сборных резцов, поддающегося полной автоматизации и требующий только пусконаладочных работ на этапе

запуска автоматической системы в эксплуатацию на металлорежущем оборудовании. Обеспечить выполнение какого-либо метода вне зависимости от квалификации пользователя может только автоматическая система.

Методы и средства диагностики износа режущего инструмента по параметрам вибрации исследованы в работах [2 – 7, 107]. Доказана эффективность применения вибрации для оперативной диагностики процесса резания и высокий потенциал к применению в автоматических, автоматизированных и самообучающихся системах.

Обширные исследования вибрации при точении и фрезеровании металлов проведены на базе МГТУ «СТАНКИН». В работах [60, 85 – 87] показано совершенствование методов математической обработки, интерпретации и целевого применения мониторинга процесса резания на базе виброакустических сигналов и акустической эмиссии. Решен ряд проблем и задач оперативной, тестовой и исследовательской диагностики в современном станкостроении.

Широкий спектр исследований в области резания металлов направлен на снижение негативного воздействия вибрации на качество продукции и износ оборудования. В работах [40, 41, 44 – 46, 56, 135, 137, 145] разработаны методы и технические решения, направленные на создание пассивных и активных систем демпфирования колебаний режущего инструмента и технологической системы станка в целом.

В работах [86 – 87] доказана эффективность применения виброакустических сигналов в области диагностики технологического оборудования. Разработаны комплексные системы мониторинга многоцелевых станков, использующие вибрацию, активную мощность главного электродвигателя и силы резания при фрезеровании, с целью прогнозирования качества готовых изделий. На рисунке 1.15 [75] показан пример регулирования скорости резания по активной мощности через управление частотой вращения главного электродвигателя.

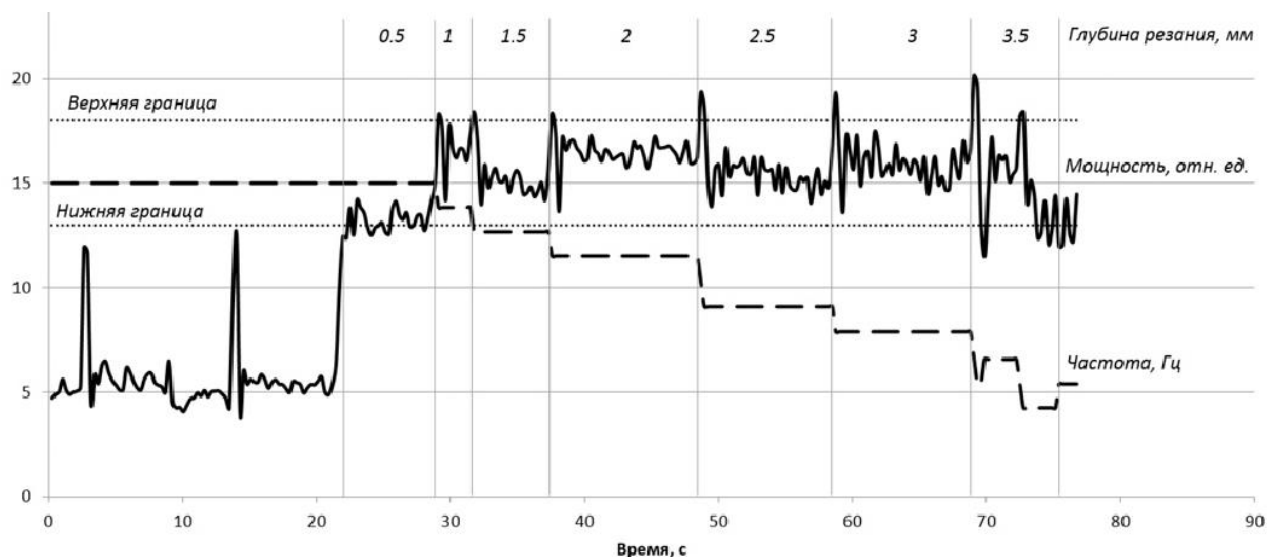


Рисунок 1.15 – Регулирование частоты вращения привода главного движения по активной мощности в зависимости от глубины резания [75]

На рисунке 1.16 [4] показано изменение отношения амплитуд виброакустических сигналов с ростом износа при разных скоростях резания.

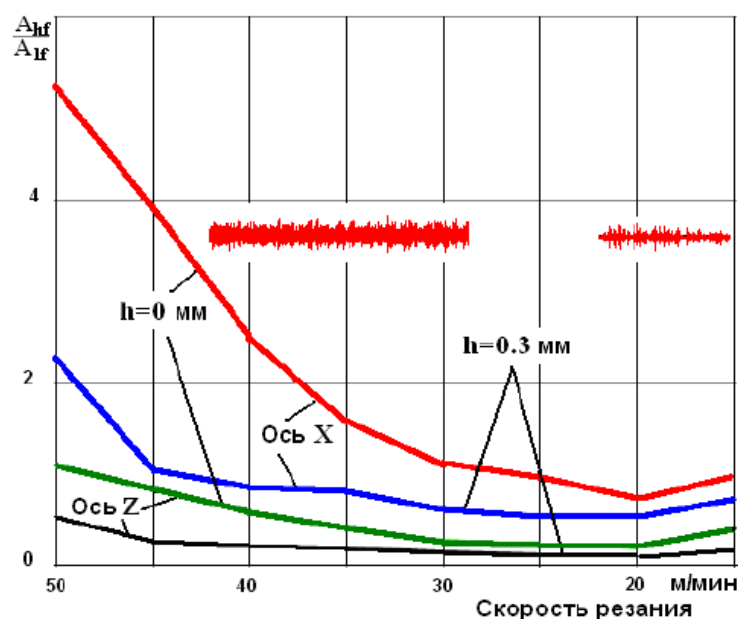


Рисунок 1.16 – Изменение отношения амплитуд виброакустических сигналов с ростом износа при разных скоростях резания [4]

Взаимосвязь вышеуказанных параметров при точении сталей и сплавов доказывает целесообразность применения вибрационных характеристик резцов для исследования процесса точения и использования их диагностического потенциала для определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов

1.6 Выводы по главе

1. Определение диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, невозможно без привязки к условиям обработки.

2. Обеспечение диапазона скоростей резания, формирующего температуру максимальной работоспособности СРТП сборных резцов, обусловлено согласованием пары «обрабатываемый материал – инструментальный твердый сплав». Минимальное значение зависимости относительного поверхностного износа по задней поверхности от скорости резания показывает максимальную обрабатываемость материала, а соответствующий ей максимум зависимости пути резания от скорости – максимальную работоспособность СРТП сборных резцов. При этом температура максимальной работоспособности твердого сплава не зависит от режимных параметров процесса резания, геометрии инструмента, а скорость резания, обеспечивающая температуру максимальной работоспособности СРТП сборных резцов, будет различна для каждой комбинации параметров.

3. Подтверждена актуальность разработки метода диагностики процесса резания труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе особенностей изменения физико-механических свойств обрабатываемых материалов при повышенных температурах, имеющего потенциал полной автоматизации.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

2.1 Высокотемпературное охрупчивание труднообрабатываемых сталей и сплавов

Влияние свойств обрабатываемого материала и температурно-скоростного фактора на вид стружки при резании отражено на рисунке 2.1. При повышении скорости резания (температуры в зоне резания) при точении сталей и сплавов сначала образуется элементная стружка, затем сливная, и снова элементная. Большинство обрабатываемых материалов машиностроительной отрасли имеет ограничение сливного стружкообразования как при низких, так и при высоких температурах, каждому такому материалу соответствует своя горизонтальная линия на схеме (рисунок. 2.1). При образовании низкотемпературной элементной стружки наблюдается интенсивное наростообразование, а скорости резания далеки от оптимальных для инструментальных твердых сплавов, поскольку обеспечивают температуру в зоне резания ниже 600 °С [115, 122].

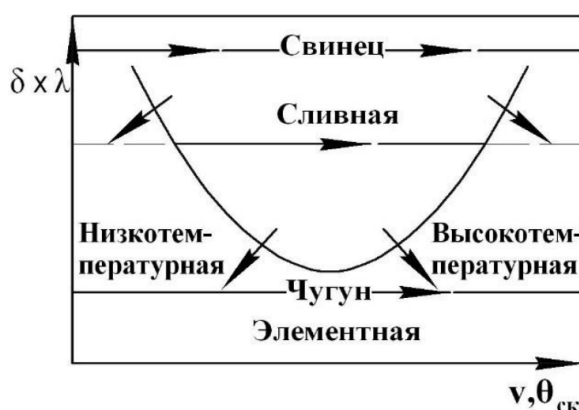


Рисунок 2.1 – Схема влияния свойств обрабатываемого материала и температурно-скоростного фактора на вид стружки [115]

В.Ф. Бобров отмечал, что «Тип стружки во многом зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала» [37, стр. 92]. «Наиболее сложно на тип стружки влияет скорость резания. При резании большинства углеродистых сталей, если исключить зону скоростей резания, где образуется

нароост, по мере увеличения скорости резания стружка из элементной становится суставчатой, а затем сливной. Однако при обработке некоторых жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов повышение скорости резания, наоборот, превращает сливную стружку в элементную. Физическая причина этого явления до настоящего времени полностью не выяснена» [37, стр. 93]. Исследования Томской и Тюменской школ резания объясняют превращение вида стружки из сливной в элементную для ряда труднообрабатываемых материалов явлением высокотемпературного охрупчивания.

Механические характеристики, такие как предел прочности σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и сужение ψ при испытаниях на разрыв и теплопроводность λ оказывают влияние на обрабатываемость сталей и сплавов при их лезвийной обработке, поскольку при высоких температурах в зоне резания величины механических характеристик обрабатываемого материала могут существенно изменяться.

Предел прочности σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – механические характеристики, представляющие собой критические точки на диаграмме растяжения – зависимости напряжений σ на растяжение/сжатие от деформации ϵ . (рисунок 2.2).

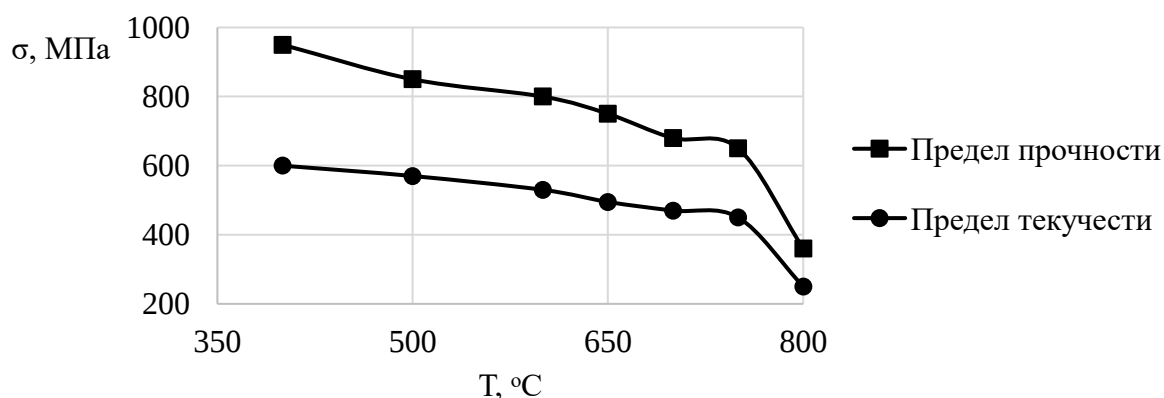


Рисунок 2.2 – Предел прочности σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ стали 10X11H23T3MP

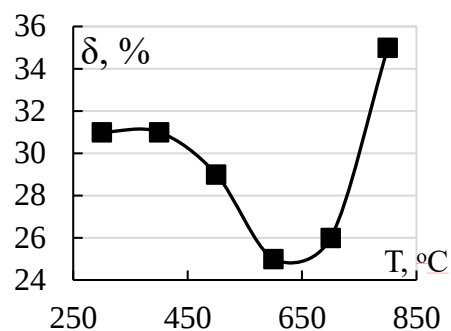
Относительное сужение ψ и удлинение δ при испытании на разрыв показывают изменение формы образца в процессе и перед разрушением (рисунок 2.3). Скорость хрупкого разрушения велика, оно происходит внезапно, требует небольших энергозатрат, в сравнении с пластическим разрушением [31, 138].

Предел прочности σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и сужение ψ могут значительно изменяться при достижении высоких температур, выходящих за пределы рабочих для данного материала.

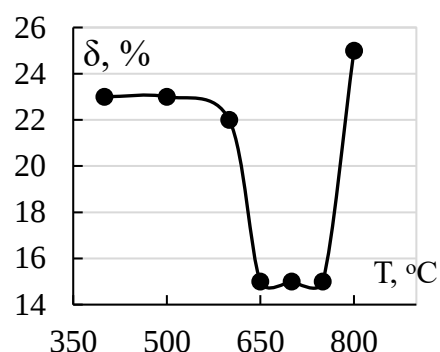
Для разрыва пластичного образца требуется совершить больше работы, чем для разрыва хрупкого образца, поскольку много энергии затрачивается на пластическую деформацию металла вокруг зоны разрушения. У хрупких материалов не наблюдается пластической деформации перед разрушением с образованием локального сужения, называемого шейкой.

Стали и сплавы могут быть в разной степени пластичны в широком диапазоне температур. Существует ряд труднообрабатываемых материалов, склонных к охрупчиванию при высоких температурах, что выражается в наличии провалов пластичности, определяемых по зависимостям $\delta(T)$ и $\psi(T)$.

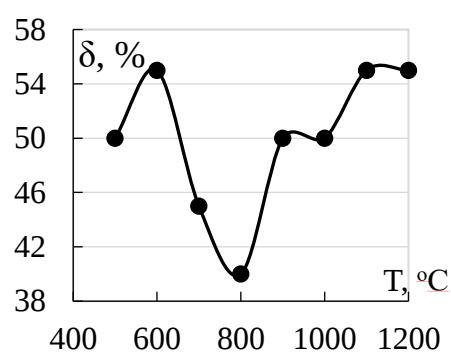
Данное явление связано с началом повышения уровня диффузионной подвижности атомов и уменьшению модуля Юнга E . Поскольку энергоемкость пластического



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Зависимость относительного удлинения от температуры при испытаниях на растяжение: а – для стали 12X18H10T; б – для стали 10X11H23T3MP; в – для сплава ХН60ВТ

разрушения велика и требует значительно больше работы для разрушения, чем при хрупком разрушении, обработку резанием целесообразнее проводить при достижении высокотемпературного охрупчивания.

Например, на рисунке 2.3б приведены зависимости механических свойств стали 10X11H23T3MP при повышенных температурах. В диапазоне температур до 600 °С существенных изменений не наблюдается. В диапазоне 650 – 800 °С наблюдаются критические точки на всех представленных зависимостях – точка минимума на $\delta(T)$ и точки перегиба на $\sigma_B(T)$, $\sigma_{0,2}(T)$ (рисунок 2.2). Минимальное значение δ показывает высокотемпературное охрупчивание в диапазоне температур 650-750 °С. В диапазоне 750-800 °С материал вновь переходит к пластичному состоянию – высокое δ , малые σ_B , $\sigma_{0,2}$.

Известно о влиянии температуры на характер разрушения металлов в процессе эксплуатации. Каждый сплав или сталь имеют рабочий температурный диапазон, определяемый химическим составом и термообработкой. В этом температурном диапазоне материал гарантированно будет обеспечивать заявленные механические и физико-технические свойства в составе работающего изделия. Для ряда жаропрочных сталей и сплавов характерно хрупкое разрушение при достижении высоких температур, выходящих за верхнюю границу рабочего диапазона. Наличие высокотемпературной хрупкости можно определить по механическим характеристикам, данное явление выражается на зависимостях относительного сужения ψ (рисунок 2.4а) или удлинения δ (рисунок 2.4б) при испытаниях на растяжение при повышенных температурах T , высокотемпературное охрупчивание проявляется на всей совокупности механических характеристик из-за их тесной взаимосвязи. На примере стали 12X18H10T, высокотемпературное охрупчивание начинает проявляться при превышении температуры в 600 °С, что по справочным данным соответствует верхней границе эксплуатационного диапазона деталей из данной стали.

Наилучшие механические характеристика стали и сплавы проявляют в границах допустимых температур, то есть для их разрушения необходимо совершить наибольшую работу вследствие их высокой сопротивляемости

разрушению. При механической обработке выгодно определить противоположные условия – когда материал легко разрушается.

Теме высокотемпературной хрупкости сталей и сплавов посвящено много комплексных исследований [32, 34, 80, 129].

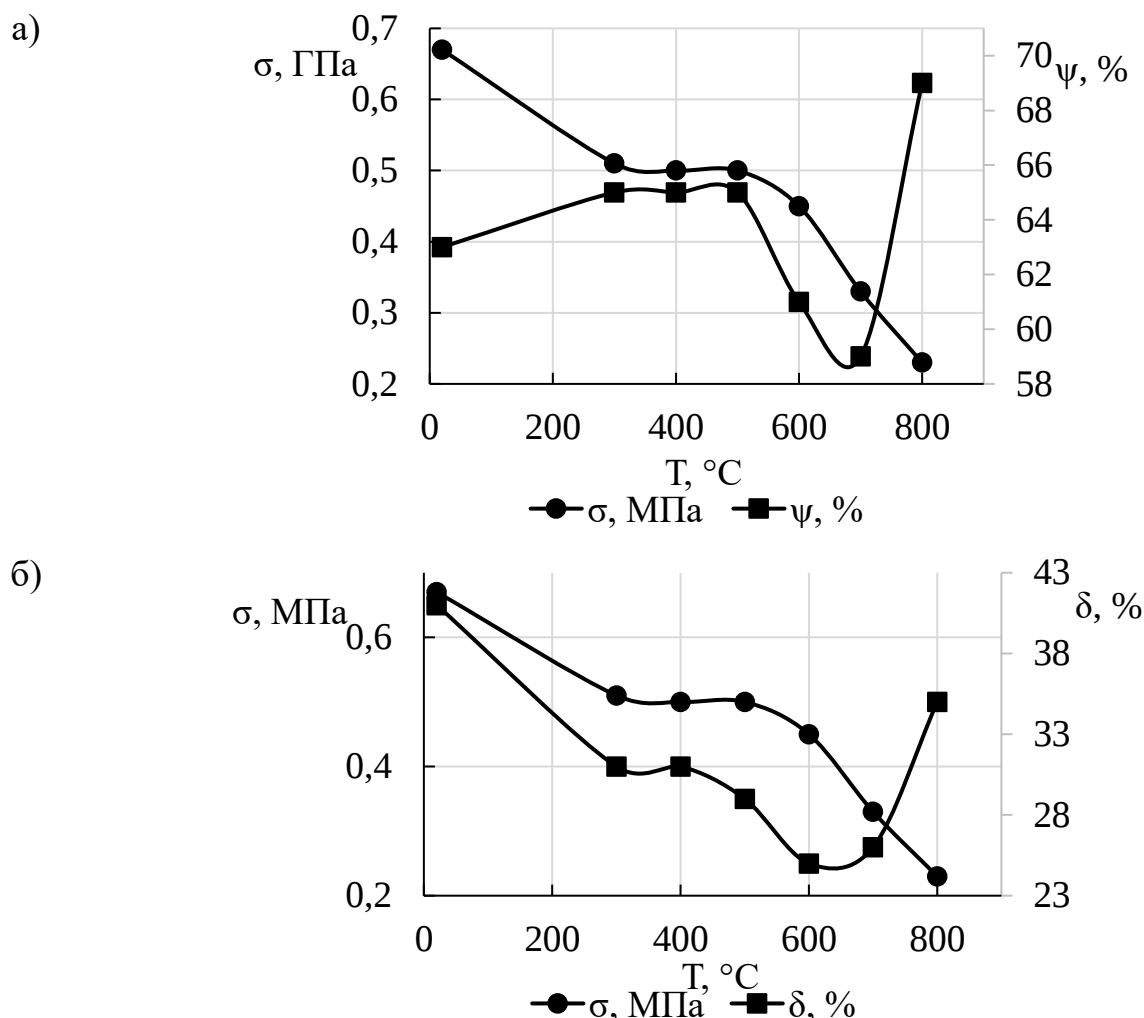


Рисунок 2.4 – Зависимость предела прочности и относительного: а – удлинения; б – сужения от температуры при испытании на растяжение образцов из стали 12X18H10T

Образование трещин при высоких температурах характерно для многих сталей аустенитного класса, в том числе жаростойких, коррозионностойких сталей и сплавов на основе никеля. Это происходит вследствие провала пластичности (ПП), наблюдаемого при нагреве металла до температуры выше половины температуры солидуса (T_s). Конкретное значение границ данного диапазона температур зависит от ряда факторов, наиболее явные из которых – особенности

строения кристаллической решетки, определяемые содержанием углерода и термообработкой для сталей и свойствами интерметаллидов, карбидов в сплавах на никелевой основе.

Существует два интервала хрупкости, которые достаточно трудно идентифицировать экспериментально вследствие малой разницы температур между ними (рисунок 2.5). Рассмотренный ранее ПП наблюдается между $0,5T_s$ и T_s , данные температуры достаточно легко достигаются в зоне резания при точении твердыми сплавами труднообрабатываемых материалов. При дальнейшем повышении температуры следует температурный интервал хрупкости (ТИХ), наблюдающийся между T_s и T_L . Для состояния ТИХ характерны ликвационные и кристаллизационные трещины, температуры в зоне резания не достигают столь высоких значений.

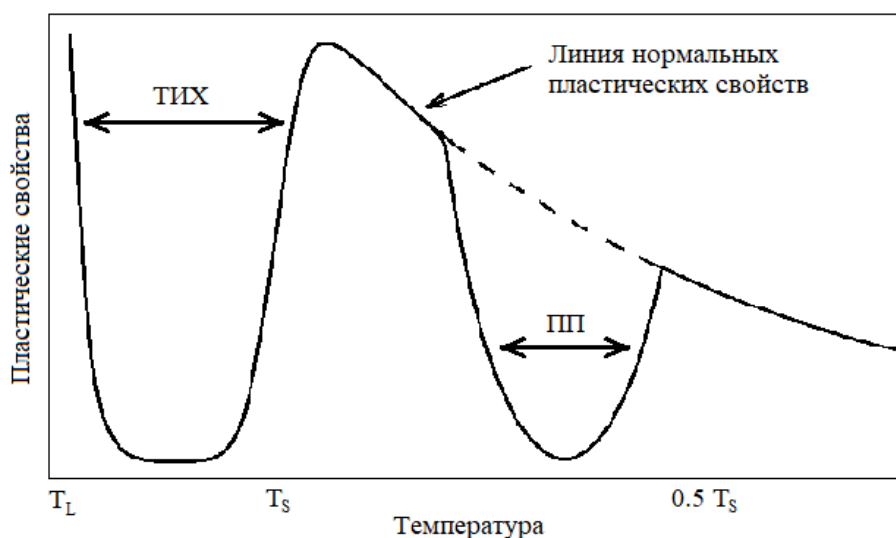


Рисунок 2.5 – Изменение пластичности при повышенных температурах:

ТИХ – температурный интервал хрупкости, ПП – провал пластичности

Область температур между ПП и ТИХ, характеризуемая нормальной пластичностью, может иметь ширину менее 20 °С.

В данной работе под термином «высокотемпературное охрупчивание» будет пониматься диапазон температур провала пластичности, характерный для ряда труднообрабатываемых сталей и сплавов.

В настоящее время, механизм образования трещин в ТИХ и ПП в полной мере не изучен, подробнее с исследованиями по данному направлению можно ознакомиться в [88, 103 – 105].

2.2 О взаимосвязи вибрации резца и колебаний силы резания при точении на основе уравнения динамики колебательного движения

Вершина режущего инструмента при токарной обработке описывают сложные трехмерные траектории вокруг положения равновесия. Такой вид движения называется колебаниями или вибрацией. Технологическая система станка в данном случае, выступает в качестве сложного осциллятора. На практике вибрация является неотъемлемой частью механической обработки и полностью исключить ее невозможно, поскольку каждый узел станка и операция технологического процесса вносят свой вклад в общий вибрационный фон.

Разрушающее действие вибрации отрицательно сказывается на ресурсе режущего инструмента (РИ), механике и электронике станка, снижается качество получаемой поверхности, увеличивается энергопотребление.

Вибрацию принято считать негативным фактором и бороться с ней. Существует множество успешных технических решений по снижению вибрации методами пассивного и активного демпфирования, многократно подавляющих амплитуду колебаний, но ни один метод не способен полностью исключить осцилляции технически сложного оборудования, включающего подвижные компоненты [56, 59, 67, 89, 90, 134].

С другой стороны, вибрация – информативный параметр. От нее нельзя избавиться, но можно использовать в качестве источника диагностических данных, поскольку ее качественный и количественный анализ позволяет получить информацию о вызвавших ее процессах, в частности, вибрация державки резца при точении несет в себе информацию о явлениях, происходящих в процессе резания, параметрах режима резания и характере силового воздействия на инструмент, виде сходящей стружки.

Как и силу резания, вибрацию можно представить в виде трех проекций на оси a_x , a_y , a_z . Вибрация в горизонтальной плоскости в направлении составляющей силы резания P_y совершается в основном за счет колебаний обрабатываемой детали. В вертикальной плоскости, в направлении составляющей силы P_z – за счет колебаний резца. Спектр вибрации технологической системы станка в процессе резания включает частоты множества источников колебаний, которые несут вклад разной степени в общую картину. По характеру все колебания можно разделить на два вида: вынужденные и автоколебания. [130, 133, 134]

Автоколебания – это незатухающие осцилляции системы, поддерживаемые источниками энергии внутри самой системы. Поскольку амплитуда и частота колебаний определяется свойствами получившегося осциллятора, возбуждение происходит на собственных резонансных частотах конструктивных составляющих системы, то есть автоколебания возбуждаются на собственных резонансных частотах системы [67]. Следовательно, частоты ударных спектров будут соответствовать автоколебательным процессам в спектре вибрации при резании. Для выделения чувствительных к автоколебаниям диапазонов частот в общем спектре, применяется метод ударного воздействия. Любая колебательная система отвечает на удар свободными затухающими колебаниями на собственной резонансной частоте.

Вынужденные колебания отличаются от остальных наличием выраженной внешней вынуждающей силы. Параметры таких колебаний определяются параметрами вынуждающей силы, в общем случае частота колебаний равна частоте вынуждающей силы, при условии равенства собственной частоты системы и частоты вынуждающей силы наступает резонанс, который может привести к физическому разрушению колебательной системы. Применительно к процессу резания металлов, для вынужденной составляющей колебаний режущего инструмента внешней периодической силой является главная составляющая силы резания P_z .

Рассмотрим вертикальные колебания вершины резца с точки зрения классической механики. В данном случае, резец допустимо представить в виде

консольно-закрепленной балки, на свободный конец которой по касательной воздействует внешняя сила (имитация главной составляющей силы резания) (рисунок 2.6а).

Известно, что P_z представляет собой внешнюю периодическую силу со сложным частотным составом. В рамках анализа взаимосвязи спектрального состава колебаний P_z и A_z в части вынужденных колебаний допустим, что P_z изменяется по гармоническому закону $P_z = P_0 \cos(\omega t)$. Схема колебаний резца с упрощениями показана на рисунке 2.6б.

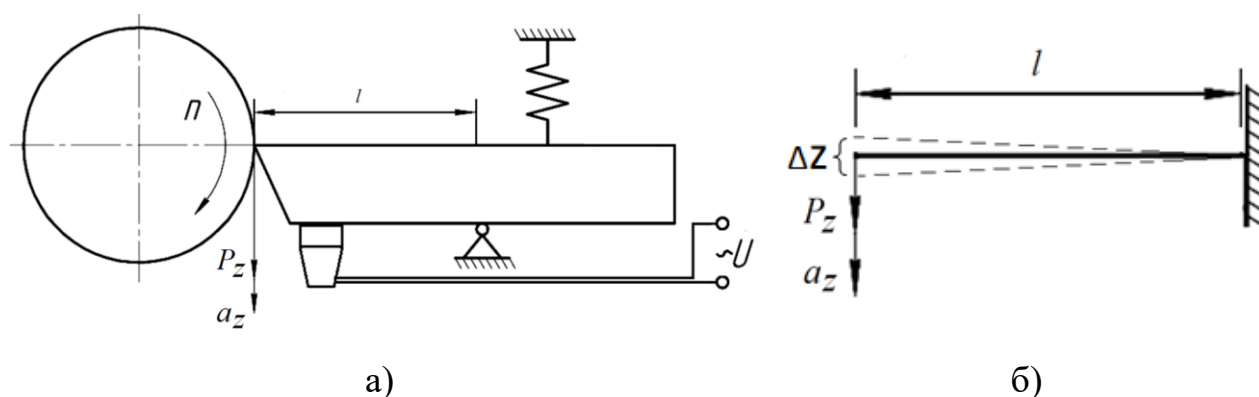


Рисунок 2.6 – Схема анализируемой взаимосвязи колебаний составляющей P_z и виброускорения a_z : а – полная; б – упрощенная

Допустим, что в процессе механических колебаний под воздействием P_z вершина совершает прямолинейное колебательное движение, поскольку смещение вершины от положения равновесия мало по сравнению с длиной балки (вылетом резца l). Таким образом, рассмотрим однокоординатный механический осциллятор, совершающий вынужденные колебания под действием внешней силы, изменяющейся по гармоническому закону. Согласно второму закону Ньютона, ускорение материальной точки прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе. Запишем следствие из второго закона Ньютона (2.1):

$$m\vec{a} = \vec{F}, \quad (2.1)$$

где m – масса, a – ускорение, F – сила, приложенная к телу массой m .

Сила, возвращающая смещённую точку в исходное положение, называется квазиупругой и характеризуется коэффициентом жёсткости k (в данном случае

упругость державки резца). Запишем (2.1) в виде проекции на ось z с учетом квазиупругой силы (2.2):

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -kz, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент упругости, z – смещение от положения равновесия.

Перепишем уравнение в каноническом виде с учетом сил сопротивления (2.3):

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\beta \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = 0, \quad (2.3)$$

где $\beta = b/2m$, b – коэффициент сопротивления среды, $\omega_0^2 = k/m$ – собственная частота свободных незатухающих колебаний осциллятора, $b = \text{const}$, $k = \text{const}$, поскольку считаем систему линейной.

По условию, на систему действует внешняя периодическая возмущающая сила $P_z = P_0 \sin(\omega t)$, тогда, колебательное движение такой системы описывается дифференциальным уравнением, аналогичным закону движения пружинного маятника (2.4):

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\beta \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = \frac{P_0}{m} \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

где P_0 – амплитуда внешней силы, ω – циклическая частота внешней силы.

Таким образом, согласно положениям классической механики Ньютона каждая гармоника спектра составляющей силы резания P_z , будет выступать в качестве вынуждающей силы колебаний вершины резца A_z , следовательно, частотный состав спектров в области вынужденных колебаний должен иметь аналогичный состав.

Вибрации при резании могут быть следствием циклического образования и срыва неустойчивого нароста. Однако, известно, что при использовании твердых сплавов наибольшая величина нароста имеет место при температуре резания 300 °С, а после 600 °С наростообразование отсутствует, о чем свидетельствует зависимость усадки стружки от температуры на передней грани при точении

(рисунок 2.7). Данный факт также подтверждается зависимостью величины действительного переднего угла γ_1 от температуры резания (рисунок 2.8) [119].

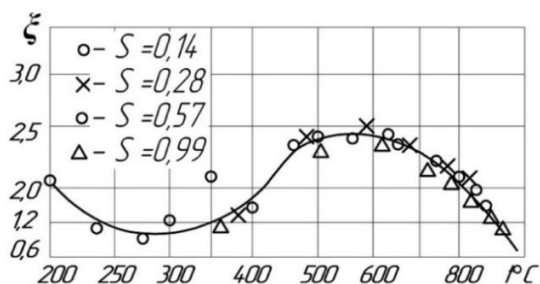


Рисунок 2.7 – Зависимость усадки стружки от температуры на передней грани при точении (сталь 40, $\gamma = 10$) [71]

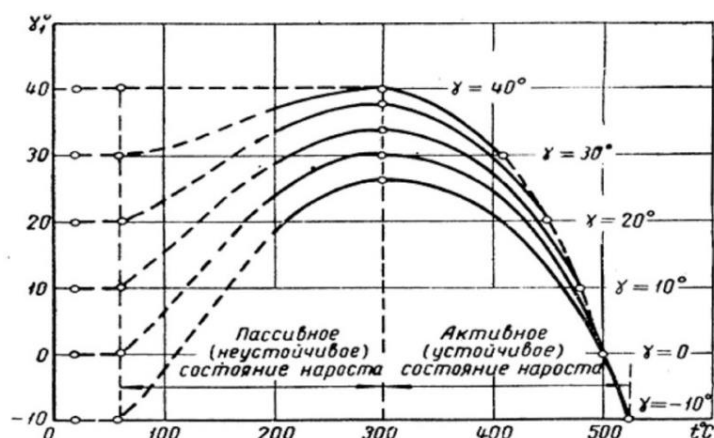


Рисунок 2.8 – Усредненные величины действительного переднего угла γ_1 в зависимости от температуры на резце и переднего угла резца γ [119]

Сложное влияние скорости резания на размеры нароста отмечает В.Ф. Бобров: «Экспериментально установлено, что при наиболее распространенных условиях резания сталей нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при котором температура $\theta \approx 300^\circ\text{C}$, и исчезает при значении скорости, при которой температура $\theta \approx 600^\circ\text{C}$ » [37, стр. 109] (рисунок 2.9). «Из рисунка 2.10 видно, что на кривой независимо от толщины срезаемого слоя и скорости резания впадина и вершина соответствуют температурам 300 и 600°C , при которых нарост получает свое наибольшее развитие и исчезает.» [37, стр. 118].

Далее при экспериментальных исследованиях в данной работе скорости резания достаточно высоки для обеспечения температуры в зоне резания более 600°C , следовательно, наростообразование в качестве источника колебаний не рассматривается.

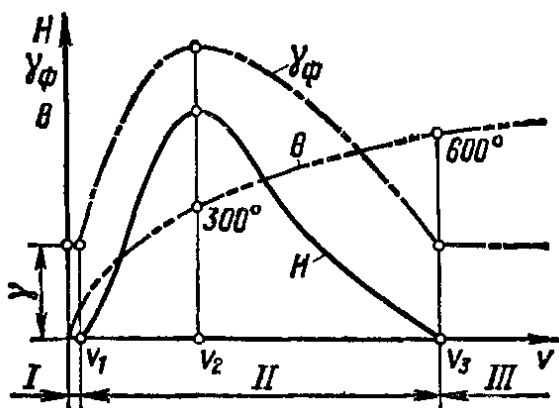


Рисунок 2.9 – Влияние скорости резания на температуру резания, высоту нароста и фактический передний угол [37]

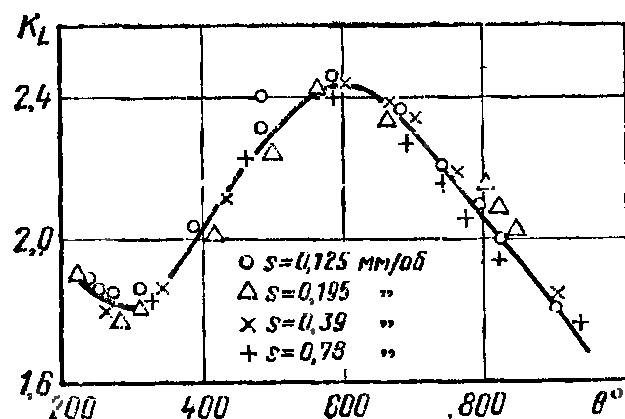


Рисунок 2.10 – Влияние температуры резания на коэффициент усадки стружки при различных подачах (точение стали 40, $t = 4$ мм, $v = 10 \dots 170$ м/мин) [37]

Нет единого мнения об устойчивости процесса резания при образовании суставчатой или элементной стружки [47]. Эти виды стружкообразования приводят к колебаниям скорости резания и величины деформации при образовании очередного элемента стружки. Не ясно, считать ли такой характер вибраций вынужденным или автоколебательным. В первом случае логично считать, что переменная величина главной составляющей силы резания выступает в роли вынуждающей силы. Во втором случае вибрацию рассматривают с точки зрения взаимодействия периодического изменения величины деформации стружки (автоколебательный процесс) и упругой конструкции станка. Принято считать колебания такого рода вынужденными при малых амплитудах, когда они сопровождают резание с малой толщиной срезаемого слоя на чистовых и получистовых операциях, в совокупности с достаточной жёсткостью станочной системы. В противном случае, с большой амплитудой колебаний и малой жёсткостью станка систему считают неустойчивой, а вибрации – автоколебаниями. Следует отметить, если автоколебания возникают на собственных резонансных частотах системы, и от режимов резания не зависят.

Таким образом, для работы с вибрацией технологической системы станка необходимо провести анализ общего спектра в совокупности со спектрами силы

резания, для выделения вынужденной составляющей, и ударными спектрами конструкций системы, для подавления частот автоколебаний. Спектр работающего станка без запущенного процесса резания необходим для исключения из общего спектра естественного фона и шума станка, не имеющего отношения к процессу резания.

2.3 Научная гипотеза

Схема взаимосвязей, иллюстрирующая научную гипотезу, показана рисунке 2.11.

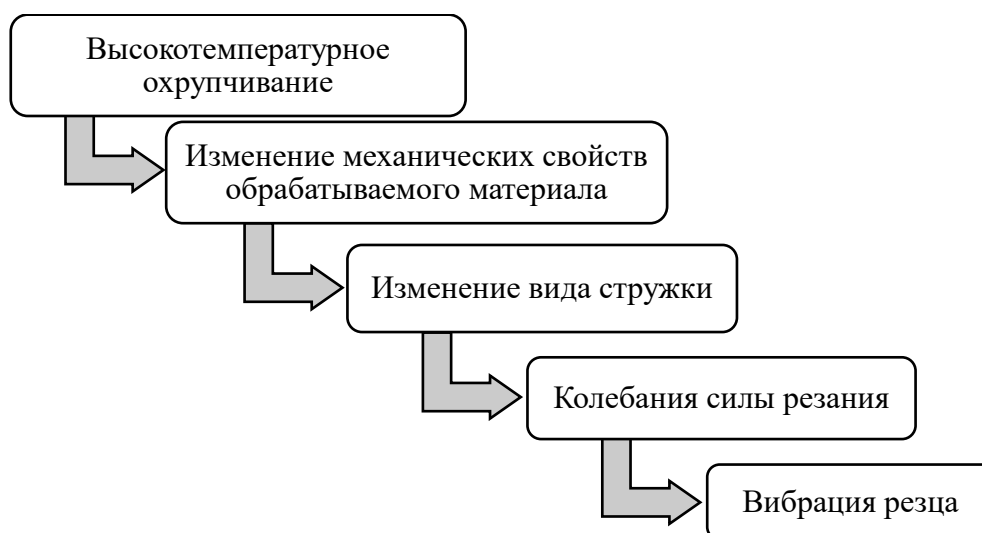


Рисунок 2.11 – Схема взаимосвязи явлений при точении сталей и сплавов

На основании вышеизложенной совокупности взаимосвязей, авторами выдвинута научная гипотеза, что формирование УМР СРТП сборных резцов при точении возможно путем определения и поддержания диапазона скоростей резания (температур резания), обеспечивающего изменение механических свойств обрабатываемого материала (параграф 1.3) в результате высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала (параграф 2.1), приводящего к изменению вида стружки со сливной в элементную, что определяет состав спектра колебаний главной составляющей силы резания P_z и взаимосвязанной с ней главной составляющей виброускорения A_z (параграф 2.2).

2.4 Вибрационные характеристики механического осциллятора и измерение их параметров

Колебательное движение реального объекта, например, резца при точении, имеет сложный характер. Спектр такой вибрации состоит из множества компонент. Для интерпретации и анализа сложные сигналы принято рассматривать как сумму гармонических составляющих со своими частотами, амплитудами и фазами. Зависимость пространственных координат точек колеблющегося тела от времени вокруг положения равновесия или зависимость колебаний электрической величины вокруг среднего значения от времени называют временным сигналом или сигналом во временной области.

Во временной области вибрация может характеризоваться следующими вибрационными характеристиками: виброперемещение, виброскорость или виброускорение.

Виброперемещение – зависимость координаты колеблющейся точки (или центра масс объекта) от времени вблизи положения равновесия (2.5).

$$x = X_0 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (2.5)$$

где x – координата (перемещение), X_0 – амплитуда перемещения, ω_0 – циклическая частота колебаний, t – время, φ – начальная фаза.

Измеряется в микрометрах. Для преобразования виброперемещения в электрический сигнал используют вихретоковый преобразователь, называемый проксиметром (рисунок 2.12а). Спектр виброперемещения сосредоточен в низкочастотной области, его применение выгодно, когда требуется построить орбиту, по которой перемещается колеблющееся тело. Большинство проксиметров, применяемых для построения орбиты роторов, имеют диапазон рабочих частот не более 1 кГц, поскольку ротора имеют оборотную частоту не более 60000 об/мин. Верхний предел рабочей частоты зависит от несущей частоты генератора, подключенного к возбуждающей катушке вихретокового преобразователя, поскольку информативным сигналом является огибающая, модулирующая

амплитуду высокочастотного несущего сигнала. Другие способы применения проксиметров состоят в измерении толщины непроводящих (например, лакокрасочных) покрытий – толщинометрия – или в обнаружении дефектов поверхностного слоя токопроводящих материалов – один из методов неразрушающего контроля. Для этих целей и нужд вибродиагностики существуют вихрековые преобразователи с несущей частотой до 3 МГц, рабочий частотный диапазон таких проксиметров от 0 Гц до 10 кГц, в особых исполнениях до 24 кГц. Принцип работы проксиметра на примере простой схемы с одной катушкой изображен на рисунке 2.12б.

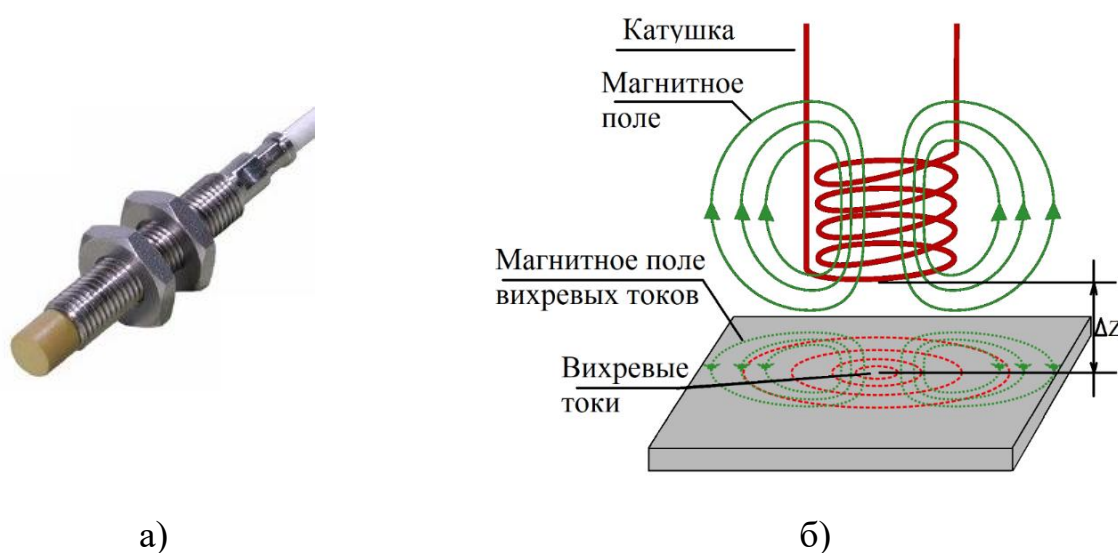


Рисунок 2.12 – Проксиметр: а – внешний вид; б – принцип работы

На катушку проксиметра подается переменный высокочастотный ток от внешнего генератора. Вокруг катушки создается переменное магнитное поле заданной частоты, наводящее вихревые токи в объекте контроля, если его материал – проводник. Вихревые токи, создают свое магнитное поле, действующее навстречу полю катушки, изменяя ее комплексное сопротивление, которое эквивалентно изменяется в зависимости от величины зазора между катушкой и объектом контроля.

Виброскорость – первая производная виброперемещения по времени или скорость изменения координаты колеблющейся точки во времени (2.6).

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 X_0 \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (2.6)$$

где v – скорость перемещения колеблющейся точки.

Измеряется в единицах скорости в мм/с. Принцип действия вибродатчика для преобразования виброскорости в электрический сигнала основан на генерации электродвижущей силы (ЭДС) в катушке индуктивности при осевом перемещении внутри нее постоянного магнита на упругом подвесе, выполняющего роль инертной массы. Велосиметры отличаются большой амплитудой выходного сигнала, который можно использовать без применения усилителей, однако их рабочий диапазон ограничен средними частотами. Спектр виброскорости наиболее равномерно распределен по частотам при диагностике машин, поэтому часто применяется для определения общего состояния массивных систем, таких как генераторы, газотурбинные двигатели, компрессоры. Согласно классической махания, виброскорость пропорциональна импульсу колеблющейся массы или ее кинетической энергии. Типичный диапазон частот при диагностике по виброскорости составляет 5 – 1000 Гц.

Виброускорение – вторая производная виброперемещения по времени или ускорение изменения координаты колеблющейся точки в течении времени (2.7).

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 X_0 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (2.7)$$

где a – ускорение колеблющейся точки.

Измеряется в единицах ускорения системы СИ – м/с². Вибродатчик для преобразования виброускорения в пропорциональный электрический сигнал называется акселерометром (рисунок 2.13).

Принцип действия основан на прямом пьезоэффекте – явлении поляризации в кристалле под действием механического напряжения. В следствии поляризации на кристалле возникает заряд, а механическое напряжение создается под действием силы со стороны инертной массы. Все пьезоакселерометры делятся на два типа по выходному сигналу: заряд или напряжение. Для первого необходим усилитель

заряда и прием сигнала дифференциальным каскадом для подавления синфазных помех из-за очень малой амплитуды полезного сигнала. Такой вибропреобразователь является генераторным, то есть непосредственно генерирует полезный сигнал и не требует внешнего питания. Для упрощения конструкции измерительных каналов и увеличения чувствительности применяются акселерометры с ICP выходом по напряжению (рисунок 2.14), в конструкции таких датчиков предусмотрен встроенный усилитель заряда.

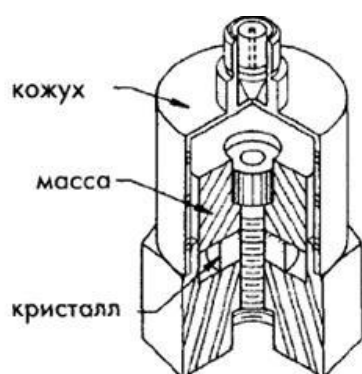


Рисунок 2.13 – Пьезоэлектрический акселерометр с зарядовым дифференциальным выходом

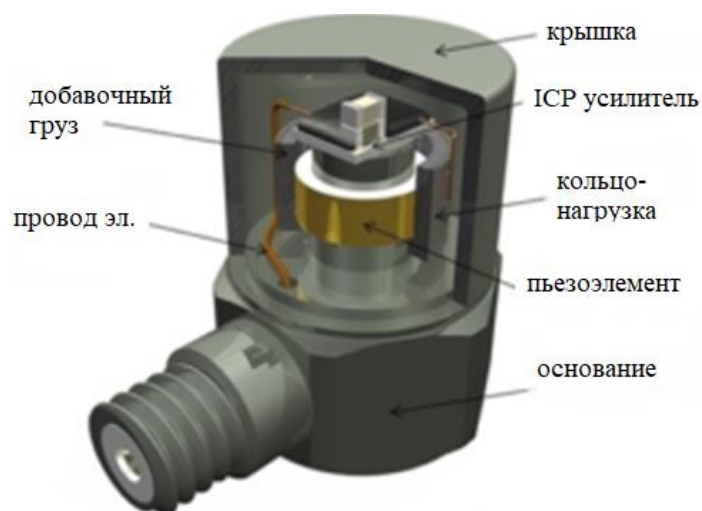


Рисунок 2.14 – Пьезоэлектрический акселерометр со встроенным усилителем и выходом по напряжению (ICP)

Для работы с ними необходимое внешнее питание, которое преобразователь модулирует полезным сигналом. Прием сигнала с активного пьезоакселерометра осуществляется через разделительную емкость для фильтрации полезного сигнала от постоянной составляющей и обеспечения гальванической развязки между первичным и вторичным преобразователями (рисунок 2.15).

Измерение параметров вибрации с помощью акселерометров наиболее распространено, поскольку операция интегрирования достаточно легко реализуется даже на дискретных компонентах, в отличие от дифференцирования. Следовательно, получив сигнал виброускорения, можно с помощью интегрирования перейти к виброскорости и виброперемещению.

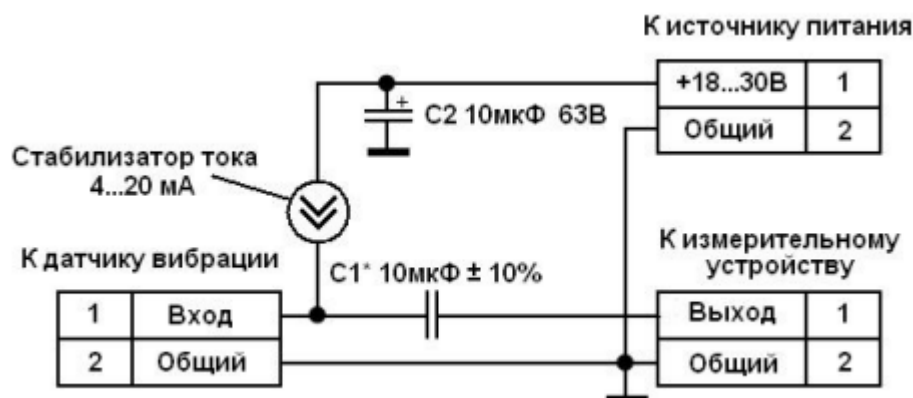


Рисунок 2.15 – Типовая схема включения пьезоакселерометра с ICP выходом

Виброускорение является чувствительным параметром в широком диапазоне частот, позволяет выявить особенности вибрации конкретных узлов оборудования и применяется для диагностики надежности конструктивных элементов систем, поскольку виброускорение пропорционально разрушающей силе и работе колебательного движения.

Для описания вибрации во временной области применяется набор следующих параметров.

Амплитуда вибрации имеет смысл при описании гармонического колебания, показывает максимальное отклонение колеблющейся величины от среднего значения или положения равновесия. При описании сложных колебаний вместо амплитуды применяются такие величины как максимальное значение, минимальное значение и размах.

Среднее квадратичное значение (СКЗ) – вычисляется как корень из среднего квадрата амплитуды колебаний (2.8):

$$СКЗ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}, \quad (2.8)$$

где СКЗ – среднеквадратичное значение сигнала (СКЗ), [мВ]; N – размер выборки, [шт.]; y_i – i-й отсчет выборки, [мВ].

Полученное значение СКЗ будет верно, если период отбора значений мгновенных амплитуд будет больше или равен периоду колебаний. Описание

общего уровня вибрации по СКЗ получило наибольшее распространение, поскольку несет информацию для оценки мощности и энергии колебаний.

Частота (период) колебаний для гармонической вибрации – число полных колебаний в единицу времени. Для описания вибрации со сложным составом применяется частотный спектр, представляющий собой зависимость амплитуды каждой гармоники от ее частоты.

Амплитудные характеристики гармоник колебательного процесса на спектре измеряются в абсолютных и относительных единицах. Амплитудные характеристики во временной области измеряются только в абсолютных величинах, поскольку могут принимать отрицательные значения, что недопустимо при логарифмировании. К абсолютным относятся единицы системы СИ и их производные – микрометры для виброперемещения, миллиметры в секунду для виброскорости и метры в секунду за секунду для виброускорения. Относительные единицы показывают во сколько раз измеренная величина отличается от общепринятого порогового значения в логарифмическом масштабе. При использовании относительных единиц необходимо указывать используемый пороговый уровень, поскольку в мире нет общепринятого стандарта. Например, в Российской Федерации пороговый уровень регламентируют ГОСТ 12.1.034-81, где: $V_o = 5 \cdot 10^{-5}$ мм/с; $A_o = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с²; ГОСТ 30296-95, где: $V_o = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с; $A_o = 1 \cdot 10^{-6}$ м/с². В зарубежных системах вибродиагностики и акустики заложен стандарт ISO 1683, где пороговые значения приняты $V_o = 1 \cdot 10^{-6}$ мм/с; $A_o = 1 \cdot 10^{-6}$ м/с²; $S_o = 1 \cdot 10^{-6}$ мкм. Пересчет значения абсолютной величины в относительную с использованием стандартных пороговых значений для амплитуд производится по формулам (2.9):

$$L_S = 20 * \lg \frac{S}{S_o}, \quad L_A = 20 * \lg \frac{A}{A_o}, \quad L_V = 20 * \lg \frac{V}{V_o}, \quad (2.9)$$

Следует отметить, что при использовании пороговых значений по ISO 1683 в логарифмическом масштабе числовые значения виброускорения, виброскорости и виброперемещения равны лишь при одной частоте в 159,2 Гц. Именно на эту частоту настраиваются калибраторы для проверки измерительных каналов систем виброконтроля оборудования.

Выбор первичного преобразователя происходит на основании его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и способа крепления датчика на контролируемую поверхность.

АЧХ – зависимость выходной величины от входной для каждой частоты преобразуемого сигнала, выражается в коэффициенте передачи (рисунок 2.16). Для акселерометра с ИСР выходом выходной величиной является электрическое напряжение, а входной – сила, действующая на инертную массу со стороны контролируемой колеблющейся поверхности. Значение выходной величины часто выражают в относительных единицах – децибелах (дБ) – для удобства построения зависимости с широким диапазоном значений, поскольку минимальное и максимальное значения по оси ординат могут отличаться в сотни и тысячи раз.

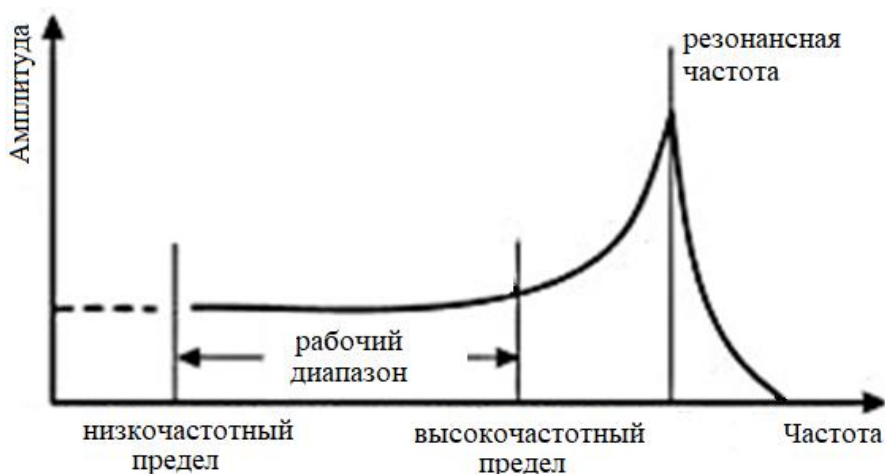


Рисунок 2.16 – Типовая АЧХ пьезоэлектрического акселерометра

Способ крепления вибродатчика оказывает существенное влияние на его АЧХ (рисунок 2.17). Степень жёсткости крепления определяет положение пика собственной резонансной частоты преобразователя на АЧХ и ширину рабочего диапазона. Наиболее жестким является крепление на шпильку, собственная резонансная частота акселерометра в таком случае составляет более 30 кГц, в зависимости от конкретной модели. Менее жёстким, но наиболее распространенным в промышленности является метод крепления на магнит, в таком случае резонансная частота снижается и может достигать 15 кГц в зависимости от конкретного датчика и силы используемого магнита.

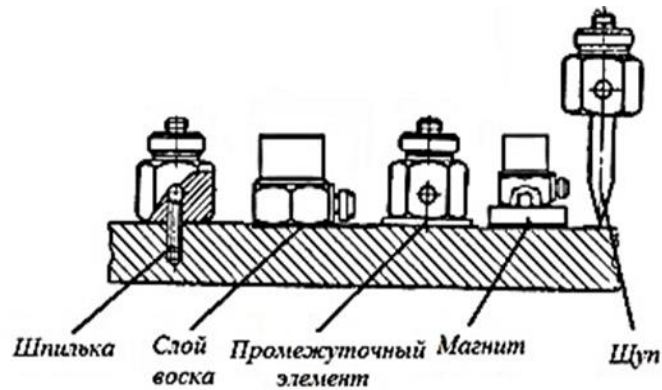


Рисунок 2.17 – Виды крепления акселерометра на поверхность

Наименее жестким способом измерения вибрации является ручной щуп, когда акселерометр прижимается к контролируемой поверхности мускульной силой человека. Такой способ допускается использовать только при измерении общего уровня вибрации частотой до 2 кГц на объектах соизмеримой с человеком массы или более (рисунок 2.18).

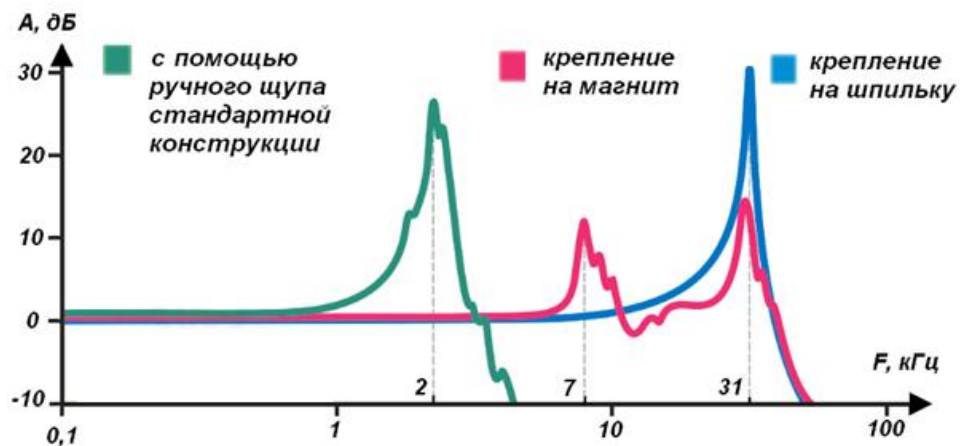


Рисунок 2.18 – Зависимость амплитудно-частотной характеристики акселерометра от способа крепления

Прижатый к поверхности датчик добавляет к общей колеблющейся массе системы не только свою массу порядка десятков или сотен грамм, как в случае шпильки или магнита, но и массу прижимающего человека, что приводит к изменению действительного спектра колебаний и ошибочным выводам.

Для описания вибрации в частотной области применяется зависимость амплитуды сигнала от частоты – амплитудный спектр (далее спектр) и зависимость фазы от частоты – фазовый спектр.

Анализ спектров позволяет получить полную информацию об исследуемом сигнале, поскольку несет информацию об амплитудах и фазах для каждой частотной составляющей спектра (гармоники) в пределах ошибок дискретизации и квантования. Физические явления и процессы отражаются в спектре в виде отдельных пиков или их групп на определенных частотах. Соотнесение характерных частот спектра и вызвавших их явлений – основная цель спектрального анализа.

2.5 Методы математического анализа сигналов вибрационных характеристик во временной и частотной областях

Сигнал виброускорения во временной области малоинформативен. Его основные характеристики – амплитудное значение, СКЗ. Временной сигнал несет в себе множество посторонних компонент, которые с помощью аналоговой фильтрации подавить полностью задача весьма трудоемкая. В связи с этим, рационально комбинировать аналоговую фильтрацию, выполненную физически на дискретных компонентах на уровне измерительного канала, и цифровую, реализованную на базе ЭВМ, выполняющую финальную обработку первичных данных. Аналоговая фильтрация служит для подавления высокочастотных и низкочастотных помех, а также исключает эффект наложения спектров при оцифровке, подавляя частоты выше половины частоты дискретизации. Цифровая фильтрация, в применении к данной работе, необходима для реализации узкополосных режекторных фильтров, подавляющих частоты, не рассматриваемые в данном контексте.

Для реализации описанной выше обработки сигналов применяется следующий набор математических инструментов.

2.6.1 Прямое преобразование Фурье.

Традиционным инструментом для перехода от временной области к частотной является одно из операторных преобразований – прямое преобразование Фурье (ПФ). Оно позволяет представить сложный сигнал в виде суммы

гармонических составляющих на основе вычисления корреляции между сигналом во временной области и парами взаимно ортогональных гармонических функций (рисунок 2.19). Временной сигнал с помощью преобразования Фурье можно представить в виде комплексного спектра, несущего информацию об амплитудах (вещественная часть) и фазах (комплексная часть).

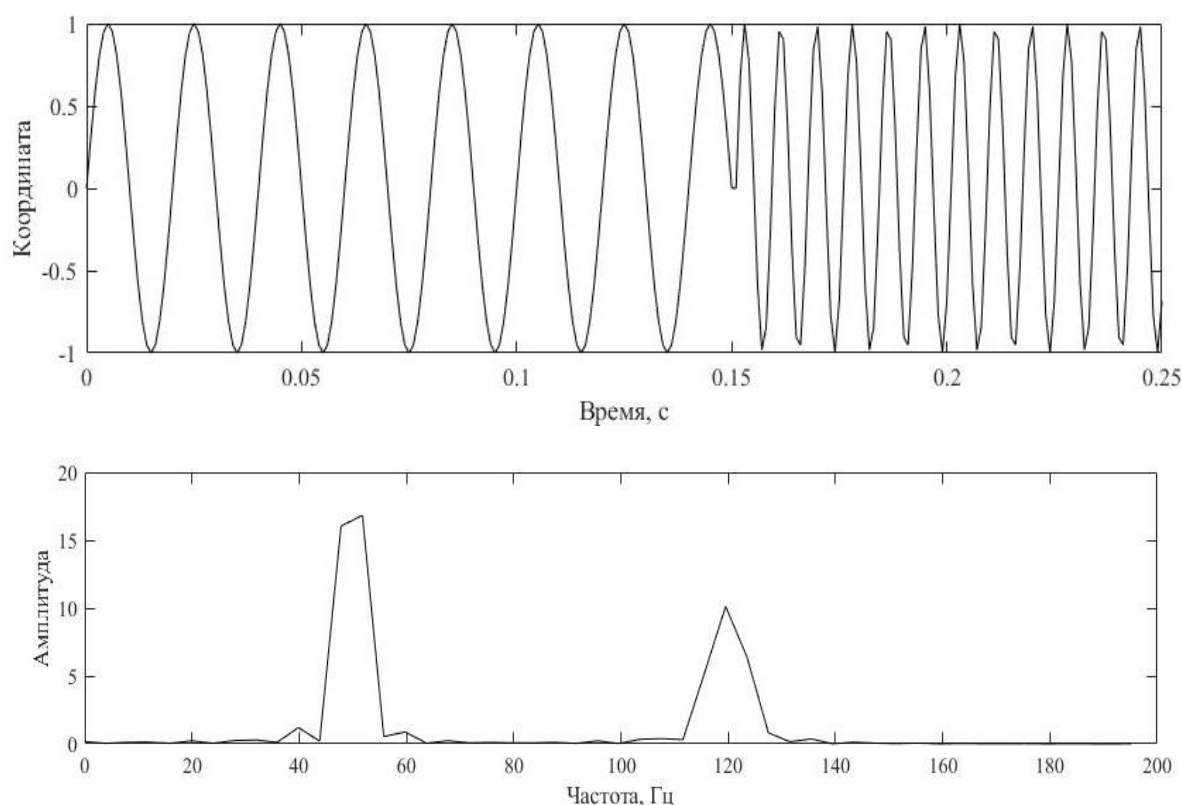


Рисунок 2.19 – Сигнал из двух сменяющих друг друга синусоид и его Фурье-спектр

В случае анализа вибрации технологической системы станка интерес представляет амплитудный спектр – зависимость амплитуд гармоник от частоты, однако, существует ряд ограничений. ПФ применимо только для периодических сигналов, в случае сигнала, записанного в результате эксперимента принято считать весь период наблюдения одним периодом исследуемого сигнала. Результат ПФ в значительной мере зависит от выбранной частоты дискретизации, определяющей разрешающую способность ПФ. Анализируемый сигнал получен с помощью аналого-цифрового преобразования и задан таблично, в виде массива точек. При данных условиях, применяется дискретное преобразование Фурье

(ДПФ), а точнее, его ускоренный алгоритм расчета – быстрое преобразование Фурье (БПФ).

ДПФ периодического дискретного сигнала $x(n)$ с периодом N определяется формулой (2.10) и определяет k -ю Фурье-гармонику дискретного спектра $X(k)$ по функции дискретного аргумента $x(n)$.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk} \right), \quad (2.10)$$

где $X(k)$ – дискретный спектр; $k = 0, 1, \dots, N-1$ – номер Фурье-гармоники; $x(n)$ – периодический дискретный сигнал; N – количество отсчетов сигнала.

БПФ – представляет собой набор алгоритмов для ускорения вычисления ДПФ, среди которых основными считаются алгоритм Кули-Тьюки с прореживанием по времени и алгоритм Рейдера-Бреннера с прореживанием по частоте.

В параграфе 2.2 настоящей главы проанализирована связь внешней периодической вынуждающей силы и вынужденных колебаний, описываемых гармоническим законом. Поскольку в данной работе исследуется вынужденная составляющая спектра, разложение сигнала только на гармонические составляющие позволяет исключить локальные удары и флуктуации, не относящиеся к исследуемому явлению. В таком случае, применение преобразования Фурье становится полностью обоснованным, поскольку негармонические составляющие при принимаются во внимание.

2.6.2 Оконное преобразование Фурье

Преобразование Фурье позволяет локализовать гармоники временного сигнала в частотной области, а оконное преобразование Фурье (ОПФ) позволяет локализовать сигнал не только по частоте, но и по времени (рисунок 2.20). Для этого производится умножение на оконную функцию, смещающуюся по времени, то есть ПФ вычисляется для каждого временного промежутка, ограниченного оконной (весовой) функцией U (2.11). Однако, одновременно обеспечить высокое разрешение по времени и по частоте невозможно. Чем уже окно, тем выше разрешение по времени и ниже разрешение по частоте. Результатом ОПФ является

спектрограмма – двумерное цветное изображение, отражающее зависимость спектральной плотности мощности сигнала от времени. Спектрограмма имеет три координаты – частоту, время и амплитуду, отображаемую в виде цвета.

$$X(k, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x(n)U(n - m)e^{-j\omega nk}), \quad (2.11)$$

где U – оконная функция, ω – циклическая частота k -ой гармоники.

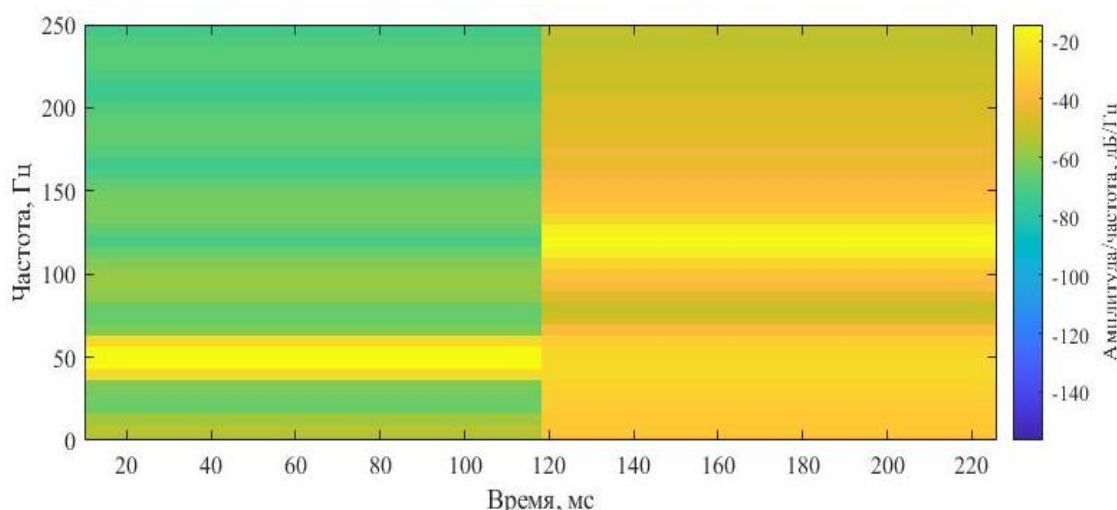


Рисунок 2.20 – Спектрограмма сигнала из двух сменяющих друг друга синусоид

2.6.3 Коэффициент корреляции и функция когерентности

Коэффициент корреляции r используется для описания степени взаимосвязи двух анализируемых сигналов во временной области. Коэффициент корреляции может принимать значения в диапазоне $[-1; 1]$. При $r = 0$ связь между сигналами отсутствует, при $r \rightarrow 1$ между сигналами устойчивая положительная корреляция, при $r \rightarrow -1$ между сигналами устойчивая отрицательная корреляция.

Функция когерентности γ_{xy} (2.12) является аналогом коэффициента корреляции в частотной области и показывает степень взаимосвязи гармонических составляющих анализируемых сигналов.

$$\gamma_{xy}^2(f_k) = \frac{|\sum_{j=1}^n X_j^*(f_k)Y_j^*(f_k)|}{\sum_{j=1}^n |X_j(f_k)|^2 \sum_{j=1}^n |Y_j(f_k)|^2}, \quad (2.12)$$

где $X_j(f_k)$ – j -й отсчет сигнала X при k -ой частоте; $Y_j(f_k)$ – j -й отсчет сигнала Y при k -ой частоте; n – число отсчетов.

Функция когерентности рассчитывается как квадрат взаимной спектральной плотности двух сигналов, деленный на оба спектра мощности и может принимать

значения в диапазоне $[0; 1]$. При $\gamma_{xy} = 0$ принято считать, что на анализируемой частоте f наблюдается только шум, чем ближе значение γ_{xy} к единице на анализируемой частоте f , тем больше совпадает гармонический состав сигналов на частоте f .

2.6.4 Фильтрация

В общем случае под фильтрацией в технике понимают некую операцию, изменяющую частотный состав сигнала. Изменение заключается в подавлении, выделении или сдвиге фазы некоторых частот. И аналоговый и цифровой фильтр можно выразить в качестве математической функции, выражающей зависимость между откликом фильтра и входным воздействием на него. Если на вход фильтра подать единичный импульс, на выходе получим отклик, называемый импульсной характеристикой. Переходная характеристика получается в результате подачи на вход ступенчатого воздействия. Передаточная характеристика рассчитывается с помощью математического аппарата z -преобразования. Цифровые фильтры разделяют на два класса: с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Отличие заключается в реакции на единичный импульс в начальный момент времени. В силу рекурсивной реализации ответ БИХ-фильтра на импульсное воздействие в начальный момент времени имеет теоретически бесконечную длительность. Ответ КИХ-фильтра имеет конечную продолжительность. Частотные параметры фильтра определяются его АЧХ – амплитудно-частотной характеристикой и ФЧХ – фазово-частотной характеристикой. АЧХ представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты, а ФЧХ – зависимость вносимой задержки (сдвига фазы) от частоты. Классификация фильтров по АЧХ приведена на рисунке 2.23.

Методов и способов реализации цифровой фильтрации разработано большое количество. Они позволяют получить информацию в самых неблагоприятных условиях, в том числе, когда уровень шума многократно превышает амплитуду полезного сигнала. Наиболее эффективно применение цифровой фильтрации в комплексе с аппаратно реализованными аналоговыми фильтрами. Это снижает

нагрузку на вычислительное ядро, упрощает алгоритм обработки первичных данных, защищает измерительный канал от перегрузки.

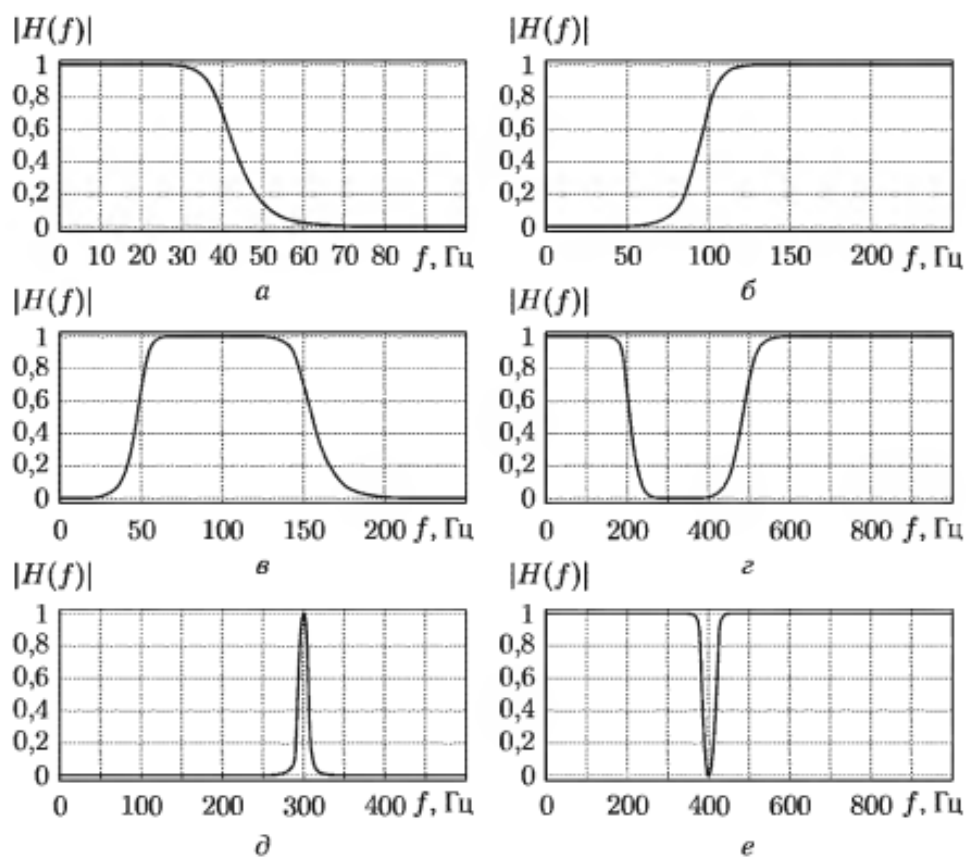


Рисунок 2.23 – Классификация фильтров по АЧХ: а – фильтр нижних частот (ФНЧ); б – фильтр верхних частот (ФВЧ); в – полосо-пропускающий фильтр; г – полосо-заграждающий фильтр; д – фильтр-резонатор; е — режекторный фильтр

Когда речь заходит о проектировании измерительных каналов для сбора данных в условиях промышленного производства, вопрос правильной фильтрации и защиты входных цепей от перегрузок встает особенно остро. Снимая полезный сигнал с технологической системы станка, измерительный канал воспринимает мощное воздействие сетевых и общепромышленных наводок. В первую очередь, следует защитить систему от наводки 50 Гц, которая на промышленных объектах может достигать десятков вольт. Следующей идет защита от импульсных помех в цепи питания переменного тока, возникающих при включении/отключении мощных реактивных нагрузок на линии. В некоторых случаях, кроме фильтрации в измерительном канале, требуется защитить и цепи питания измерительной

системы, поскольку помехи по питанию оказывают значительное влияние на работу аналоговой части измерительной системы и могут повредить или вывести из строя цифровой блок. Описанные выше методы и способы принято реализовывать аналоговыми фильтрами, построенными на физических компонентах.

Цифровая фильтрация выступает в качестве высокоточного инструмента для выделения требуемых компонент сигнала на этапе спектрального анализа. Построение аналоговых фильтров со скоростью спада АЧХ, с близкой к цифровым, сопряжено с рядом трудностей. Поэтому для реализации полосовых фильтров и режекторных фильтров с высокой скоростью спада АЧХ часто применяется программный синтез на основе операторных преобразований (Преобразование Фурье, Вейвлет).

2.6.5 Численное дифференцирование

При разработке любой системы автоматического управления необходимо заложить в алгоритм обработку данных, характеризующих действительные значения параметров управляемого объекта во время осуществления воздействия. Параметры, на основании которых система будет принимать решение о выборе выходного воздействия, необходимо проанализировать согласно совокупности условий регулирования. В общем случае, автоматическая система непрерывно измеряет опорный параметр регулируемой системы, производит его математическую обработку, сравнивает с заложенными установками и рассчитывает выходное воздействие. Измеренные сигналы в случае построения цифровой системы управления всегда заданы в табличном виде. Для анализа таблично заданных функций с помощью ЭВМ применяются численные методы интегрирования и дифференцирования.

Производную таблично заданной функции можно найти с помощью методов конечных разностей. Пусть функция $y_i = f(x_i)$ задана таблично, то есть значениям функции y_i соответствует множество аргументов x_i . Разница между x_i и x_{i-1} называется шаг h и является константой. Производную y_i' в точке x_i методом конечных разностей можно найти рядом способов (2.13-2.15):

Левые разности: $y'_i \approx \frac{y_i - y_{i-1}}{h}$ (2.13)

Правые разности: $y'_i \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{h}$ (2.14)

Центральные разности: $y'_i \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}$ (2.15)

Вычисление производной второго порядка, соответственно (2.12):

$$(y'_i)' \approx \frac{y'_{i+1} - y'_i}{h} \approx \frac{\frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h}}{h} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} \quad (2.16)$$

Аналогичным образом вычисляются производные высших порядков.

2.6 Блок-схема диссертации

Алгоритмизация научного исследования позволяет полно раскрыть совокупность основных задач и изложить этапы работы в системном виде (рисунок 2.24).

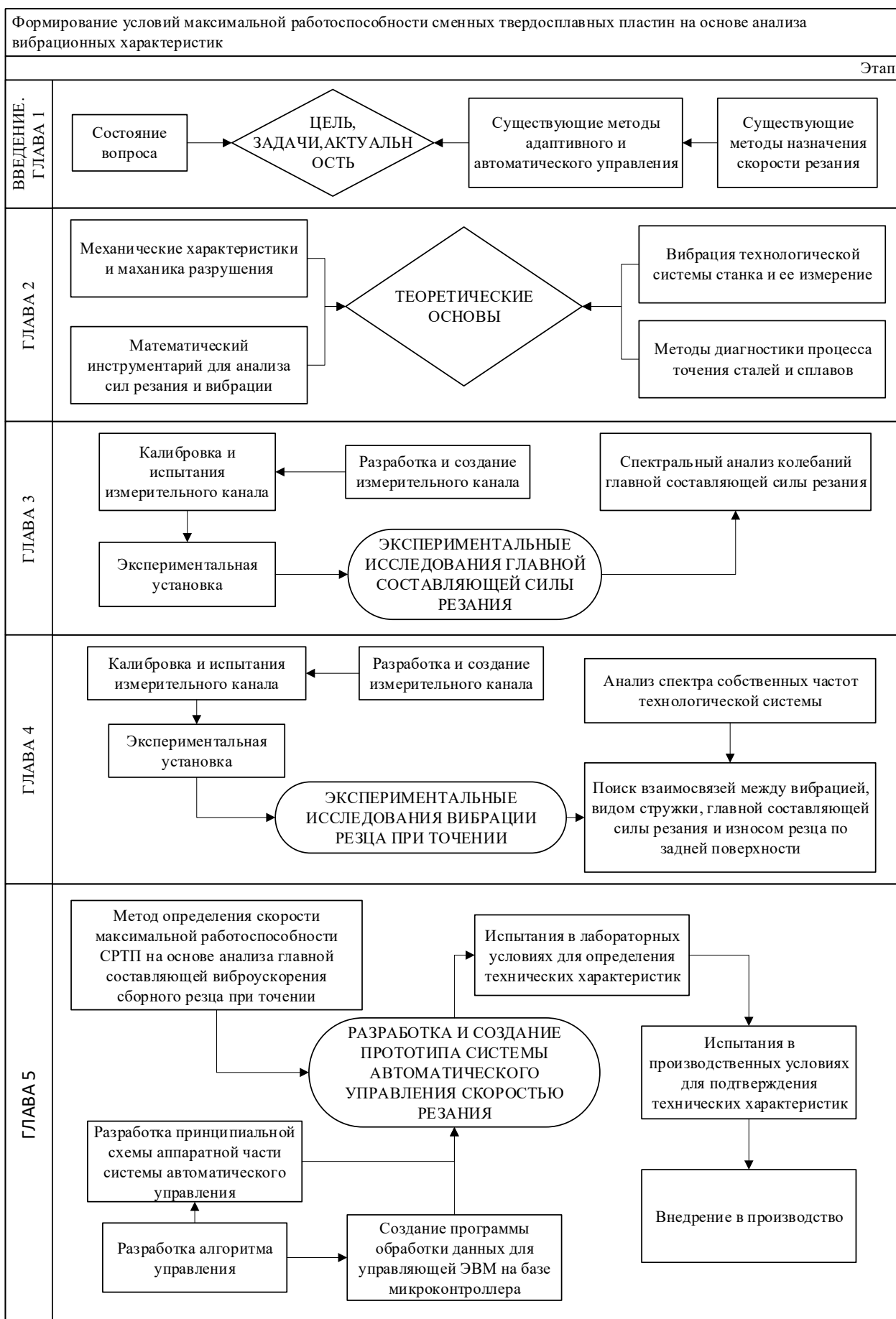


Рисунок 2.24 – Блок-схема диссертации

2.7 Выводы по главе

1. Установлены необходимые теоретические основы для проведения экспериментальных исследований и определен математический аппарат для обработки и интерпретации сигналов вибрационных характеристик, в результате анализа сформулирована блок-схема диссертации.

2. Выдвинута научная гипотеза, что изменение вида стружки, равно, как и диапазон скоростей резания, обеспечивающий УМР СРТП сборного резца на основе высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала, можно определить по главной составляющей виброускорения СРТП сборных резцов, поскольку изменение вида стружки приводит к качественному и количественному изменению силового воздействия на резец согласно положениям классической механики.

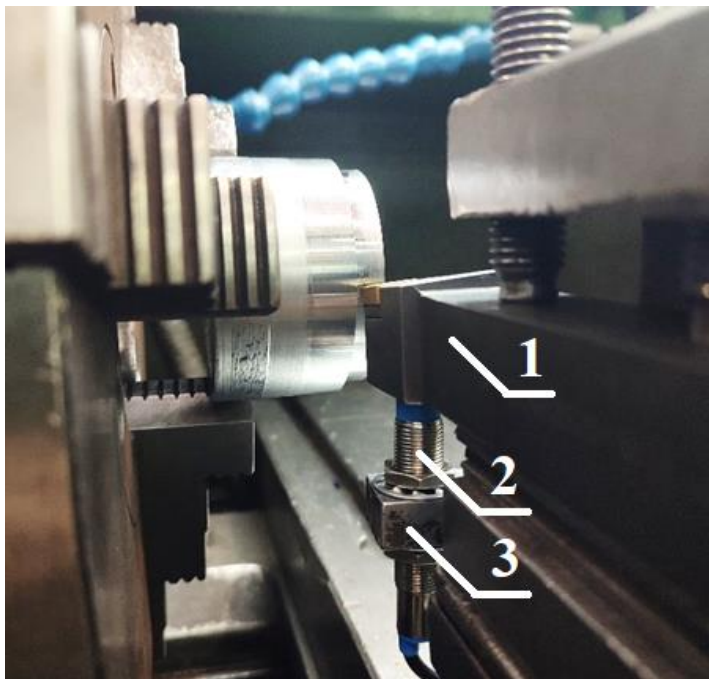
3. Установлено, что колебания силы резания P_z , будут выступать в качестве вынуждающей силы колебаний вершины резца a_z , согласно положениям классической механики. Следовательно, частотный состав спектров в области вынужденных колебаний должен иметь аналогичный состав.

4. На основании проведенного анализа теоретических основ в качестве диагностического параметра для исследования вибрации резца при точении выбрана главная составляющая виброускорения a_z , регистрируемая акселерометром, поскольку его выходной сигнал физически связан с величиной вынуждающей силы, действующей в колебательной системе.

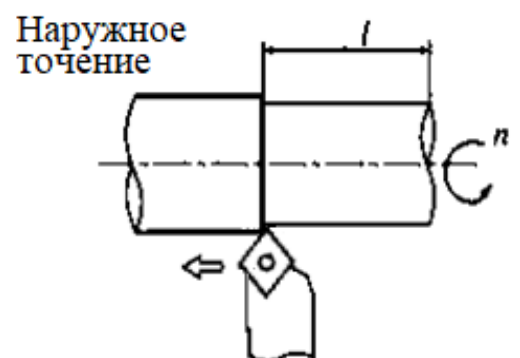
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

3.1 Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях проводились на универсальном токарно-винторезном станке 1К62 (рисунок 3.1а), исследуемая операция – наружное точение (рисунок 3.1б). Станок 1К62 выбран на основании операционных карт механической обработки деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов в ПАО «ТМ». Аналогично выбран сборный резец (рисунок 3.2) с державкой MSSCR 2516 M15 и сменной пластиной 1832-1991 (по ISO), геометрия резца: $\gamma = 6^\circ$, $\gamma_1 = 10^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha_1 = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 5^\circ$. Крепление сменной пластины осуществляется способом повышенной жесткости по типу М (ISO) – прижим сверху и поджим за отверстие в угловой паз (рисунок 3.3).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка: а – способ установки проксиметра (1 – сборный резец, 2 – проксиметр, 3 – кронштейн); б – исследуемая операция



Рисунок 3.2 – Сборный резец с державкой MSSNR 3232 P12 и сменной пластиной по ISO 1832-1991: $\gamma = 6^\circ$, $\gamma_1 = 10^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha_1 = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 5^\circ$

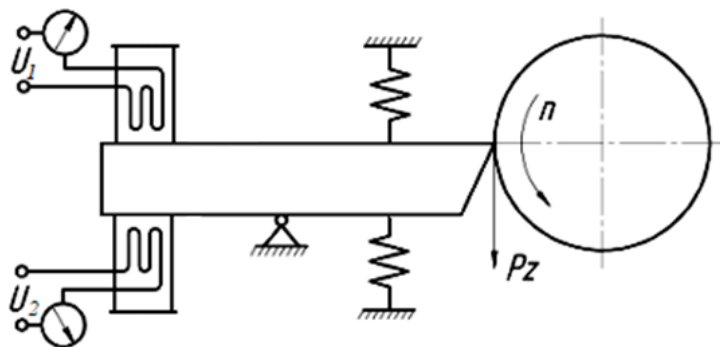


Рисунок 3.3 – Схема механического крепления сменной пластины по ISO

Экспериментальные исследования в рамках настоящей главы проводятся с целью построения зависимостей главной составляющей силы резания P_z от скорости резания; получения временного сигнала колебаний главной составляющей силы резания P_z в процессе точения и анализа их спектра для подтверждения взаимосвязи между колебаниями главной составляющей силы резания P_z и главной составляющей виброускорения сборного резца a_z .

3.2 Разработка и изготовление измерительного преобразователя для электрического динамометра

Для измерения главной составляющей силы резания в данной работе применен электрический динамометр УДМ600 конструкции ВНИИ, построенный на тензодатчиках. Принцип действия таких динамометров заключается в преобразовании пропорциональной механической деформации упругого элемента под действием измеряемой силы в изменение сопротивления, которое косвенно измеряется путем пропускания тока известной величины и измерением падения напряжения на чувствительном элементе (рисунок 3.4). Поскольку измерение величины силы резания производится косвенно по изменению сопротивления датчиков, необходимой частью динамометра является измерительный преобразователь, включающий: цепь согласования, усилитель и нормализатор.



$$\Delta P_z \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta U$$

Рисунок 3.4 – Схема последовательности преобразований величин в электрическом динамометре

Задача измерительного преобразователя заключается в согласовании и усилении слабого первичного сигнала разбалансировки тензорезистивного моста с системой измерения и оцифровки, то есть данный измерительный преобразователь конвертирует деформацию упругого элемента в нормированный сигнал, подаваемый на регистрирующее устройство.

Таким образом, для сопряжения динамометра серии УДМ600 с персональным компьютером необходимо разработать и изготовить соответствующий измерительный преобразователь.

Первичным преобразователем в динамометрах такого типа служит тензорезистор, причем, для увеличения чувствительности, применяется полумостовая или мостовая схемы включения, в которых датчики включены попарно дифференциально, то есть половина работает на растяжение, другая половина – на сжатие. Динамометр типа УДМ содержит полумост тензодатчиков на каждую из трех проекций силы резания и дополнительный для измерения крутящего момента. Электрический динамометр, построенный на основе тензорезисторов преобразует внешнюю измеряемую силу в изменение сопротивления, следовательно, чтобы применить современные средства обработки данных, необходимо разработать и изготовить преобразователь, в составе которого будет источник тока, усилитель, источник опорного напряжения и резистивный полумост для согласования и работы с полноценной мостовой схемой.

На рисунке 3.5 приведена принципиальная схема измерительного преобразователя, дополняющего УДМ600 до полного моста с возможностью балансировки, который питается источником тока на U2, VT1. Печатная плата устройства (рисунок 3.6) выполнена двухсторонней по промышленной технологии с помощью пленочного негативного фоторезиста, операции сверления и обрезки выполнены на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ.

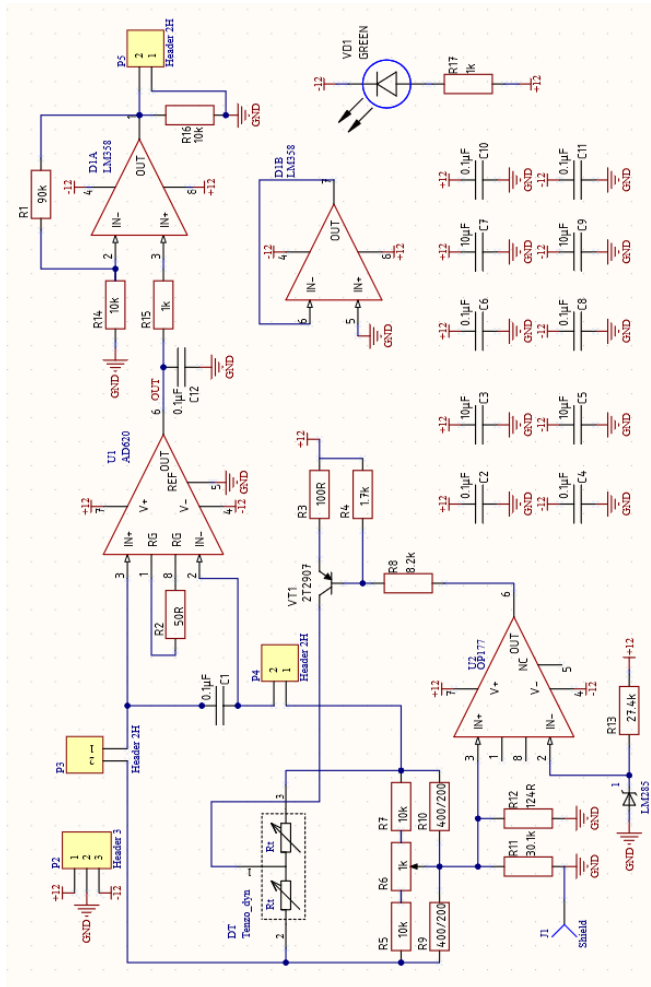


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема измерительного преобразователя для динамометра УДМ

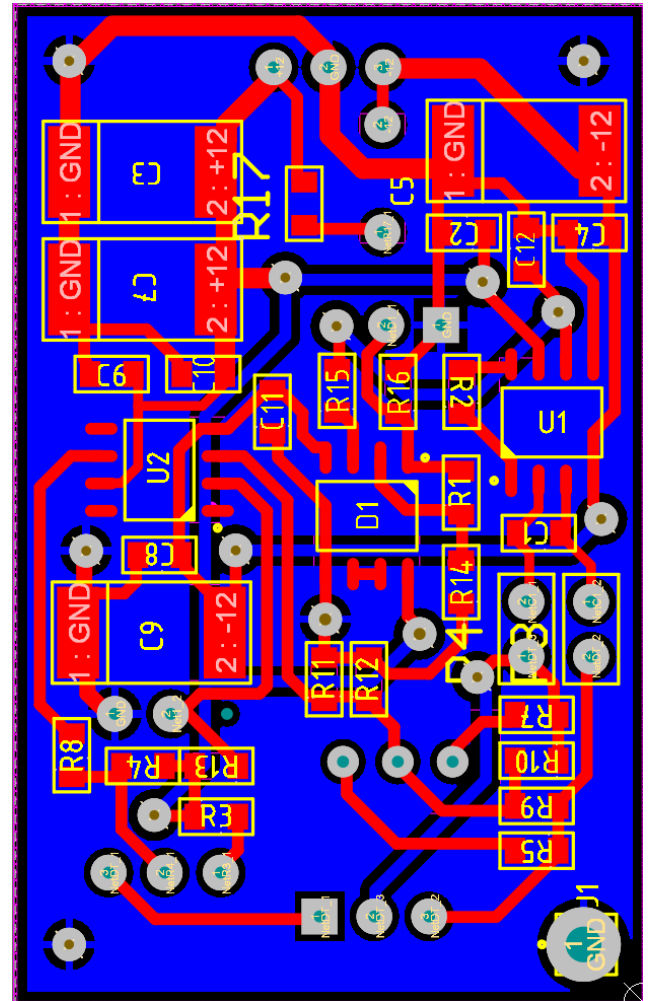


Рисунок 3.6 – Печатная плата преобразователя для динамометра УДМ, выполненная в среде Altium Designer

Измерение дисбаланса моста построено на двухкаскадном усилителе U1, D1A. Первый каскад построен на инструментальном усилителе AD620, обеспечивающем высокое входное сопротивление и дифференциальный вход, второй каскад – операционный усилитель общего назначения LM358, включенный

по схеме не инвертирующего усилителя с ФНЧ на входе. Такая схема обеспечивает поэтапное усиление с фильтрацией без существенных нелинейных искажений. Общий коэффициент усиления измерительного канала легко выставляется с помощью одного резистора R_g . Источник опорного напряжения на компонентах LM358, R13 обеспечивает стабильность измерительного тока в необходимом интервале температур. Компонент DT на принципиальной схеме обозначает один канал динамометра УДМ600. Следовательно, такой преобразователь ставится на каждый канал и может быть настроен в соответствии с его индивидуальными особенностями.

Вид готового устройства приведен на рисунке 3.7.

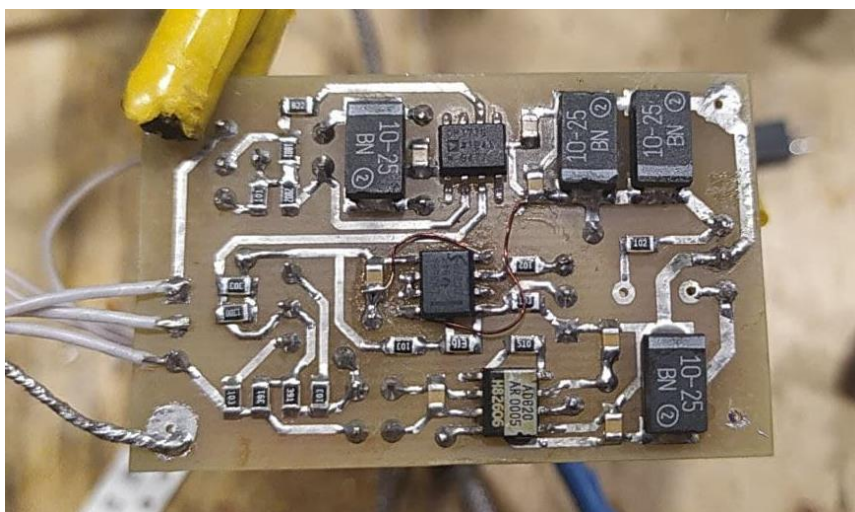


Рисунок 3.7 – Вид изготовленного измерительного преобразователя для динамометра УДМ со стороны сигнальных проводников

Разработанное устройство выполняет функцию измерительного преобразования сигнала для канала динамометра, соответствующего главной составляющей силы резания P_z .

3.3 Калибровка по эталонному механическому динамометру

Для введения измерительного канала в эксплуатацию требуется провести его калибровку по эталонному механическому динамометру, прошедшему поверку.

Физическая суть калибровки заключается в построении зависимости выходного параметра измерительного канала (напряжение U) от величины входного воздействия (вертикальной силы F) в совокупности с данными эталонного динамометра. По полученной зависимости выходного напряжения измерительно канала от приложенной к динамометру силы вычисляется аппроксимирующая функция (рисунок 3.8).

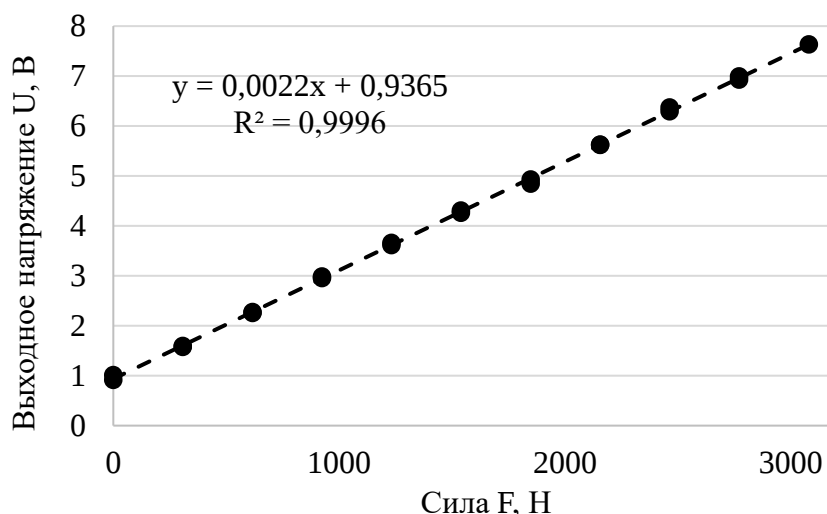


Рисунок 3.8 – Зависимость выходного напряжения от силы при нагружении и разгрузении после калибровки.

Если зависимость имеет нелинейность, превышает допустимые значения входного сигнала АЦП или имеет недостаточное усиление, производится корректировка номинальных значений компонентов измерительного канала, задающих его технические характеристики. Зависимость выходного напряжения измерительного канала от приложенной силы снимается повторно. Финальная аппроксимирующая функция, которая удовлетворяет требованиям линейности, усиления и рабочего диапазона, принимается за функцию преобразования измерительного канала, а ее коэффициенты используются для расчета значения силы, приложенной к динамометру, по измеренному выходному напряжению. В данном случае, по окончании калибровки, зависимость с высокой степенью точности аппроксимируется линейной функцией (3.1), коэффициент детерминации $R^2 = 0.9996$. На зависимости выходного напряжения от силы при нагружении и разгрузении точки совпадают, а гистерезис не наблюдается.

$$U = 0,0022P_z + 0,9365, \quad (3.1)$$

где U – выходное напряжение измерительного канала, В; P_z – вертикальная составляющая силы резания, Н.

Свободный член функции отличен от нуля и представляет собой постоянное смещение напряжения на выходе, таким образом в системе реализован «живой ноль» – при отсутствии нагрузки на выходе измерительного канала всегда имеется приблизительно 1В постоянного напряжения для контроля целостности линии и исправности динамометра.

Коэффициент детерминации R^2 близок к единице при линейной интерполяции после калибровки, следовательно, нелинейных искажений усилитель не вносит, дрейф нуля мал при непрерывной работе продолжительностью несколько часов. При проведении экспериментальных исследований несколько раз проводилась тарировка, результаты которой не выявили отклонений от принятой функции преобразования. Необходимо помнить, что при тарировке на резец давит нагрузочное устройство, которое в полностью отпущенном состоянии все равно воздействует на резец своей массой, следовательно, свободный член b передаточной функции (3.1) необходимо скорректировать на массу нагрузочного устройства для получения адекватных данных.

Таким образом, при экспериментальных исследованиях процесса точения с помощью разработанного преобразователя в системе с динамометром УДМ600 будет производиться измерение главной составляющей силы резания P_z , но анализ колебаний P_z , не представляется возможным, поскольку, согласно паспорту на УДМ600 его предельная верхняя рабочая частота составляет 500 Гц. Практика исследований показывает, что в данном случае требуемый диапазон частот составляет от 0 до 10000 Гц. Разработанный преобразователь необходим для измерения постоянной составляющей силы P_z . Для записи и анализа колебаний P_z требуется другой способ.

3.4 Способ измерения и анализа колебаний главной составляющей силы резания P_z с помощью проксиметра

Для исследования колебаний главной составляющей силы резания P_z применялся способ измерения силы резания с помощью системы, включающей резец в качестве упругого элемента и вихретоковый преобразователь (проксиметр) для измерения относительного перемещения резца по оси z под воздействием силы P_z . На рисунке 3.9 изображена система для измерения изгиба резца вдоль оси z под воздействием силы, имитирующей P_z и задаваемой по эталонному механическому динамометру. Вертикальное отклонение резца Δz (смещение) измерялось с помощью поверенного микрометра с ценой деления 2 мкм.



Рисунок 3.9 – Измерение изгиба резца под воздействием силы, имитирующей P_z

Зависимость $\Delta z(P_z)$, построенная по средним значениям в результате пяти экспериментов, включающих нагружение и разгружение, показана на рисунке 3.10.

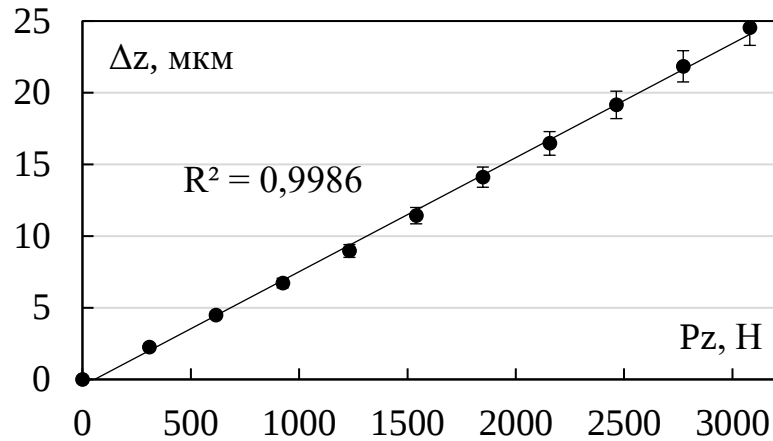


Рисунок 3.10 – Зависимость изгиба резца от приложенной силы по результатам серии экспериментов.

Полученная зависимость аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9986$. Зависимость $\Delta z(P_z)$ позволяет сделать вывод о том, что измерение P_z возможно по Δz , при условии постоянства следующих параметров резца: L – вылет резца, E – модуль Юнга материала державки, d – ширина державки, h – высота державки.

Измерение Δz возможно с помощью вихретокового преобразователя (проксиметра), имеющего выходной сигнал в виде напряжения, пропорционального расстоянию до объекта контроля (рисунки 2.15 и 3.11).



Рисунок 3.11 – Принцип работы проксиметра

Частотный диапазон современных проксиметров от 0 до 10000 Гц полностью удовлетворяет требованиям проведения эксперимента, поскольку 0 Гц –

постоянная составляющая – это то самое значение силы P_z , измеряемое классическими динамометрами с интегральными вторичными преобразователями и низкочастотными датчиками, а верхний предел в 10 кГц позволит провести корректное сравнение полученных данных с виброускорением.

Схему преобразования физических величин можно записать следующим образом (3.2).

$$\Delta P_z \sim \Delta z \sim \Delta U, \quad (3.2)$$

где ΔP_z – изменение главной составляющей силы резания, Δz – изгиб резца под действием P_z , ΔU – выходной сигнал проксиметра.

Для дальнейшей работы теоретически подтверждена линейная зависимость $\Delta z \sim \Delta P_z$ и проверена адекватность полученных данных о изгибе резца с помощью расчета по схеме, изображенной на рисунке 3.12.

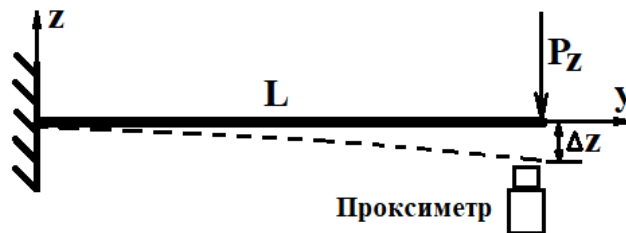


Рисунок 3.12 – Схема для расчета консольной балки на изгиб под действием сосредоточенной силы.

Зависимость $\Delta z(P_z)$ в данном случае выражается формулой, полученной согласно положениям дисциплины о сопротивлении материалов (3.3):

$$\Delta z = \frac{6P_z L^3}{Edh^3}, \quad (3.3)$$

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

На рисунке 3.13 показаны зависимости $\Delta z(P_z)$ полученные экспериментально и теоретически. Отклонение составило не более 5%, что укладывается в базовую погрешность примененных средств измерения.

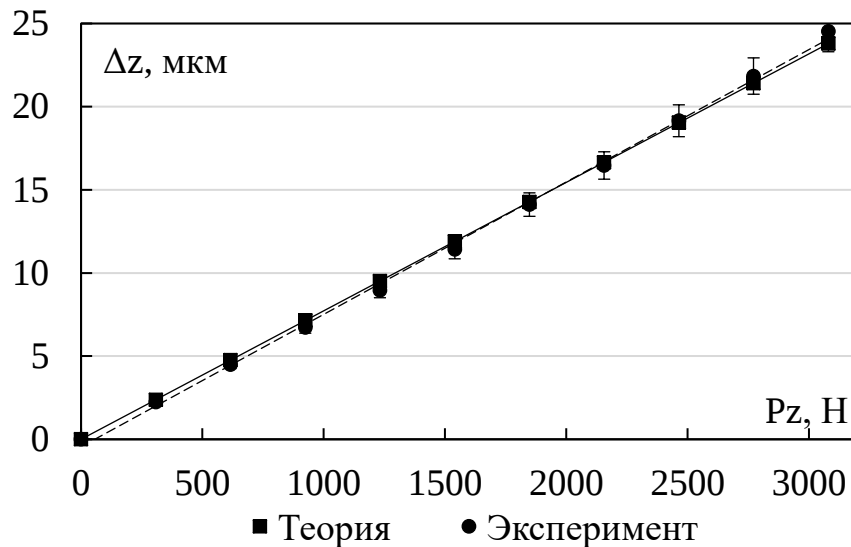


Рисунок 3.13 – Зависимости $\Delta z(P_z)$ полученные экспериментально и теоретически

Согласованность результатов теоретических и экспериментальных исследований описанного выше способа записи колебаний силы P_z позволяет применять его в процессе дальнейших экспериментальных исследований.

3.5 Исследование главной составляющей силы резания

Известен метод определения оптимальной скорости резания, описанный С. С. Силиным в работе [127], который заключается в измерении главной составляющей силы резания при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с увеличением скорости резания до тех пор, пока не завершится интенсивное уменьшение величины составляющей P_z с выходом на квазистационарное значение. Момент стабилизации функции $P_z(V)$ или наступление минимальных значений при разных подачах показывает общий диапазон температуры резания, соответствующий минимальным значениям относительного износа резца и шероховатости обработанной поверхности, что является критерием оптимальности протекания процесса резания. На основании этого, полученные скорости принимаются оптимальными. При проведении опытов необходимо сохранять постоянными геометрию инструмента, подачу s и глубину резания t .

Исследование составляющей P_z в рамках данной работы, согласно поставленным задачам, проводится с целью получить вспомогательный источник

информации о вибрации резца в процессе точения. Также необходимо решить, целесообразно ли применение динамометрии в автоматизации управления скоростью резания по колебаниям резца.

Экспериментальное исследование колебаний составляющей P_z при точении проводилось на универсальном токарно-винторезном станке 1К62. Запись временного сигнала колебаний составляющей P_z велась по схеме, изображённой на рисунке 3.14. Время записи не более 5 секунд, поскольку этого времени достаточно для получения требуемой информации.

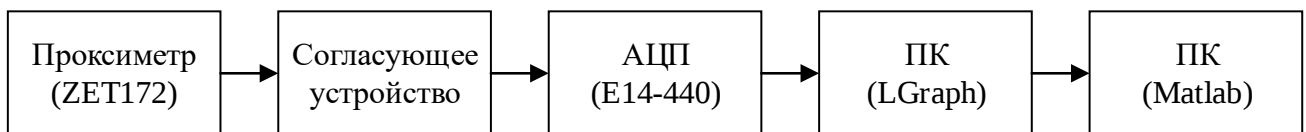


Рисунок 3.14 – Блок-схема измерительного канала для записи колебаний составляющей P_z

Способ установки проксиметра для исследования колебаний P_z в процессе точения показан на рисунке 3.15.

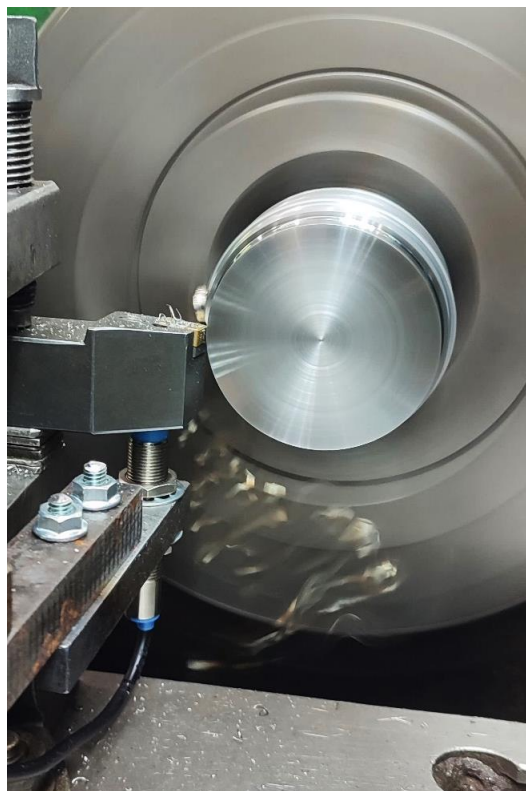


Рисунок 3.15 – Исследование колебаний P_z в процессе точения с помощью проксиметра

Установленный таким образом проксиметр снимает относительные колебания резца, поскольку сам колеблется в системе станок-резцедержатель. Этот факт позволяет снизить влияние собственного шума станка на снятые показания.

Чтобы определить принадлежность полос спектра к своим источникам колебаний, то есть экспериментально показать, какие частоты характеризуют станок в целом, а какие можно отнести исключительно к процессу стружкообразования, было применено Оконное преобразование Фурье (ОПФ), позволившее локализовать спектр одновременно и в частотной и временной областях. Данный математический инструмент позволяет провести исследование колебаний главной составляющей силы резания при точении, включая моменты врезания, выхода резца из заготовки и анализ гармонической составляющей колебаний в процессе установившегося резания.

3.6 Результаты

На рисунке 3.16 показано изменение вертикальной составляющей силы резания P_z от времени t при точении образца заготовки из исследуемого обрабатываемого материала в течение 4 секунд. Такого интервала времени достаточно для получения требуемых экспериментальных данных.

Между моментами врезания и выхода резца наблюдается постоянная составляющая высокой амплитуды, модулированная гармониками. В начальный момент времени наблюдается собственный шум станка с включенным главным приводом величиной ± 50 Н относительно смещенного вниз на 50 Н сигнала. Далее включается автоматическая продольная подача станка и спустя 0.4 с резец приходит в контакт с заготовкой, сила P_z скачкообразно растет до 800 Н и в момент времени $t_1=0.5$ с процесс резания (стружкообразования) стабилизируется. В интервале времени 3.2...3.5 с происходит выход резца из заготовки, после чего сигнал возвращается к первоначальному состоянию.

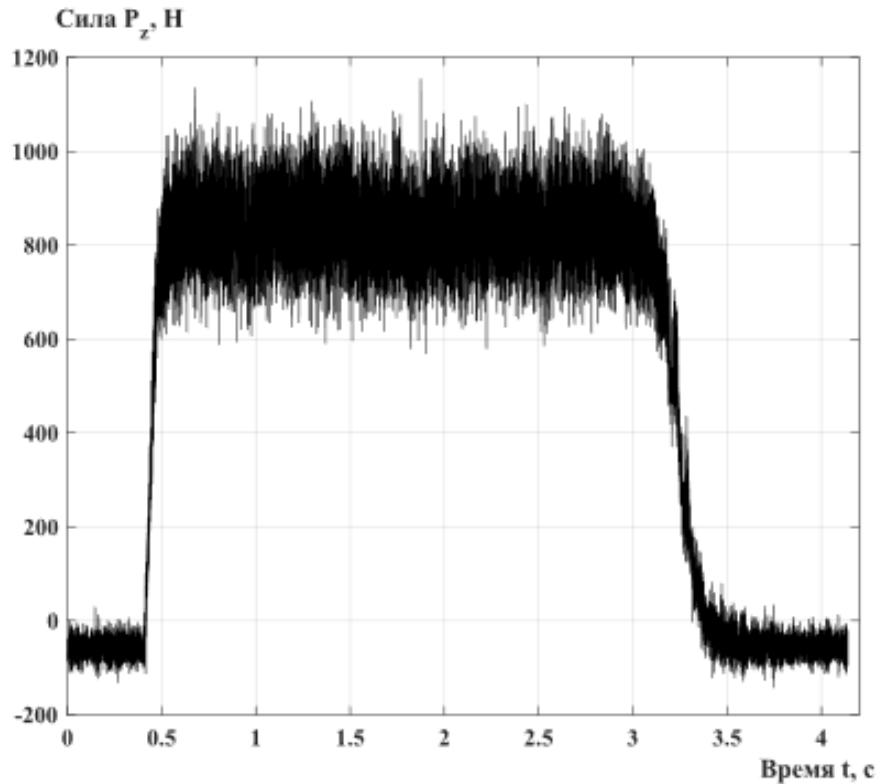


Рисунок 3.16 – Временной сигнал P_z в процессе резания (сталь 14X17H2, T15K6, $s = 0.2$, $t = 1$ мм)

Описанную выше зависимость $P_z(t)$ необходимо проанализировать в частотной области. Для этого применено Дискретное Фурье-преобразование, результат которого представлен на рисунке 3.17. Явно прослеживаются пики о окрестности частот $f_1 = 0.5$ кГц, $f_2 = 1.4$ кГц и $f_3 = 3.8$ кГц. Разрешающая способность F_{res} в данном случае составила 97,68 Гц. По спектру невозможно локализовать гармоники во временной области. Интерес в данном случае представляет принадлежность гармоник к определенным временным интервалам сигнала $P_z(t)$. Для более глубокого анализа следует рассматривать сигнал в частотно-временном представлении, которое способно показать Оконное преобразование Фурье или же Вейвлет анализ. Спектрограмма сигнала $P_z(t)$ представлена на рисунке 3.18. По оси абсцисс и ординат отложены соответственно время t и частота f , цветом обозначена ось аппликат в логарифмическом масштабе, по которой отложена амплитуда A первичного сигнала по напряжению в децибелах.

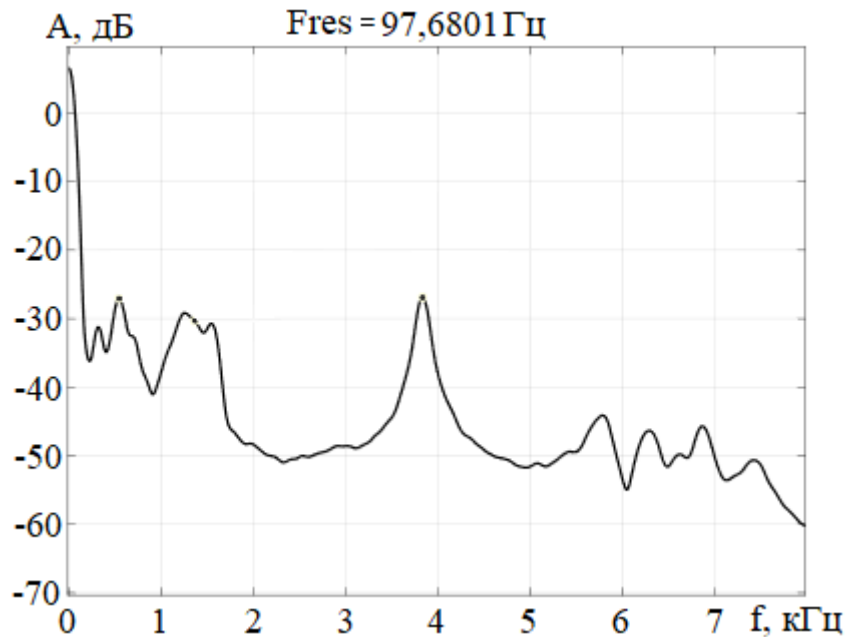


Рисунок 3.17 – Спектр главной составляющей силы резания (сталь 14X17H2, T15K6, $s = 0.2$, $t = 1$ мм)

Частоты в окрестностях f_1 и f_2 обнаруживаются в сигнале с момента времени $t_0 = 0$ с и значительно усиливаются с момента времени $t_2 = 0.4$ с, соответствующего моменту касания режущим инструментом заготовки. Частоты в окрестности f_3 отсутствуют в спектре до t_2 (рисунок 3.18).

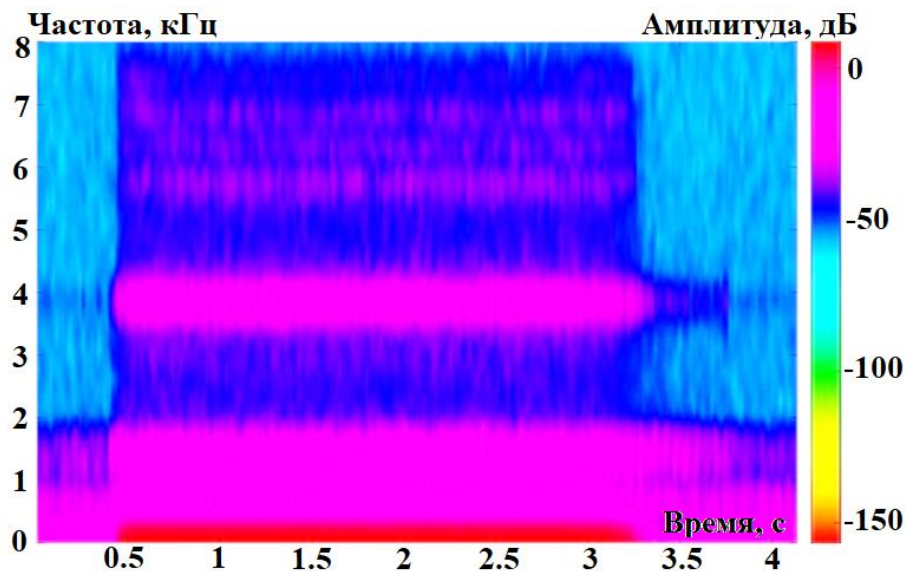


Рисунок 3.18 – Спектрограмма главной составляющей силы резания (сталь 14X17H2, T15K6, $s = 0.2$, $t = 1$ мм)

На основании вышеизложенных наблюдений можно предположить, что f_1 и f_2 характеризуют собственный шум станка с включенным главным приводом, а f_3 относится непосредственно к процессу резания.

Проследим изменения максимальных амплитуд полос спектра в окрестностях частот f_1 , f_2 и f_3 при разных скоростях резания V . На рисунке 3.19 показаны изменения мощности колебаний от скорости резания в трех диапазонах частот $W_1 = 400 \dots 600$ Гц, $W_2 = 1200 \dots 1700$ Гц, $W_3 = 3600 \dots 3900$ Гц.

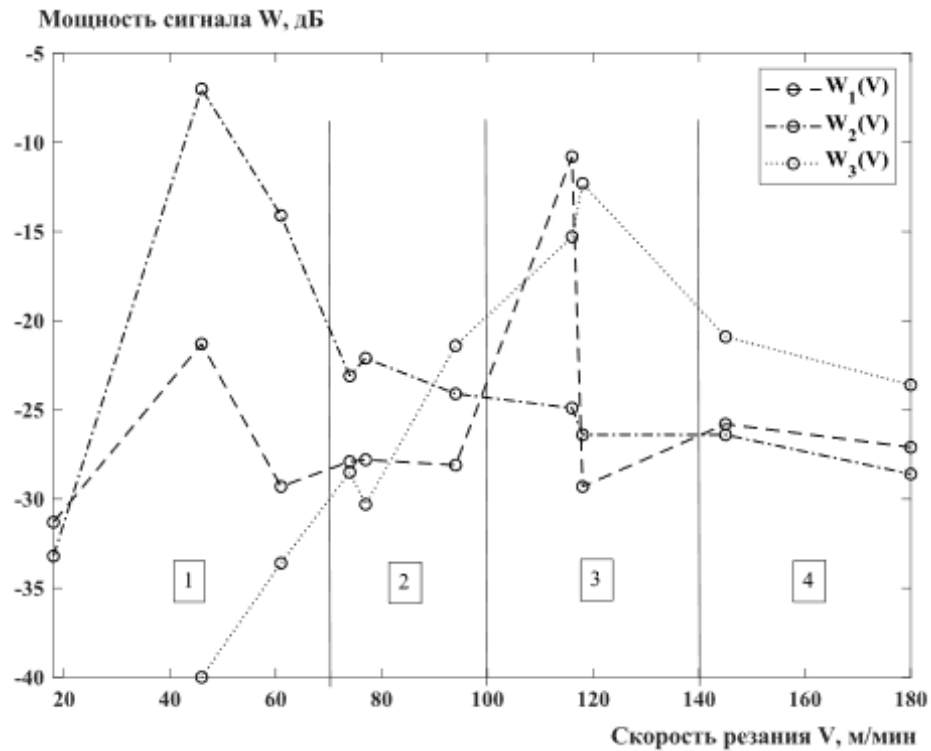


Рисунок 3.19 – Зависимость мощности колебаний от скорости резания в трех диапазонах частот

В диапазонах 2 и 4 (рисунок 3.19) отсутствуют значительные показатели мощности колебаний для всех трех исследуемых диапазонов. Таким образом, диапазоны скоростей 75 – 100 м/мин и свыше 140 м/мин характеризуются наименьшей мощностью вибрации.

Для построения зависимостей было взято десять спектров $P_z(t)$ при разных скоростях резания. Выбранные скорости резания приведены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Перечень скоростей резания

Ед. изм.	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
м/мин	18	46	61	74	77	94	116	118	145	180

Повторный эксперимент с фильтрацией

На рисунке 3.20 показан временной сигнал процесса точения после применения ряда фильтров (см. Главу 2). В полосе частот 0 – 1900 Гц, спектральные составляющие обнаружены на протяжении всего времени наблюдения, а полосы в окрестности 4 кГц и 12 кГц появляются только в промежутке времени 0.25 – 1.75 с, что соответствует времени контакта режущего инструмента и заготовки.

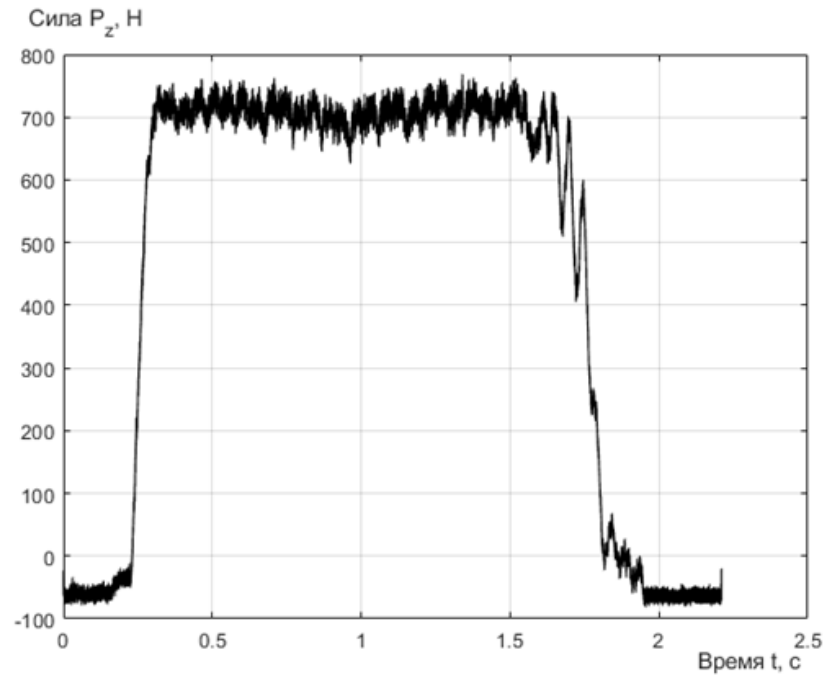


Рисунок 3.20 – Временной сигнал процесса резания (сталь 12X18H10T,
 $s = 0.2$ мм/об, $t = 1$ мм, $V = 145$ м/мин)

Сделан вывод, что частоты в полосе 0 – 1900 Гц являются собственным шумом станка, а пики на 4 кГц и 8 кГц (четная гармоника) вызваны процессом резания стружкообразования. Разрешающая способность составила 391 Гц по частоте и 17.27 мс по времени (рисунок 3.21).

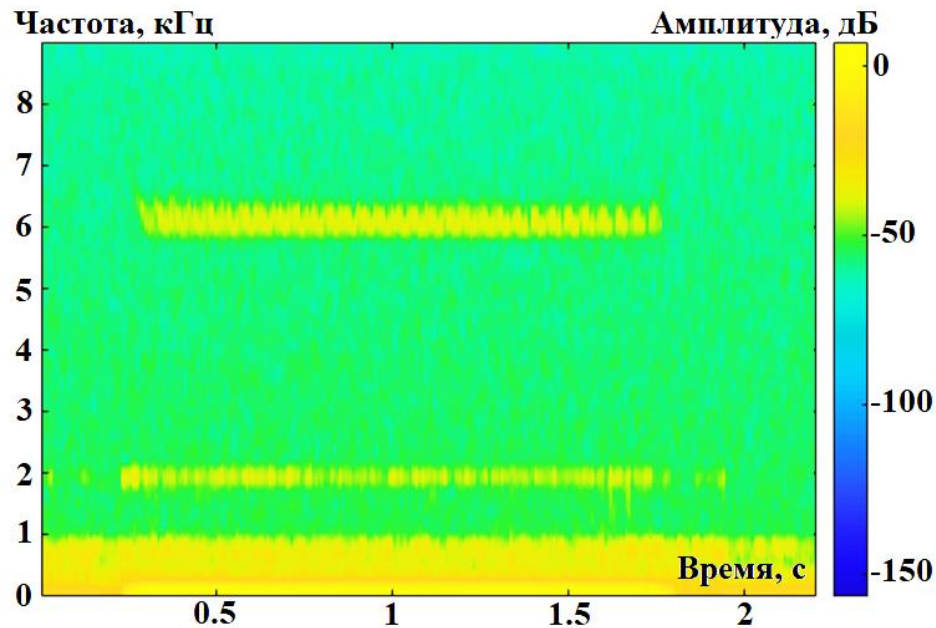


Рисунок 3.21 – Спектрограмма временного сигнала P_z в процессе резания (сталь 12X18H10T, $s = 0.39$ мм/об, $t = 1$ мм, $V = 145$ в/мин)

Таким образом, показан и экспериментально проверен метод локализации гармоник спектра во времени и способ определения принадлежности полос спектра вибрации технологической системе станка и непосредственно процессу точения.

3.7 Главная составляющая силы резания, как вынуждающая сила колебаний сборного резца

Ряд авторов [49] находят процесс резания неустойчивым, если образуется сегментная (суставчатая) стружка. Такое неустойчивое стружкообразование взаимосвязано с периодическим изменением скорости деформации и ее величины при сдвиге очередного элемента стружки. Нет единого мнения, считать ли такой характер вибраций вынужденным или автоколебательным. В первом случае логично считать, что переменная величина главной составляющей силы резания выступает в роли вынуждающей силы. Во втором случае вибрацию рассматривают с точки зрения взаимодействия периодического изменения величины деформации стружки (автоколебательный процесс) и упругой конструкции станка. Приятно считать колебания такого рода вынужденными при малых амплитудах, когда они

сопровождает резание с малой толщиной срезаемого слоя на чистовых и получистовых операциях, в совокупности с достаточной жёсткостью станочной системы. В противном случае, с большой амплитудой колебаний и малой жесткостью станка систему считают неустойчивой, а вибрации – автоколебаниями. В данной работе рассматривается только чистовое и получистовое точение с толщиной срезаемого слоя не более 1 мм. Амплитуды колебаний резца при точении малы и не приводят к негативным последствиям (разрушению сменных пластин, сильной шероховатости обработанной поверхности), следовательно, авторы считают исследуемый процесс точения устойчивым, а колебания вынужденными с главной составляющей силы резания в качестве вынуждающей. Переменный характер силы резания в таком случае обусловлен рядом факторов – переменной силой трения по задней поверхности, переменной величиной и скоростью деформации прирезцового слоя в момент образования сегмента суставчатой стружки, высокотемпературного охрупчивания обрабатываемого материала в прирезцовой зоне из-за адиабатических условий деформации. При высоких скоростях резания условия деформирования в зоне стружкообразования таковы, что теплота от деформации в зоне локализованного сдвига не успевает уйти.

В работе [6] показана корреляция износа инструмента по задней поверхности и общего уровня вибрации режущего инструмента. Наличие такой зависимости говорит о возможности определять оптимальные параметры процесса резания по вибрации сборных резцов, которая, в свою очередь, связана и с температурно-скоростными факторами [131], и механическими свойствами материалов заготовки и РИ [67]. В работах [2–7, 76, 78, 107] установлено, что вибрация сборных резцов несет оперативную информацию о процессе резания. Колебания в направлении вертикальной оси вызваны двумя факторами, согласно равенству (3.4) [127]:

$$P_z = R_z + F_z, \quad (3.4)$$

где P_z – главная составляющая силы резания, R_z – главная составляющая силы стружкообразования, F_z – главная составляющая силы трения, действующей на заднюю поверхность.

Вибрация возбуждается переменной силой со стороны стружки – вынужденные колебания – и переменным трением – автоколебания. Трение носит сложный переменный характер [80]. Как и силу резания, вибрацию можно представить в виде трех проекций на оси, A_x , A_y , A_z соответственно. Поскольку, в соответствии с основами классической механики, ускорение связано с силой как следствие и причина (см. параграф 2.3), можно выражение (3.2) записать в виде (3.3):

$$A_z = A_{rz} + A_{fz}, \quad (3.3)$$

где A_z – главная составляющая виброускорения режущего инструмента, A_{rz} – совокупность гармоник, вносимых в спектр процессом стружкообразования, вынужденные колебания A_{fz} – совокупность гармоник, вносимых в спектр переменной силой трения, действующей на заднюю поверхность, автоколебания.

С целью проверки сформулированной гипотезы проведен ряд экспериментов по одновременной записи главной составляющей силы резания P_z и главной составляющей виброускорения A_z в процессе точения. Схема эксперимента показана на рисунке 3.22.

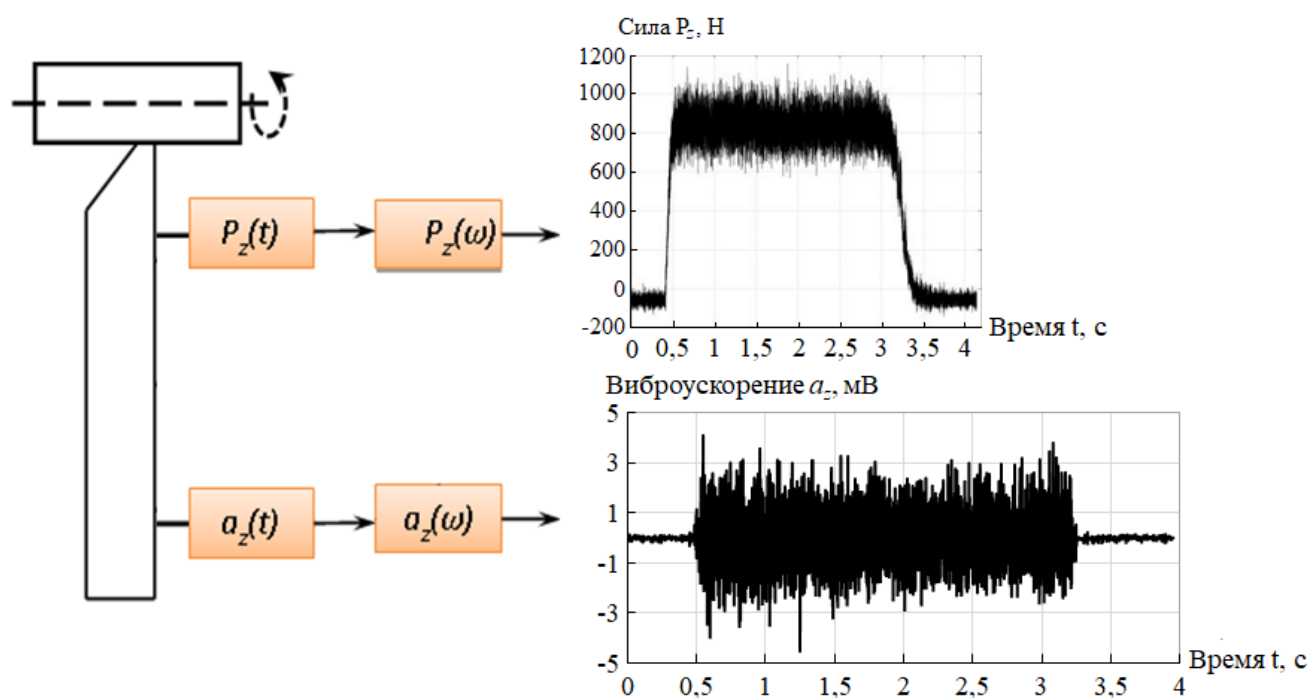


Рисунок 3.22 – Результаты одновременной записи главной составляющей силы резания и вертикальной компоненты виброускорения сборного резца

Измерение колебаний P_z осуществлялось способом, описанным в п. 3.4. Результат измерений и сравнение частей спектров приведены на рисунке 3.23 на примере стали 14X17H2.

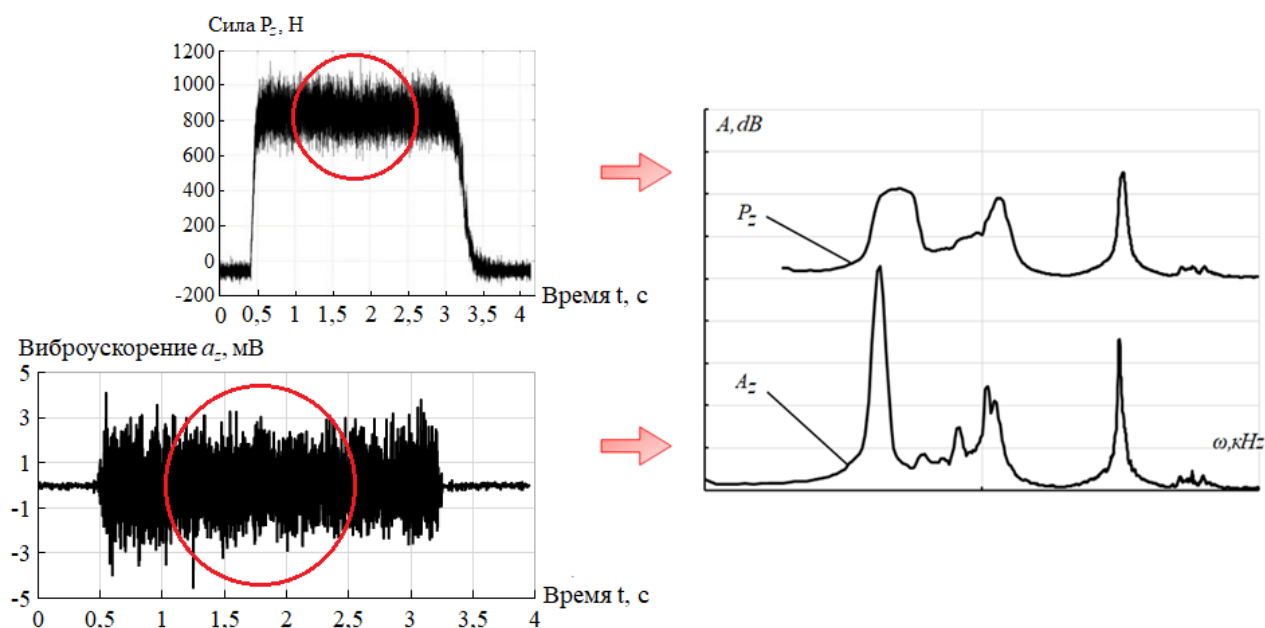


Рисунок 3.23 – Связь составляющей P_z и главной составляющей виброускорения a_z при одновременной записи сигналов в процессе точения

Области, выделенные красным, были взяты для сравнительного анализа в качестве типовых, поскольку не содержат аномальных участков. Оба сигнала были записаны измерительными каналами, имеющими идентичные частотные характеристики, имели в составе антиалиазинговые фильтры для исключения эффекта наложения спектров. После записи выбранные участки прошли передискретизацию с помощью численного интегрирования методом трапеции для удаления нарушения шага дискретизации реального АЦП.

Очевидно качественное сходство спектров колебаний силы P_z и виброускорения A_z . Частоты ряда гармоник совпадают, что говорит о подтверждении причинно-следственной связи P_z и A_z . Сходство частотных составов спектров P_z и A_z , было обнаружено с помощью функции когерентности, результат расчета показан на рисунке 3.23 гармониками.

Таким образом, вибрация режущего инструмента выступает в качестве комплексного диагностического параметра, содержащего данные о разных

аспектах процесса резания, а получаемая по вибрации информация определяется способом регистрации сигнала и методом его анализа.

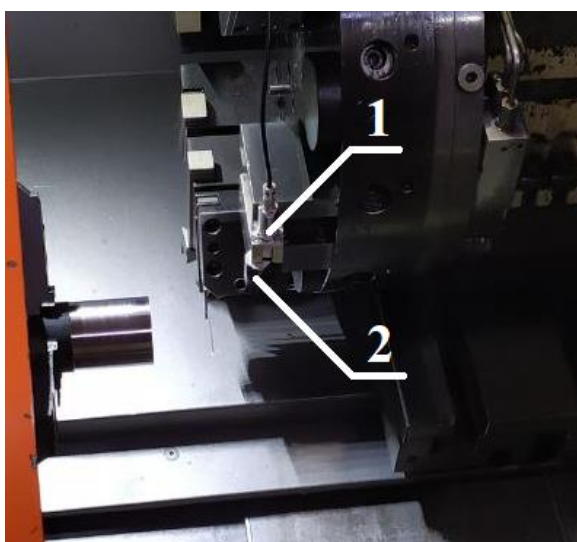
3.8 Выводы по главе

1. Доказана взаимосвязь колебаний главной составляющей силы резания P_z и главной составляющей виброускорения A_z . Доказана правомерность применения A_z в качестве диагностического параметра процесса точения для достижения поставленной цели.
2. Разработан способ записи колебаний главной составляющей силы резания P_z , позволяющий исследовать колебания P_z на частотах до 10 кГц без использования дорогостоящего пьезоэлектрического динамометра.
3. Выделена группа зависимостей мощностей сигналов в зависимости от скоростей резания в особо чувствительных диапазонах частот, характеризующая предпочтительные и нежелательные скорости резания для исследуемого материала на примере стали 12Х18Н10Т.

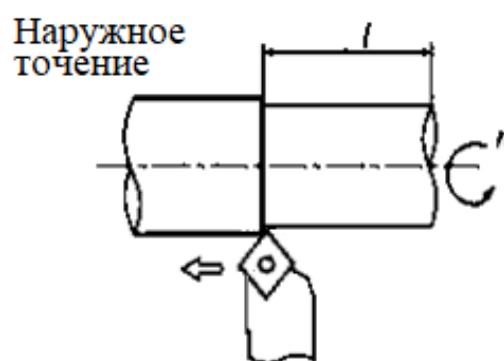
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЯ РЕЗЦА ПРИ ТОЧЕНИИ

4.1 Экспериментальная установка

После лабораторных исследований с применением станка 1К62, необходима апробация примененных экспериментальных методов на производстве. В качестве оборудования для продолжения экспериментальных исследований, но уже в производственных условиях, был выбран токарный станок с ЧПУ Victor VTurn II-26Y (рисунок 4.1а). Выбор был сделан на основании операционных карт механической обработки ПАО «ТМ» для деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов. Станок с ЧПУ Victor VTurn II-26Y, как и универсальный 1К62, широко применяется на ПАО «ТМ» для изготовления деталей из сталей и сплавов, исследуемых в данной диссертационной работе. Исследуемая операция – наружное точение (рисунок 4.1б)



а)



б)

Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка: а – токарный станок с ЧПУ Victor VTurn II-26Y (1 – акселерометр, 2 – резец); б – исследуемая операция

Вид применяемого резца показан на рисунке 4.2, например державка PSSNR 2525-M12 для квадратных сменных пластин типа ISCAR SNMG 120404/8, геометрия резца в сборе: $\gamma = 12^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 5^\circ$, способ механического крепления режущей пластины Р (ISO).

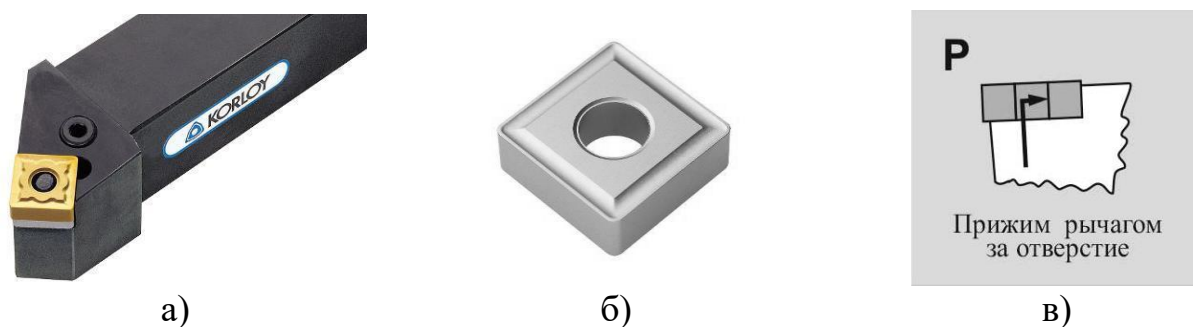


Рисунок 4.2 – Сборный резец: а – державка PSSNR 2525-M12; б – сменная пластина ISCAR SNMG 120404/8 $\gamma = 12^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 5^\circ$; в – способ крепления пластины

Выбор твердого сплава и назначение соответствующего первоначального диапазона скоростей резания осуществляется согласно алгоритму, приведенному на рисунке 4.3, применяемого на предприятии ПАО «ТМ».

Отталкиваясь от известного обрабатываемого материала, определяется группа обрабатываемости по ISO, далее устанавливается рекомендуемый производителем СРТП сборных резцов (ISCAR) диапазон скоростей резания, не учитывающий комплекс локальных факторов производства, включающих отклонения значений механических свойств материала заготовки в результате смены поставщика, партии обрабатываемого материала, смены производителя СРТП, погрешности и допустимые отклонения при термической обработке заготовок и аналогичные факторы, оказывающие прямое влияние на процесс резания. Назначение диапазона скоростей резания осуществляется на основе наработанной базы, полученной эмпирически в результате долгосрочного применения ряда обрабатываемых и инструментальных материалов на данном производстве.

В рамках данного исследования, назначение первоначального диапазона скоростей резания и выбор инструментального материала будет осуществляться согласно алгоритму, приведенному на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Схема выбора инструментального материала и назначения первоначального диапазона скоростей резания

Для проведения экспериментальных исследований с записью сигнала главной составляющей виброускорения было спроектировано и собрано две системы с разными видами первичного преобразователя (акселерометра) – активным (рисунок 4.4) и генераторным (рисунок 4.5). Активный имеет интегрированный усилитель заряда и требует внешнего питания, генераторный непосредственно является источником сигнала с дифференциальным выходом заряда и во внешнем питании не нуждается.

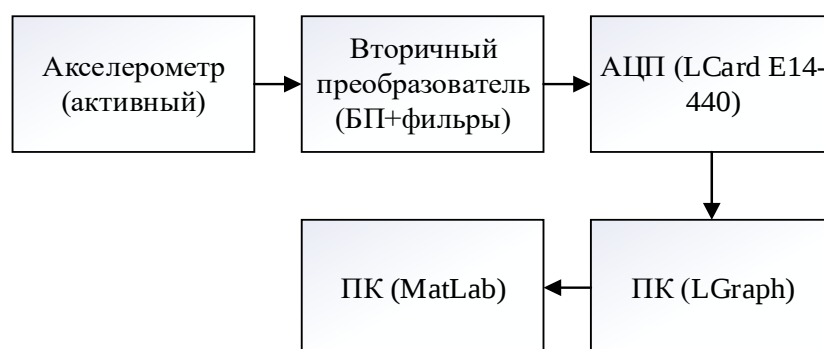


Рисунок 4.4 – Функциональная схема системы измерения и оцифровки главной составляющей виброускорения с активным акселерометром: БП – блок питания, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер

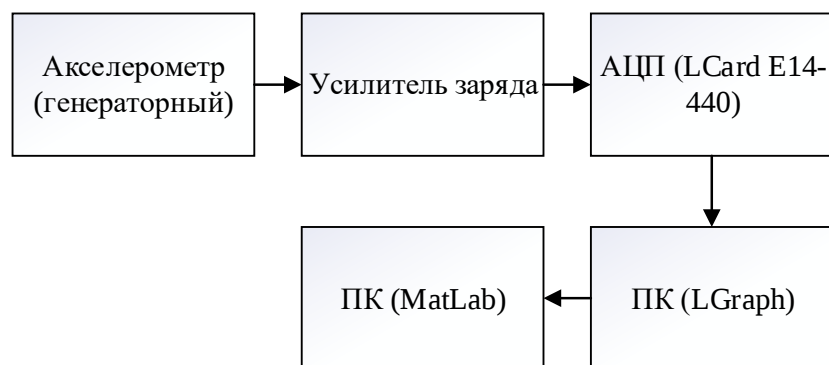


Рисунок 4.5 – Функциональная схема системы измерения и оцифровки главной составляющей виброускорения с генераторным акселерометром

Система с активным ВД работает следующим образом. Вибродатчик преобразует вертикальные механические колебания резца в колебания напряжения. Частотный состав механических колебаний и получаемого переменного напряжения одинаков в пределах линейной области передаточной функции акселерометра. Амплитуды мгновенных значений выходного напряжения пропорциональны второй производной изменения координат центра масс вылета резца по времени. То есть переменное выходное напряжение активного акселерометра представляет собой величину, пропорциональную виброускорению, нормированную до чувствительности 10 мВ/г, в данном случае. Активный вибропреобразователь нуждается во внешнем питании. Выдача полезного сигнала осуществляется по тому же проводнику, по которому подводится питание путем наложения переменного выходного напряжения на постоянное значение напряжения питания. С этой линии через разделительный конденсатор полезный сигнал поступает на блок аналоговых фильтров, очищающих сигнал от высокочастотных помех, инфразвуковых колебаний и предотвращает наложение спектров при дальнейшей оцифровке.

После аналоговой фильтрации сигнал поступает на АЦП, роль которого в данной системе выполняет модуль E14-440 производства LCard, предназначенный для применения в лабораторных исследованиях и малых системах автоматизации. Запись данных с АЦП выполняется программой LGraph2 с последующим экспортом в среду Matlab для проведения анализа сигнала во временной и

частотной областях, построения спектрограмм на основе оконного преобразования Фурье для локализации гармоник по времени и частоте одновременно.

В блоке фильтров предусмотрен отдельный выход интегратора, который выдает универсальный токовый сигнал, пропорциональный СКЗ виброскорости в стандартном диагностическом диапазоне 0 – 1000 Гц. Выходной сигнал интегратора применялся для проверки работоспособности измерительного канала и адекватности показаний вибродатчика путем сравнения показаний с поверенным промышленным виброанализатором ТОПАЗ-В.

Система с генераторным ВД работает аналогично описанной ранее с той разницей, что акселерометр с дифференциальным выходом по заряду нуждается в отдельном усилителе с соответствующим входом, преобразующем заряд в напряжение и подавляющем синфазные помехи.

Создание двух экспериментальных систем сбора данных обусловлено необходимостью подтверждения полученных результатов при проведении исследований в лабораторных и производственных условиях. Поскольку только повторяемость результатов на двух независимых экспериментальных установках, с использованием разного станочного оборудования и разных систем сбора данных гарантирует наличие обнаруженного эффекта и исключает ошибку при сборе данных и систематическую ошибку при реализации ряда повторяющихся экспериментов в одинаковых условиях.

Для дальнейшей обработки исследуемого сигнала необходим вторичный преобразователь – усилитель-приемник сигнала по напряжению с акселерометра с ИСР выходом. Схема расположения акселерометра на сборном резце показана на рисунке 4.6.

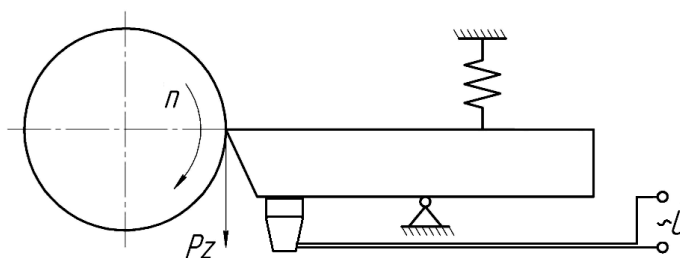


Рисунок 4.6 – Схема расположения акселерометра на резце

Акселерометр крепится с помощью шпильки или магнита на державку сборного резца непосредственно под сменной режущей твердосплавной пластиной (рисунок 4.7).

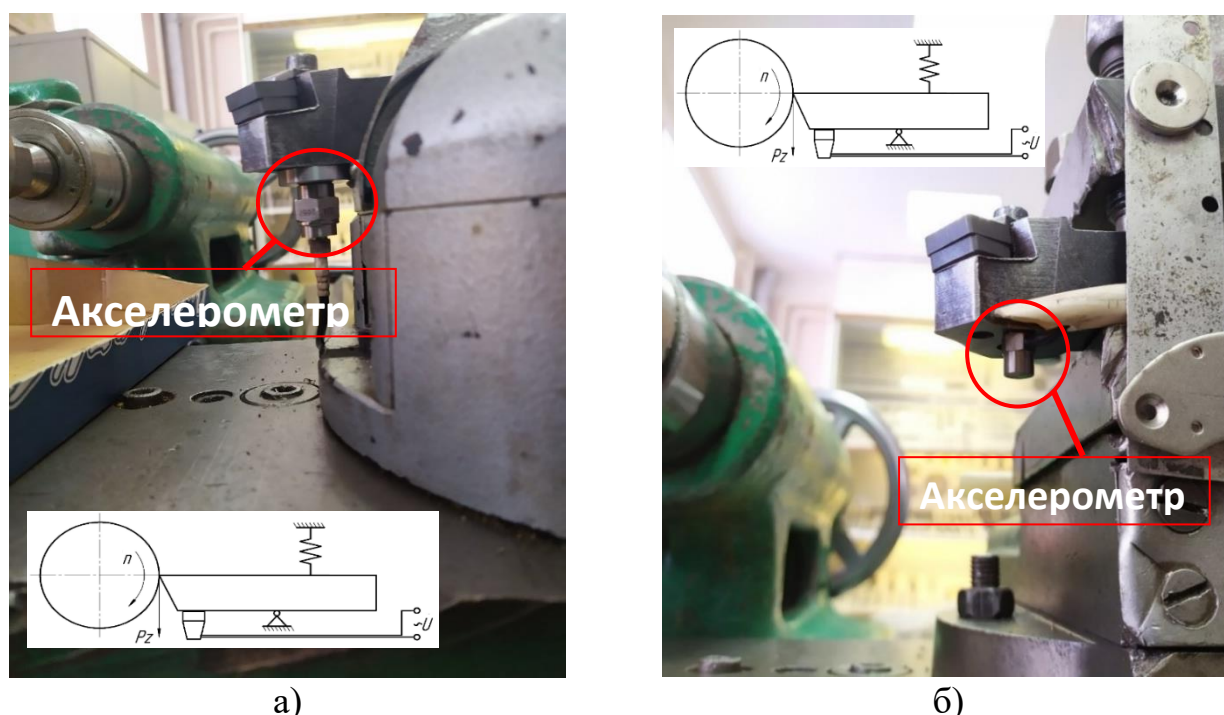


Рисунок 4.7 – Расположение: а – активного вибродатчика на державке сборного резца в динамометре УДМ600; б – расположение генераторного датчика на державке сборного резца в штатном резцедержателе

На рисунке 4.8 показан общий вид поля проведения эксперимента на станке 1К62 с записью составляющей P_z и виброускорения a_z . Заготовка закреплена в специальной длинной оправке, поджатой задним центром, позволяющей смещать заготовку вдоль оси центров. Было зафиксировано, что позиция заготовки на данной оправке не оказывает существенного влияния на результаты экспериментальных исследований, ввиду ее высокой жёсткости. Результаты, полученные с применением данной оправки, полностью совпадают с результатами, полученными на станке с ЧПУ.

На рисунке 4.9 показано поле проведения эксперимента на токарном станке с ЧПУ Viktor VTurn 26. С помощью программного управления удалось добиться более высоких скоростей резания, а также повторить результаты, полученные в лабораторных условиях на 1К62.

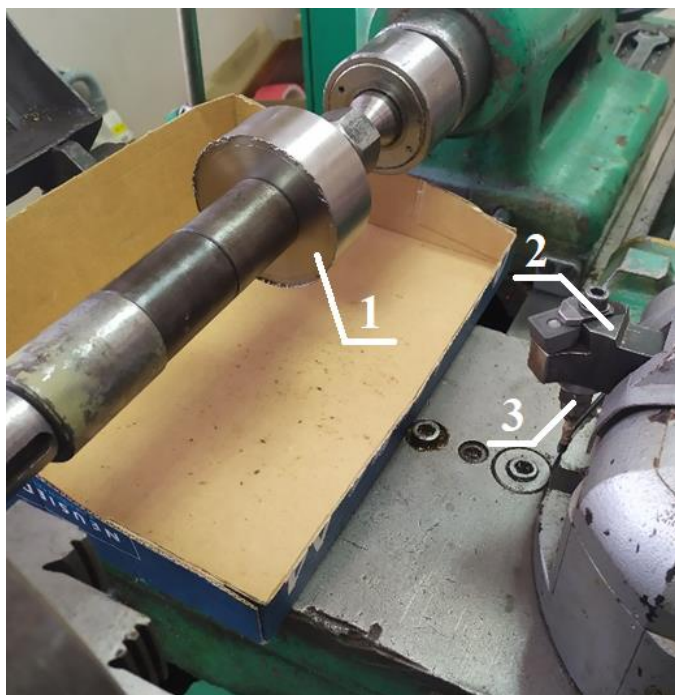


Рисунок 4.8 – Общий вид поля проведения эксперимента в лабораторных условиях на универсальном токарном станке 1К62: 1 – заготовка, 2 – резец, 3 – акселерометр

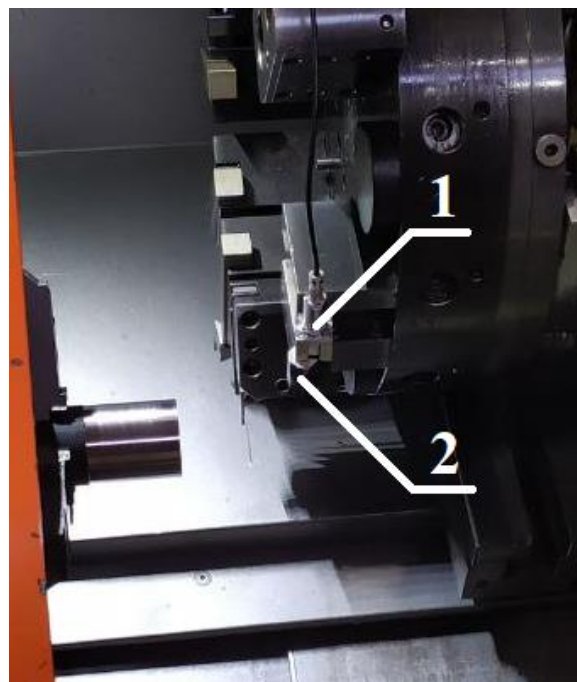


Рисунок 4.9 – Расположение вибродатчика на державке сборного резца в револьверном барабане станка с ЧПУ Viktor VTurn 26: 1 – акселерометр, 2 – резец

Приведенные далее результаты экспериментальных исследований для каждого обрабатываемого материала были получены на двух разных станках, в лабораторных и производственных условиях, с применением разных первичных преобразователей, что говорит о высокой степени достоверности полученных результатов.

4.2 Проведение экспериментов и обработка результатов

4.2.1 Анализ спектра общего уровня вибрации технологической системы станка

Исследование вибрации технологического оборудования невозможно без учета спектрального состава стороннего шума. Необходимо установить, какие диапазоны, полосы или гармоники являются информативными. В случае исследования вибрации резца при токарной обработке основным источником

посторонних вибраций является технологическая система станка. Интенсивный вибрационный шум создается приводом главного движения, механическими передачами и колебаниями элементов конструкции. Случайные сторонние возмущения, в общем случае, к рассмотрению не принимаются, поскольку не имеют качественного влияния на эксперимент, проводимый в лабораторных условиях. При проведении экспериментальных исследований в промышленных условиях, необходимо иметь ввиду общий вибрационный шум от тяжелого оборудования, которое может находиться неподалеку, к примеру, штампы, тяжелые металлообрабатывающие центры, кран-балки, турбореактивные или газотурбинные двигатели и прочие подобные силовые агрегаты. Следует отметить, что проведение эксперимента можно назначить на время, когда внешний шум отсутствует, однако, при оснащении станка системой автоматического управления требуется учесть влияние такого фактора и предусмотреть соответствующую фильтрацию.

Ощутимое влияние на результирующий сигнал вносят вибрации компонентов технологической системы станка (ТСС), сосредоточенные в непосредственной близости от зоны резания (рисунок 4.10, обл. 2). Вибрации удаленных механизмов (рисунок 4.10, обл. 1) складываются в общий спектр фоновых шумов и становятся неразличимы при установке акселерометра в обл. 2. Ввиду невозможности разделения составляющих спектра на колебания вынужденные и автоколебания, вполне эффективно себя показал метод подавления основных выявленных сторонних компонент спектра для повышения соотношения «сигнал/шум», где в качестве «сигнала» принимается вынужденная составляющая спектра, а за «шум» принимается спектр, включающий 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». Первичный сигнал виброускорения обозначается a_z и представляет собой временной сигнал главной составляющей виброускорения, полученный с акселерометра. Рассчитанное по его

приведенному спектру среднеквадратичное значение главной составляющей виброускорения далее обозначается A_z .

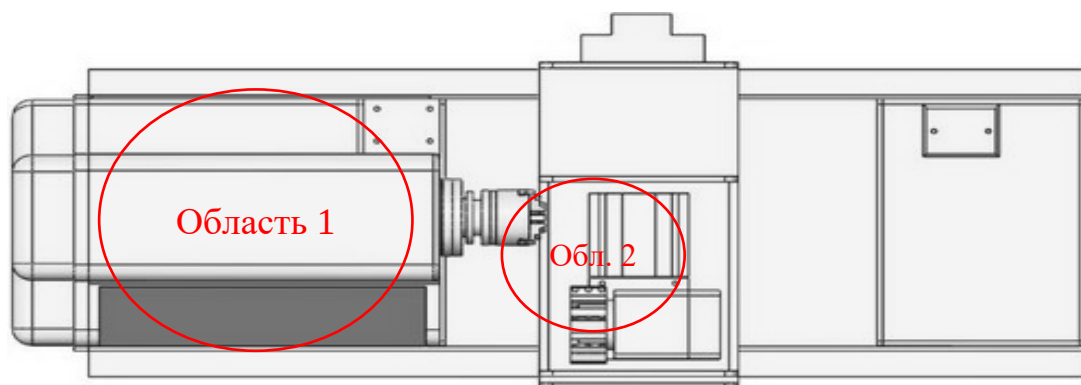


Рисунок 4.10 – Иллюстрация к анализу зон вибрации технологической системы станка на примере 1K62.

Повышение соотношения «сигнал-шум» в пользу вибраций, обусловленных вынужденными колебаниями, осуществимо путем подавления гармоник, составляющих спектр фоновых шумов ТСС в совокупности с автоколебательными процессами. Для идентификации собственных резонансных частот необходимо снять ударные спектры основных узлов (рисунок 4.11) технологической системы станка, находящихся вблизи исследуемой области – в непосредственной близости от зоны резания (обл.2), в том числе, зажатой в патроне заготовки, резцедержателя, державки резца, суппорта и других.

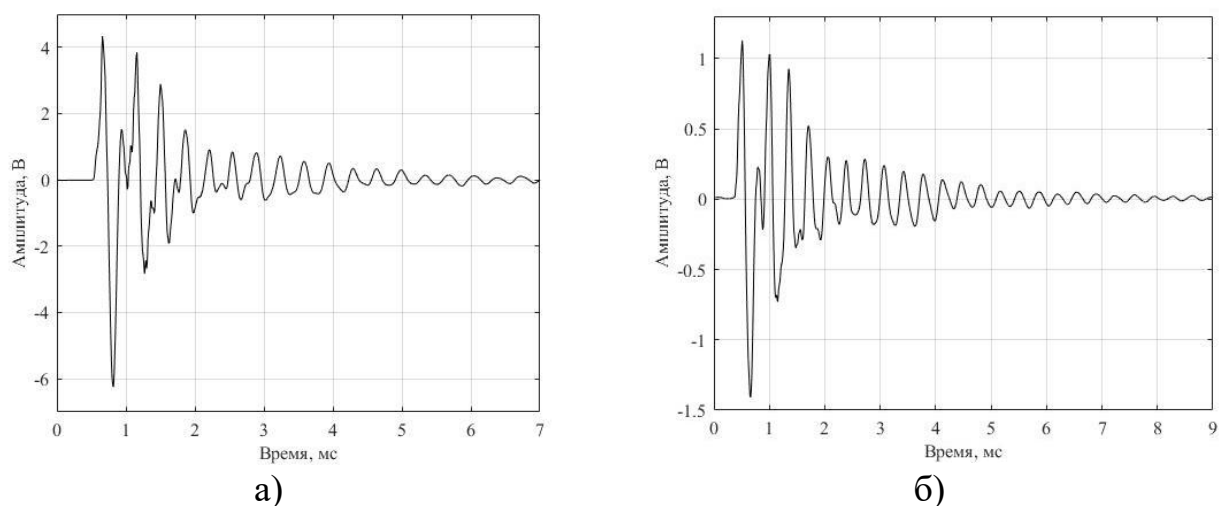


Рисунок 4.11 – Пример свободных затухающих колебаний после удара: а – резцедержателя; б – патрона

Спектр вибрации станка на холостом ходу записывается при запущенном приводе главного движения, вращении патрона и включенной подаче, но без осуществления резания. Результат включает гармоники, вносимые приводами, механизмами редукторов и прочие механические вибраций, источник которых установить не удастся.

Таким способом определяется ряд собственных резонансных частот в области 2 используемого станка, на основании которых синтезирована совокупность режекторных фильтров для подавления соответствующих компонент анализируемого спектра и частот фонового шума станка.

В результате, был синтезирован характерный спектр вибрации токарного станка 1К62 без процесса резания, включающий в качестве основы спектр фонового шума, снятого с резцедержателя, и гармоник собственных резонансных частот элементов конструкции в области 2 (рисунок 4.12).

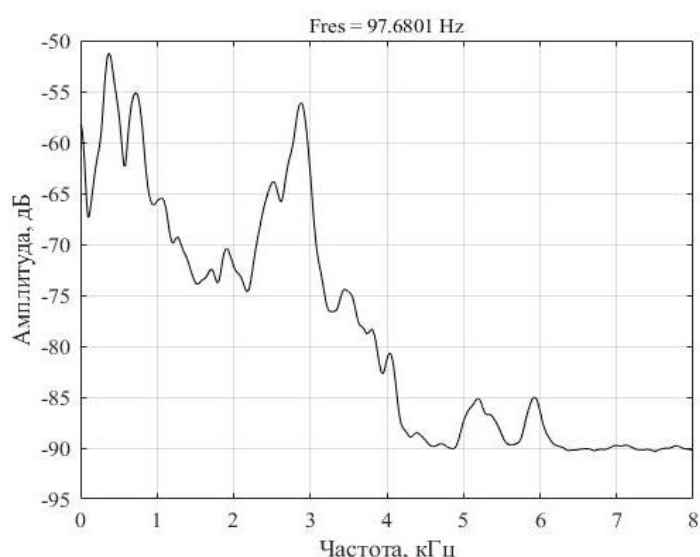


Рисунок 4.12 – Синтезированный спектр фонового шума технологической системы токарного станка 1К62

На основе полученного спектра разработан ряд аналоговых и цифровых фильтров, позволяющих подавить данные частоты в анализируемых спектрах вибрации сборного резца при точении и получить таким образом приведённый спектр для расчета A_z при разных скоростях резания.

4.2.2 Проведение эксперимента на стали 10X11H23T3MP

На державке режущего инструмента, вертикально под режущей пластиной, устанавливается акселерометр. Первичный сигнал a_z с акселерометра после усиления и оцифровки записываются в память ЭВМ. Запись сигнала

виброускорения проводится во время точения с разными скоростями резания, заданными для обеспечения температуры резания в области высокотемпературного охрупчивания по зависимости относительного удлинения δ от температуры при испытаниях на растяжение (рисунок 4.13).

После фильтрации вычисляется СКЗ приведенных спектров записанных временных сигналов виброускорения. На рисунке 4.14 показаны зависимости главной составляющей силы резания (P_z , Н), температуры в зоне резания (ϑ , °С), относительного поверхностного износа резца по задней поверхности ($h_{\text{онз}}$, мкм/ 10^3см^2) от скорости резания (V , м/мин) при точении.

Минимальное значение относительного удлинения от температуры δ_{10} наблюдается в диапазоне 650 – 750 °С,

что при точении в рамках данного эксперимента соответствует скорости резания 30 – 50 м/мин (рисунок 4.14). Минимальный относительный поверхностный износ по задней поверхности СРТП отмечается на скоростях резания 35 – 50 м/мин, а наименьшее значение главной составляющей силы резания в диапазоне 35 – 50 м/мин (рисунок 4.14).

В диапазоне скоростей резания, определенном классическими методами, на зависимости СКЗ виброускорения от скорости резания наблюдается участок перегиба функции, свидетельствующий о качественных изменениях в процессе резания. Как и предполагалось, при увеличении скорости резания наступает переход вида стружки со сливной в элементную, что свидетельствует о достижении температуры в зоне резания, приводящей к охрупчиванию обрабатываемого материала, а величина СКЗ виброускорения резко изменяется (рисунок 4.14).

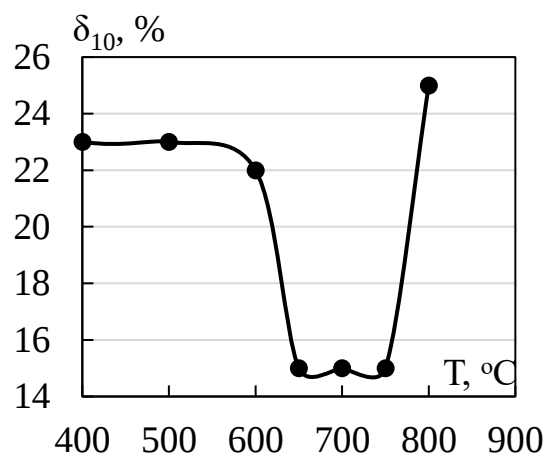


Рисунок 4.13 – Зависимость относительного удлинения δ_{10} образцов из стали 10Х11Н2ЗТЗМР от температуры Т при испытаниях на растяжение

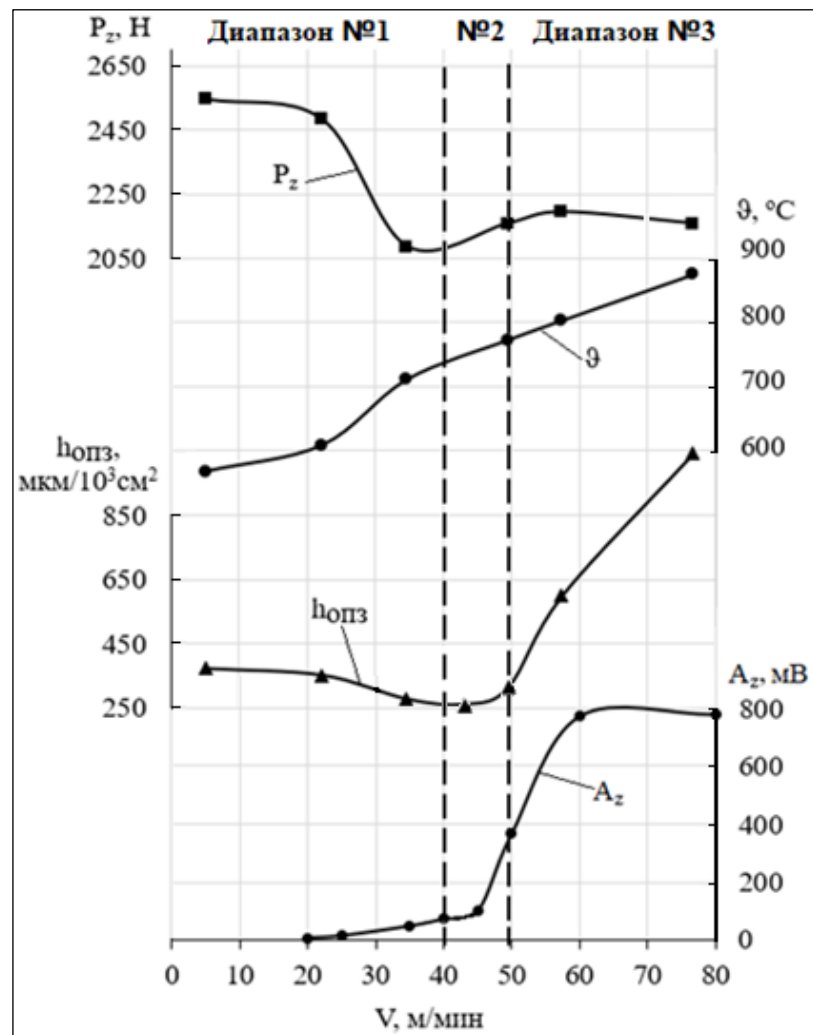


Рисунок 4.14 – Зависимости главной составляющей силы резания P_z , температуры в зоне резания θ , относительного износа по задней поверхности $h_{онз}$, главной составляющей виброускорения A_z от скорости резания V при точении стали 10X11H23T3MP, BK8, $t = 1$ мм, $S = 0,39$ мм/об

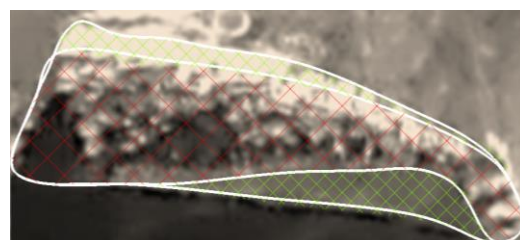
Диапазон скоростей резания, определённый по вибрации резца, составляет 40 – 50 м/мин. Полученный диапазон скоростей резания включает в себя указанные ранее диапазоны, определённые по P_z и $h_{онз}$, следовательно, обеспечивает условия максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин токарных резцов.

На рисунке 4.14 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, коэффициент сплошности $k_s = 0,81$.

Стружка, полученная при скорости резания 35 м/мин показана на рисунке 4.15. В диапазоне скоростей резания №2 характерна суставчатая стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,42$. Стружка, полученная при скорости резания 45 м/мин показана на рисунке 4.16. Четко выражены «зубцы» – деформация существенна, цвет стружки – желтый, что свидетельствует о значительном повышении температуры в зоне резания, стружка мало пружинит и ломается без усилий. В диапазоне скоростей резания №3 стружка элементная коэффициент сплошности $k_s = 0,23$, состоит из отдельных элементов желтого цвета с выраженными гребнями. Стружка, полученная при скорости резания 60 м/мин, показана на рисунке 4.17.



а)

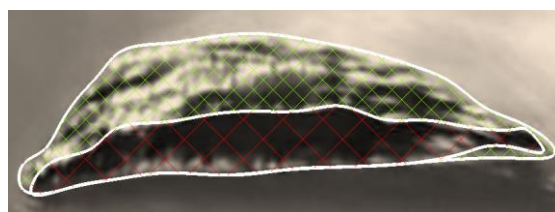


б)

Рисунок 4.15 – Сливная стружка ($k_s = 0,81$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 35$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм



а)

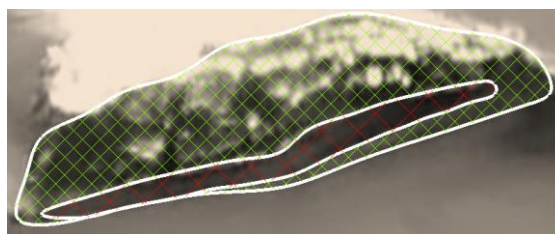


б)

Рисунок 4.16 – Суставчатая стружка ($k_s = 0,42$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 45$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм



а)



б)

Рисунок 4.17 – Элементная стружка ($k_s = 0,23$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 10X11H23T3MP, T15K6, $V = 60$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается согласованностью диапазона скоростей резания, полученного по вибрации резца A_z , с минимальными значениями относительного поверхностного износа резца по задней поверхности $h_{\text{онз}}$, главной составляющей силы резания P_z и изменения вида стружки со сливной в суставчатую и элементную (рисунок 4.14).

Автоматизация определения искомого диапазона скоростей резания заключается в выделении двух локальных критических точек с помощью производных функции $A_z(V)$. На рисунке 4.18 показаны зависимость $A_z(V)$, ее первая (K1) и вторая (K2) производные (Приложение А).

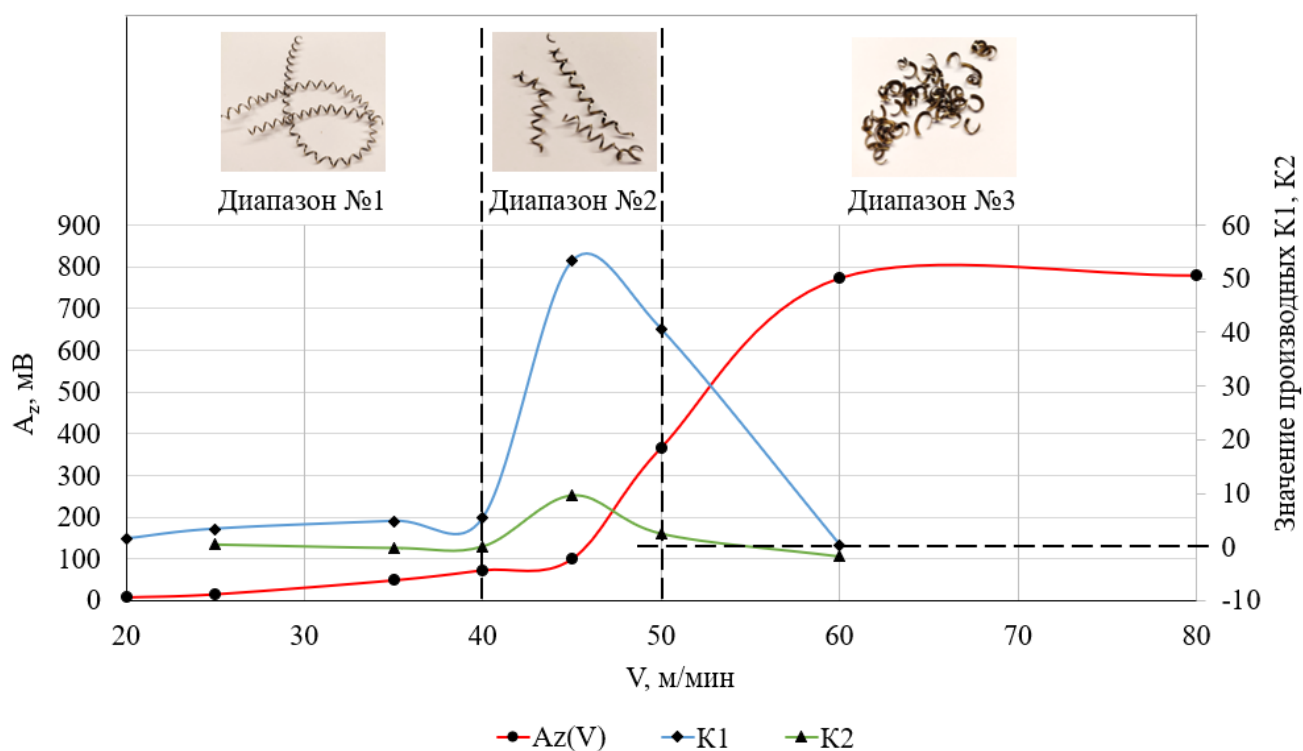


Рисунок 4.18 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V и ее первая (K1) и вторая (K2) производные при точении 10X11H23T3MP, T15K5, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм

Вертикальными пунктирными линиями отмечен искомый диапазон скоростей резания. Нижняя его граница определяется по локальному минимуму первой производной, после которого следует интенсивное изменение величины значения первой производной (более 200%). Верхняя граница искомого диапазона определяется по смене знака второй производной, означающей перегиб функции.

Таким образом, на примере стали 10X11H23T3MP скорость резания, обеспечивающая УМР СРТП, определённая по главной составляющей виброускорения резца A_z , находится в диапазоне 40 – 50 м/мин.

4.2.3 Проведение эксперимента на стали 14X17H2

На рисунке 4.19 показаны зависимости температуры в зоне резания (ϑ , °C), относительного износа по задней поверхности ($h_{онз}$, мкм/ 10^3см^2) и главной составляющей виброускорения A_z от скорости резания (V , м/мин) при точении стали 14X17H2. Характер зависимостей и анализ аналогичен приведенному ранее (см. параграф 4.2.2.).

Поведение зависимости $A_z(V)$, показанной на рисунке 4.19, аналогично приведенной для стали 10X11H23T3MP. Изменение вида стружки (рисунки 4.20-4.22) сопровождается значительным ростом функции $A_z(V)$.

При увеличении скорости резания наступает переход вида стружки со сливной в элементную, что свидетельствует о достижении температуры в зоне резания, приводящей к охрупчиванию обрабатываемого материала, а величина СКЗ виброускорения резко возрастает. Диапазон скоростей резания, определённый по вибрации резца, составляет 115 – 145 м/мин и включает диапазон минимальных значений относительного поверхностного износа резца по задней поверхности (рисунок 4.19).

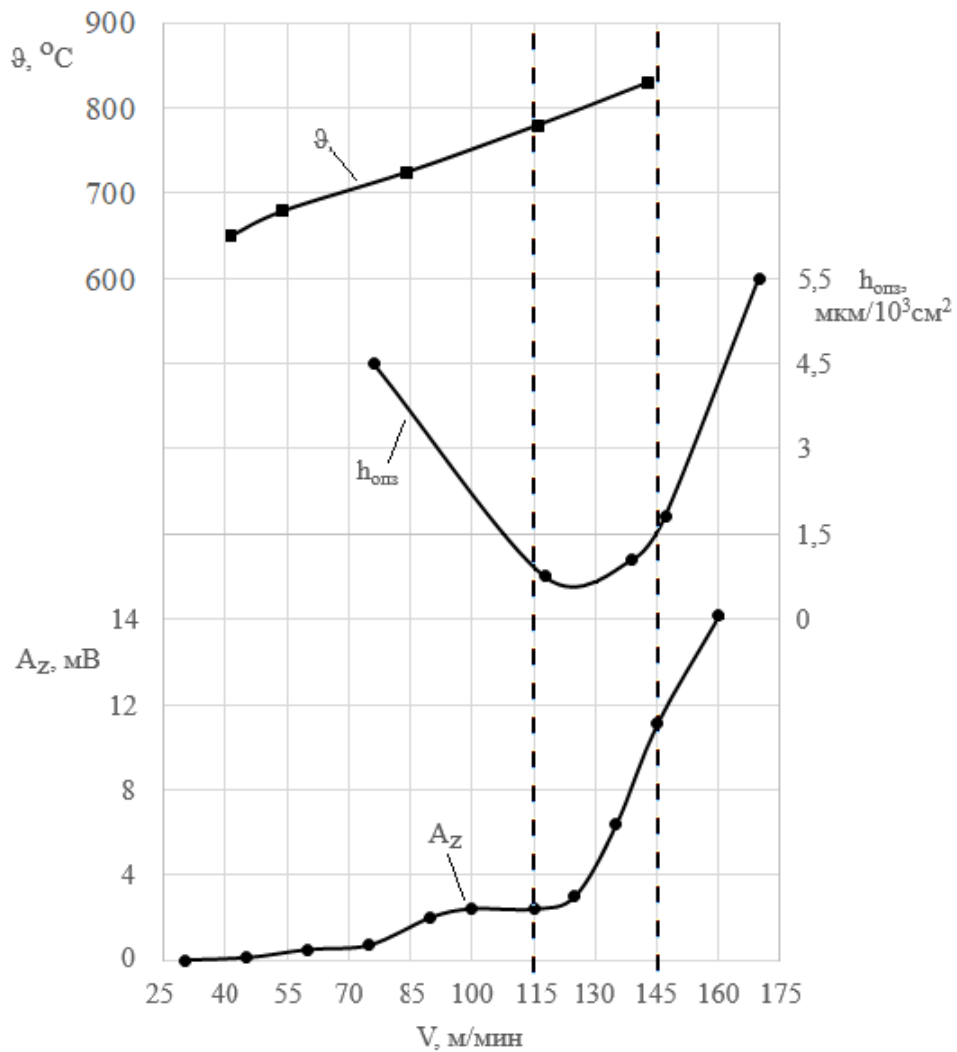
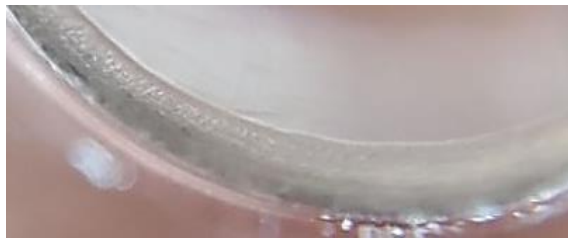


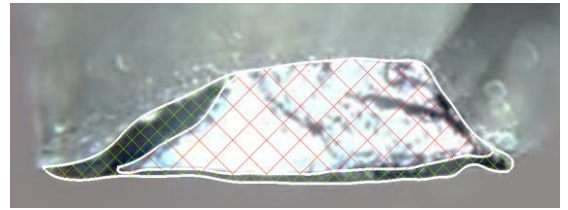
Рисунок 4.19 – Зависимость температуры в зоне резания Θ , относительного поверхностного износа резца по задней поверхности $h_{\text{онз}}$ и главной составляющей виброускорения A_z от скорости резания V (14X17H2, BK8, $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

На рисунке 4.19 указаны три диапазона скоростей резания, характеризующиеся разными видами стружки. Диапазон №1 – менее 115 м/мин, Диапазон №2 – 115 – 145 м/мин, Диапазон №3 – более 145 м/мин. Для диапазона №1 характерна сливная стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,86$. Пружинит, открытая поверхность гладкая. Стружка, полученная при скорости резания 90 м/мин показана на рисунке 4.20. В диапазоне №2 характерна суставчатая стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,58$. Текстура хорошо видна, стружка легко ломается. Стружка, полученная при скорости резания 135 м/мин показана на рисунке 4.21. В диапазоне №3 стружка элементная, коэффициент сплошности

$k_s = 0,41$. Состоит из отдельных элементов с ярко-выраженной текстурой. Стружка, полученная при скорости резания 160 м/мин, показана на рисунке 4.22.



а)

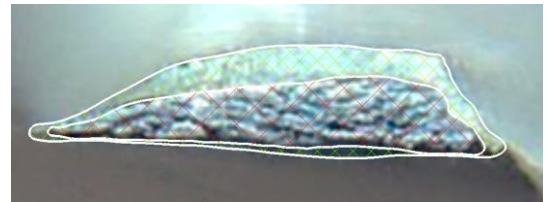


б)

Рисунок 4.20 – Сливная стружка ($k_s = 0,86$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 14X17H2, $V = 98$ м/мин, ВК8, $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об



а)

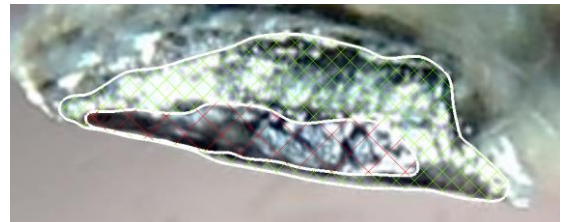


б)

Рисунок 4.21 – Суставчатая стружка ($k_s = 0,58$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 14X17H2, $V = 127$ м/мин, ВК8, $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об



а)



б)

Рисунок 4.22 – Элементная стружка ($k_s = 0,41$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 14X17H2, $V = 159$ м/мин, ВК8, $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об

На рисунке 4.23 показана зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V и ее первая (K1) и вторая (K2) производные. Первая вертикальная пунктирная линия показывает нижнюю границу диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, и определяется по локальному минимуму первой производной. Вторая вертикальная пунктирная линия показывает верхнюю границу искомого диапазона скоростей резания и определяется по смене знака второй производной, означающей перегиб функции.

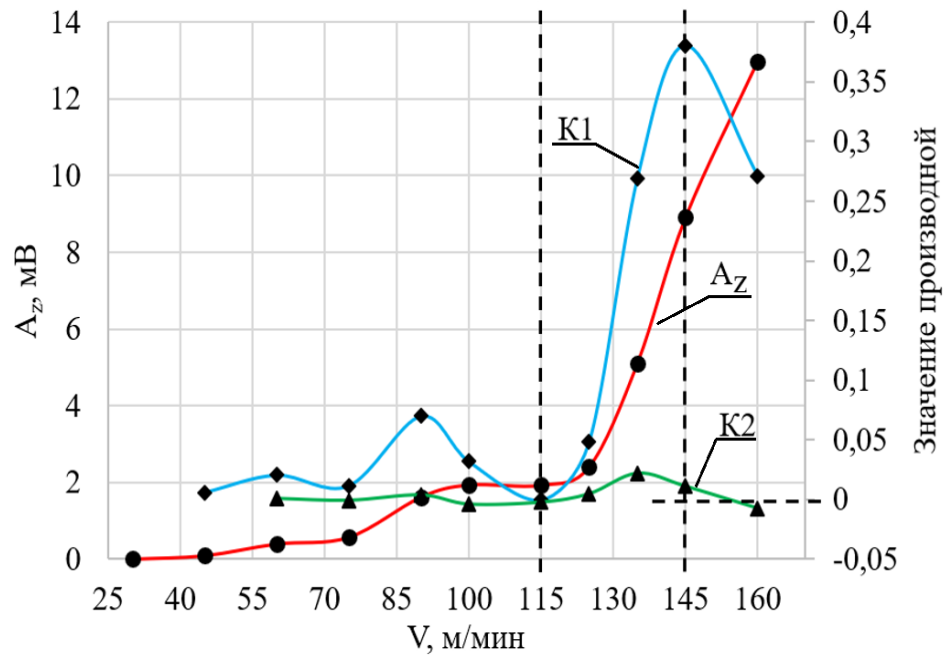


Рисунок 4.23 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V и ее первая ($K1$) и вторая ($K2$) производные (14X17H2, BK8, $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

Таким образом, диапазон скоростей, определённый по вибрации сборного резца в данном случае, составляет 115 – 145 м/мин, что согласуется с результатами испытаний (рисунок 4.19).

4.2.4 Проведение эксперимента на стали 12X18H10T

Высокотемпературное охрупчивание стали 12X18H10T наблюдается в диапазоне температур ограничен 700 – 800 °C (рисунок 4.24). В процессе резания контактная температура достигает 700 – 800 °C при скоростях 80 – 150 м/мин. Составляющая P_z стабилизируется при достижении скорости резания 120 м/мин, соответствующей температуре 760 °C.

Относительный поверхностный износ резца по задней поверхности достигает

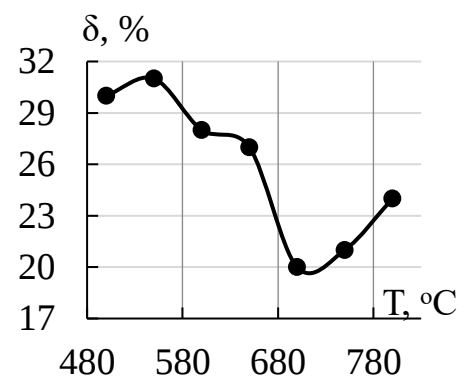


Рисунок 4.24 – Зависимость относительного удлинения δ_{10} образцов из стали 12X18H10T от температуры T при испытаниях на растяжение

высоких значений при скоростях резания свыше 150 м/мин (рисунок 4.25). Математический анализ зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения резца от скорости резания $A_z(V)$ показывает наличие требуемых критических точек.

Функция $A_z(V)$ при низких скоростях резания имеет высокие значения, а при изменении вида стружки на скорости резания 120 м/мин первая производная обращается в ноль, после чего происходит интенсивное уменьшение значения функции.

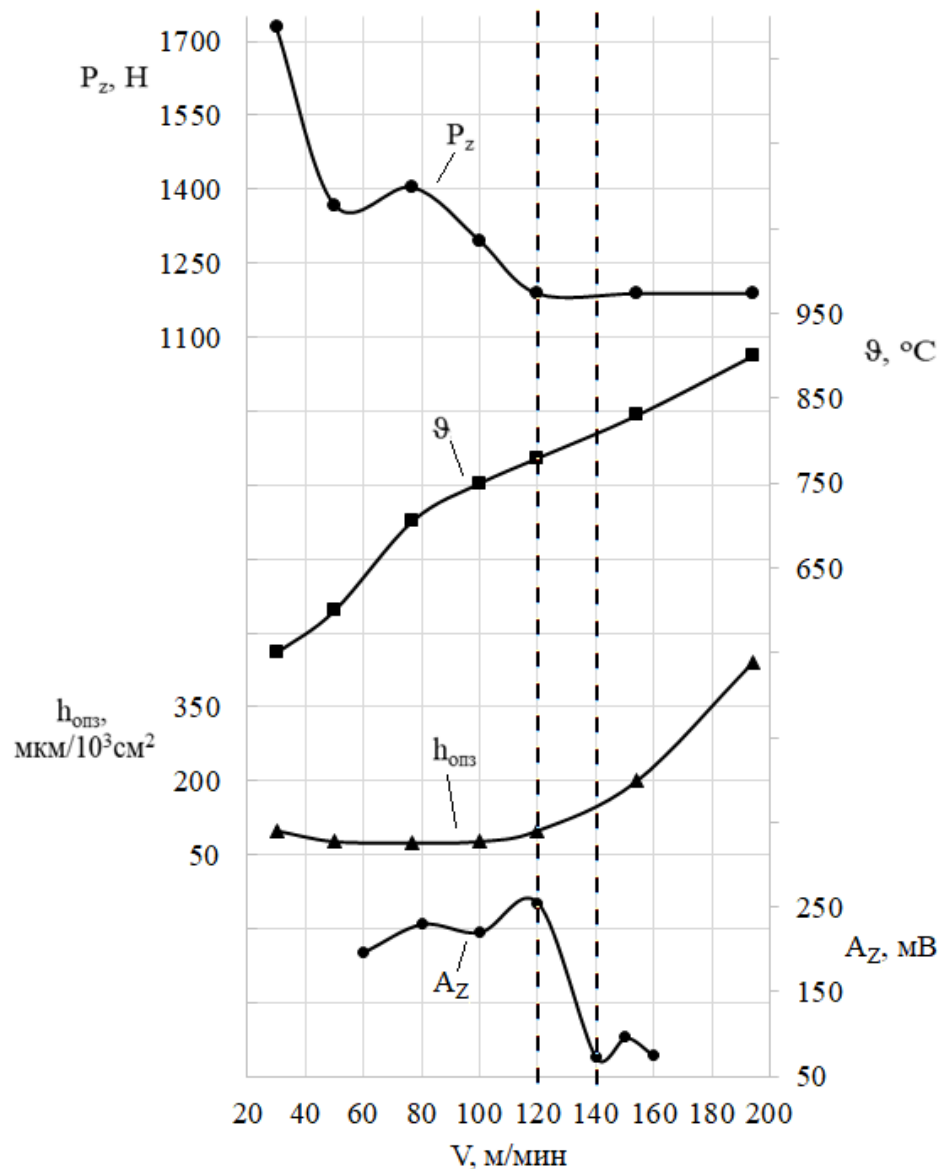
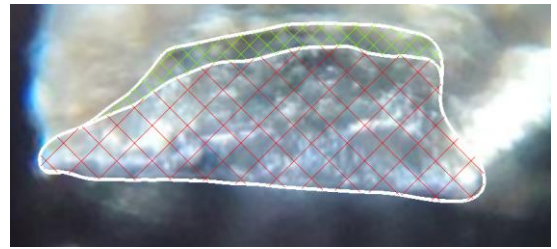


Рисунок 4.25 – Зависимости температуры в зоне резания θ , составляющей силы резания P_z , относительного износа по задней поверхности h_{onz} и главной составляющей виброускорения A_z от скорости резания при точении стали (12X18H10T, BK8, $t = 1$ мм, $s = 0,39$ мм/об)

На рисунке 4.26 показана сливная стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,84$. Стружка упругая витая, длинная, ломается с трудом, текстура выражена слабо. На рисунке 4.27 показана суставчатая стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,55$. Ломается, почти не пружинит, отчетливо видна слоистая текстура. На рисунке 4.28 показана элементная стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,30$. Элементы текстуры разделены глубокими трещинами, стружка состоит из отдельных элементов малого размера.



а)

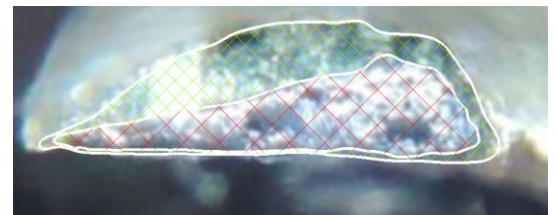


б)

Рисунок 4.26 – Сливная стружка ($k_s = 0,84$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 12X18H10T, ВК8, $V = 100$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм



а)

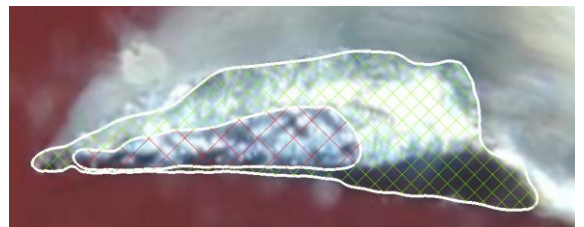


б)

Рисунок 4.27 – Суставчатая стружка ($k_s = 0,55$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 12X18H10T, ВК8, $V = 120$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм



а)



б)

Рисунок 4.28 – Элементная стружка ($k_s = 0,30$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сталь 12X18H10T, ВК8, $V = 140$ м/мин, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм

Функция $A_z(V)$ демонстрирует резкое уменьшение значения при изменении вида стружки. Однако, алгоритм определения границ искомого диапазона

скоростей резания остается прежним. Нижняя граница диапазона искомых скоростей резания определяется по критической точке первой производной (максимум). Верхняя граница определяется по изменению знака второй производной (рисунок 4.29).

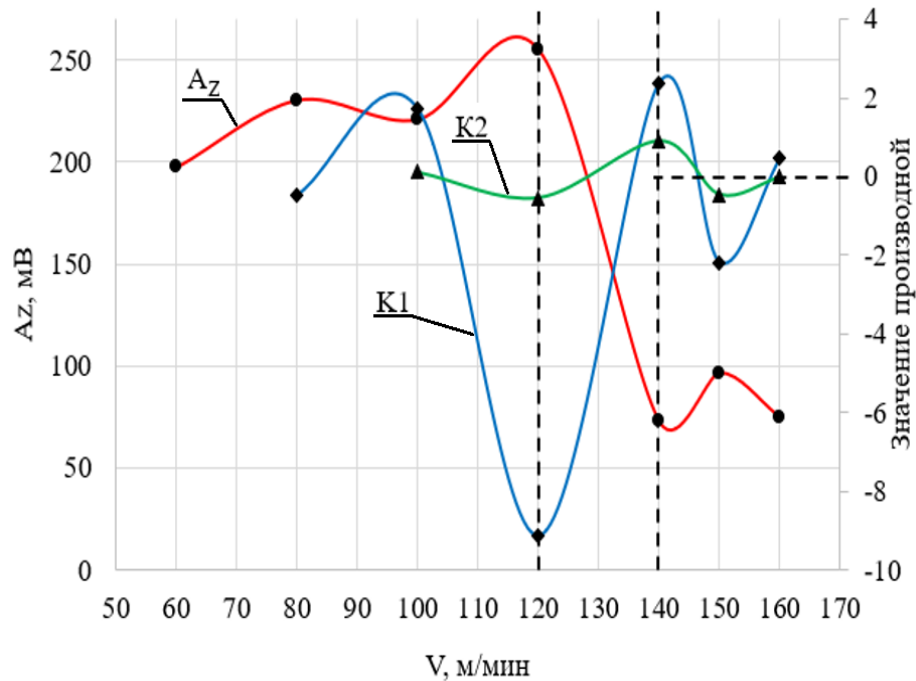


Рисунок 4.29 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V и ее первая ($K1$) и вторая ($K2$) производные (12X18H10T, BK8, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм)

Таким образом, диапазон скоростей резания, обеспечивающий УМР СРТП сборных резцов и определённый по вибрации сборного резца при точении, стали 12X18H10T (BK8, $s = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм) составляет 120 – 140 м/мин, что согласуется с результатами классических испытаний, ограничивающих скорости резания в пределах 120 – 150 м/мин (рисунок 4.25).

4.2.5 Проведение эксперимента на сплаве ХН78Т

На рисунке 4.30 показаны зависимости относительного удлинения δ и предела прочности σ_b от температуры при испытаниях на растяжение образцов из сплава ХН78Т.

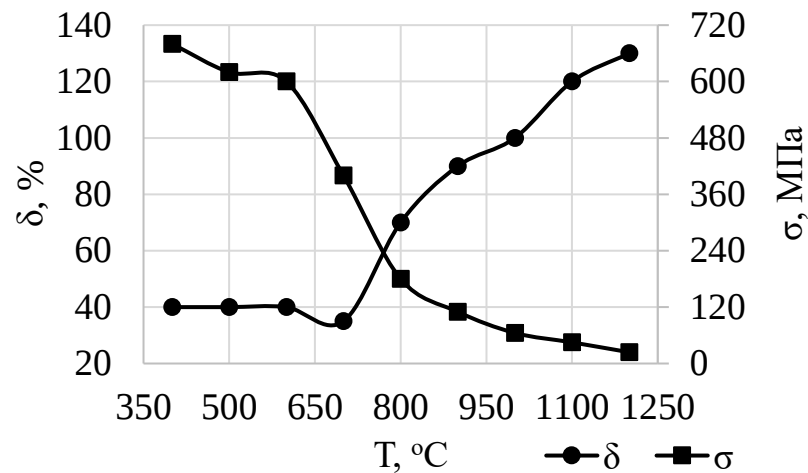


Рисунок 4.30 – Зависимости относительного удлинения δ_5 и предела прочности σ_b от температуры при испытаниях на растяжение образцов из сплава ХН78Т

Как и у исследуемых сталей здесь наблюдается характерное поведение зависимости относительного удлинения от температуры. При нагревании свыше 600 °С ожидаются качественные изменения физико-механических свойств, что подтверждает зависимость предела прочности от температуры.

Относительный износ по задней поверхности сборного резца с СРТП при точении сплава на никелевой основе ХН78Т достигает минимальных значений в диапазоне скоростей 22 – 45 м/мин (рисунок 4.31).

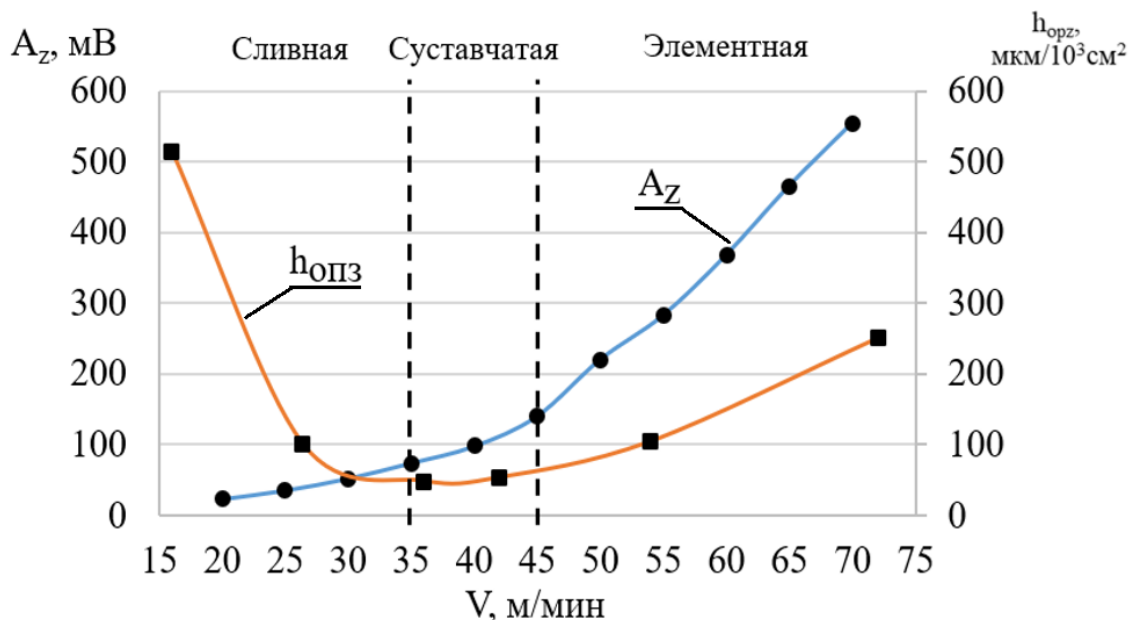


Рисунок 4.31 – Зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения A_z и относительного износа по задней поверхности от скорости резания V (ХН78Т, ВК8, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

При этом, в отличие от исследуемых сталей, сплав на никелевой основе не демонстрирует резкого увеличения значения функции $A_z(V)$, однако прослеживается четкая корреляция между поведением механических характеристик и значением главной составляющей виброускорения.

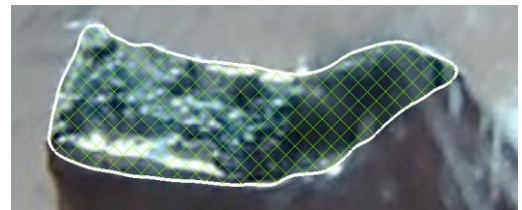
Сливная стружка, коэффициент сплошности $k_s = 1$, показана на рисунке 4.32. Прямая, длинная, ломается с трудом.

Суставчатая стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,62$, показана на рисунке 4.33. Закручена в спираль, легче ломается и имеет слоистую текстуру.

Элементная стружка, коэффициент сплошности $k_s = 0,36$, показана на рисунке 4.34. Представляет собой малые фрагменты, сильно закрученные в спираль.



а)



б)

Рисунок 4.32 – Сливная стружка ($k_s = 1$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН78Т, $V = 35$ м/мин, ВК8, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об



а)



б)

Рисунок 4.33 – Суставчатая стружка ($k_s = 0,62$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН78Т, $V = 45$ м/мин, ВК8, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об

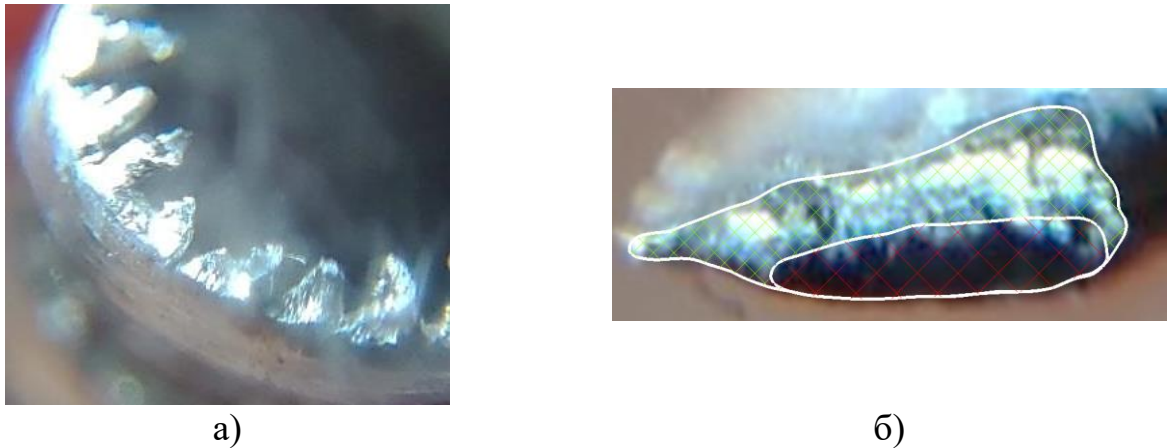


Рисунок 4.34 – Элементная стружка ($k_s = 0,36$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН78Т, $V = 55$ м/мин, ВК8, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об

Условия определения диапазона рекомендуемых скоростей резания по критическим точкам производных выполняются (рисунок 4.35) и согласуются с изменением вида стружки (рисунки 4.32 – 4.34).

Диапазон скоростей резания, обеспечивающий УМР СРТП сборных резцов и определённый по вибрации резца, в данном случае, составил 35 – 45 м/мин, что вполне согласуется с результатами по зависимости относительного износа по задней поверхности – 30 – 45 м/мин.

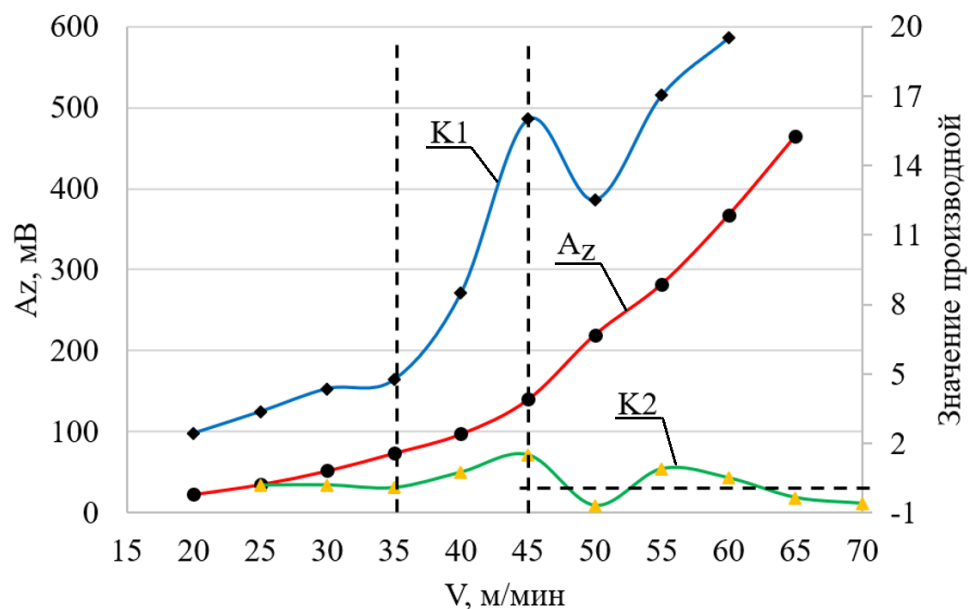


Рисунок 4.35 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V и ее первая ($K1$) и вторая ($K2$) производные (ХН78Т, ВК8, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

4.2.6 Проведение эксперимента на сплаве ХН60ВТ

На рисунке 4.36 показаны зависимости относительного удлинения δ_5 и предела прочности $\sigma_{\text{п}}$ образцов из сплава ХН60ВТ от температуры T при испытаниях на растяжение. Необходимо отметить, что при экстремальном поведении относительного сужения наблюдается также перегиб функции предела прочности, убывающего во всем диапазоне наблюдения.

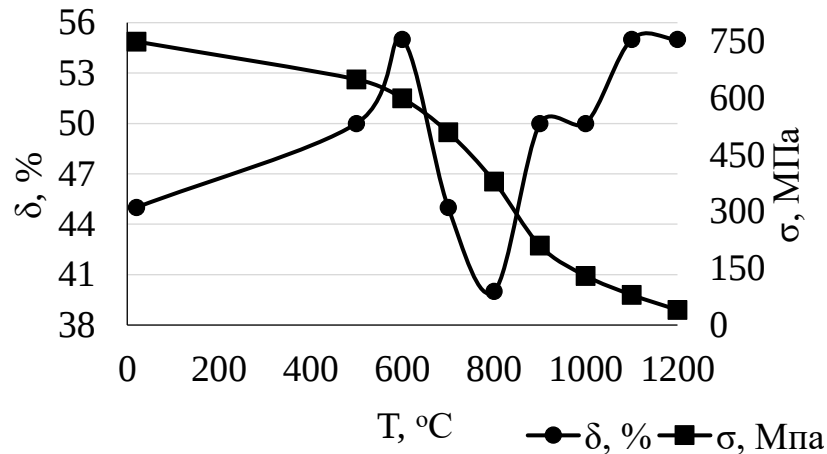


Рисунок 4.36 – Зависимость относительного удлинения δ_5 и предела прочности $\sigma_{\text{п}}$ образцов из сплава ХН60ВТ от температуры T при испытаниях на растяжение

На основании вышеизложенных экспериментальных данных можно предположить, что для определения диапазона рекомендуемых скоростей резания достаточно знать функцию $A_z(V)$, показанную на рисунке 4.37.

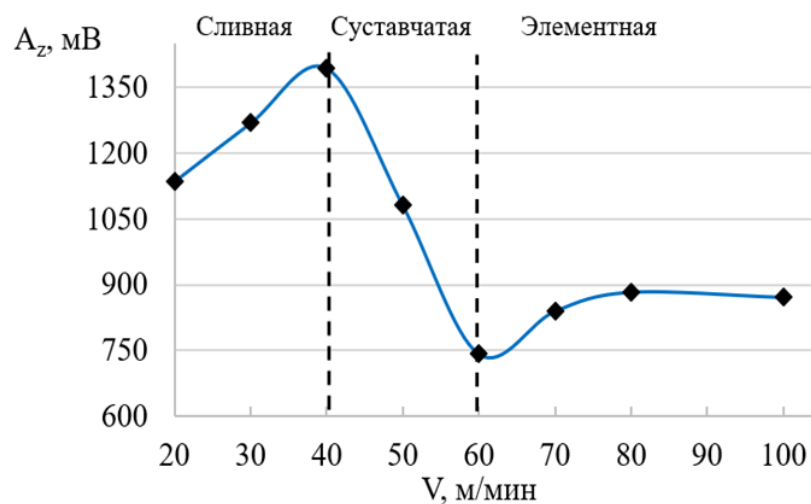
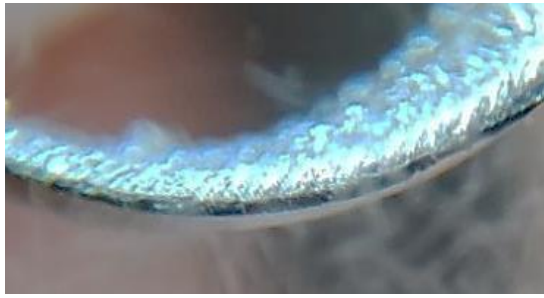
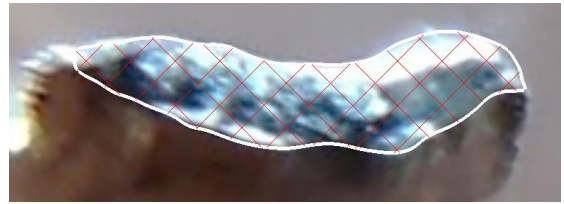


Рисунок 4.37 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z и вида стружки от скорости резания V (ХН60ВТ, Т15К6, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

Изменение вида стружки при повышении скорости резания показано на рисунках 4.38 – 4.40.



а)

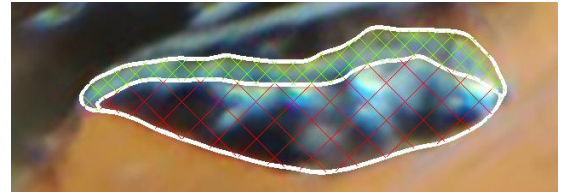


б)

Рисунок 4.38 – Сливная стружка ($k_s = 1$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН60ВТ, $V = 30$ м/мин, Т15К6, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об



а)

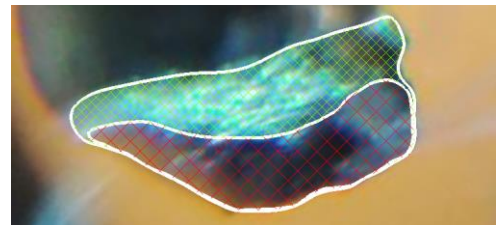


б)

Рисунок 4.39 – Суставчатая стружка ($k_s = 0,71$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН60ВТ, $V = 50$ м/мин, Т15К6, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об



а)



б)

Рисунок 4.40 – Элементная стружка ($k_s = 0,5$): а – вид стружки; б – разрушение стружки; сплав ХН60ВТ, $V = 70$ м/мин, Т15К6, $t = 0,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об

Сливная стружка ломается с трудом и сильно пружинит. При увеличении $\times 60$ слоистая структура прослеживается, но трещин и «гребешков» не наблюдается. Суставчатая стружка не путается, сходит отдельными спиралями, при анализе под увеличением $\times 60$ видны частые глубокие торцевые трещины. Элементная стружка сходит короткими участками, в спираль завивается слабо, поверхность блестящая, отчетливо видна слоистая структура.

Вертикальными пунктирными линиями (рисунок 4.41) обозначены границы диапазона скоростей резания, заключенных между критическими точками первой и второй производных.

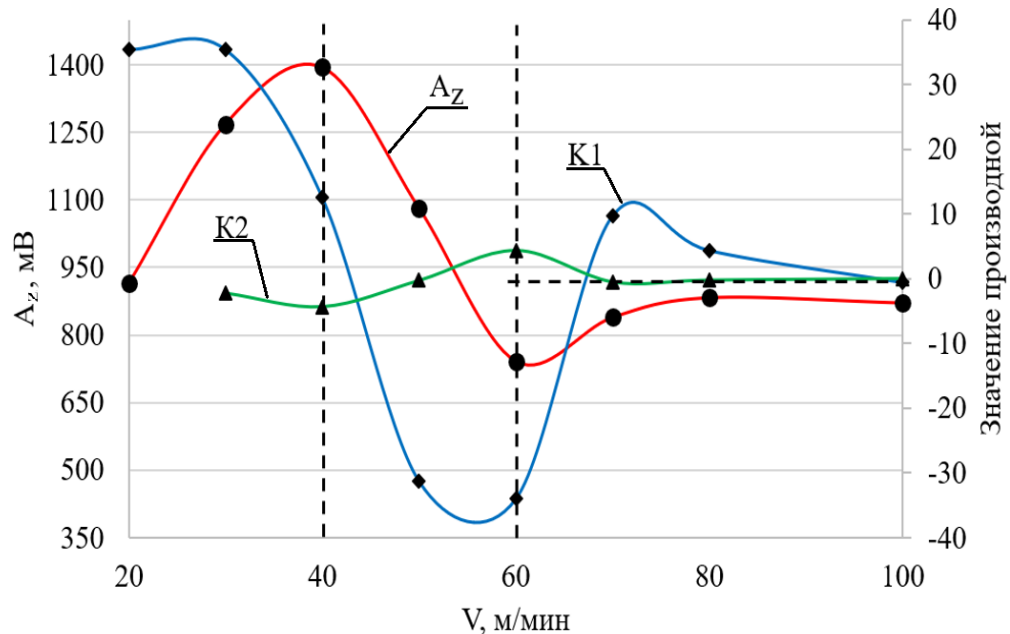


Рисунок 4.41 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z и ее первой (K1), второй (K2) производных от скорости резания V (ХН60ВТ, Т15К6, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

На данных скоростях происходит изменение вида стружки, описанное выше. На основании вышеизложенного сделан вывод, что для установления диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СРТП сборных резцов, достаточно зависимости главной составляющей ускорения A_z от скорости резания, а анализ зависимостей составляющей P_z силы резания и относительно износа резца по задней поверхности не требуется.

Для проверки выбранного диапазона было проанализировано изменение вида стружки, указывающее на качественные изменения механических характеристик исследуемого сплава в установленном диапазоне скоростей резания.

4.3 Сводная таблица результатов

Сводная таблица по результатам экспериментов на исследуемых материалах для сравнения авторского метода назначения скорости резания с известными

методами и рекомендациями производителя СТРП (таблица 4.1). Сравнение результатов разработанного автором метода с данными, полученными технологами в результате стойкостных испытаний для обрабатываемых материалов предприятия «Тюменские моторостроители» (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Сравнение результатов разработанного автором метода с известными методами назначения скорости резания для обрабатываемых материалов предприятия «Тюменские моторостроители»

Обрабатываемый материал	Скорость резания (м/мин)					
	Производитель СТРП (КЗТС)	Справочник (Я.Л. Гуревич)	Мин. v_{opt} (по методу А.Д. Макарова)	Мин. P_z (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

Таблица 4.2 – 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 СТРП (ISCAR)	Данные технологов ПАО «ТМ»	По методу автора	
			Диапазон	Средняя скорость
14X17H2	100 – 180	130	120 – 150	135
10X11H23T3MP	25 – 60	45	40 – 50	45
ХН78Т	20 – 65	45	38 – 48	43

4.4 Выводы по главе

1. Разработан метод определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего УМР СТРП сборных резцов при точении по зависимости главной составляющей виброускорения A_z сборного резца от скорости резания. Диапазон скоростей резания, установленный автором, позволяет уточнить

диапазон скоростей резания, рекомендованный производителем СРТП (КЗТС и ISCAR), в среднем на 69%.

2. Средние скорости диапазонов скоростей резания, обеспечивающих УМР СРТП сборных резцов, полученные по методу автора в автоматическом режиме, отличаются в среднем не более 7,5% от оптимальных по методике профессора А.Д. Макарова и в среднем не более 6,5% по методике профессора С.С. Силина, полученных в результате долгосрочных ресурсоемких исследований.

3. Метод апробирован при точении деталей из сталей 10X11H23T3MP, 14X17H2, 12X18H10T и сплавов ХН78Т и ХН60ВТ.

4. Использование зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения A_z от скорости резания в качестве диагностического параметра процесса точения может быть положено в основу системы автоматического определения и поддержания скорости резания в процессе токарной обработки, поскольку поддается полной автоматизации в производственных условиях.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

5.1 Метод определения диапазона скоростей резания, обеспечивающего условия максимальной работоспособности СРТП сборных резцов

Метод разработан и апробирован на сталях 12Х18Н10Т, 14Х17Н2, 10Х11Н23Т3МР и сплавах ХН60ВТ, ХН78Т. Применяется при точении на универсальных токарных станках и токарных станках с ЧПУ.

Для применения разработанного метода обрабатываемый материал должен иметь провал пластичности в некотором диапазоне высоких температур, которые достижимы в зоне резания при точении сборными резцами с СРТП. Температурно-скоростной фактор вызывает изменения механических характеристик обрабатываемого материала, что отражается в изменении вида стружки и, соответственно, характера вертикальной составляющей P_z , являющейся вынуждающей силой вертикальных осцилляций режущего инструмента при устойчивом процессе резания. Показанное свойство влияет на вид стружки, поскольку при увеличении скорости резания повышается и температура в зоне резания, материал охрупчивается – стружка утрачивает пластичность и становится суставчатой, а затем элементной. Изменение вида стружки отражается в качественном изменении силового воздействия на резец, так как для каждого вида стружки характерна различная площадь контакта с передней поверхностью резца: для элементной и суставчатой прослеживается периодичность в воздействии на резец, в то время как сливная стружка предполагает стабильное, безотрывное нагружение. Совокупность описанных явлений отражает зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения (ГСВ) от скорости резания, которую может экспериментально получить система автоматического управления.

Пусконаладочные мероприятия включают предварительный замер спектра собственных резонансных частот технологической системы станка. Информация о данных частотах вводится в систему автоматического управления и учитывается при фильтрации полезного сигнала для получения приведенного спектра.

После настройки система совершает первый проход по припуску для устранения биений, погрешностей установки и грубых неровностей заготовки, делая ее цилиндрической. Во время второго прохода по припуску система осуществляет сбор данных, включающий измерение вибрации при повышении скорости резания до тех пор, пока не достигнет программного ограничения или характерного участка скачкообразного изменения СКЗ главной составляющей виброускорения. Глубина резания при втором проходе по припуску составляет от 0.5 до 1 мм. В зависимости от обрабатываемого материала. На данном этапе система синтезирует зависимость $A_z(V)$, на основе которой осуществляется управление путем непрерывной актуализации уставки, диапазон рекомендуемых скоростей резания соответствует скачкообразному изменению величины среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения сборного резца и лежат в диапазоне между критической точкой первой производной функции $A_z(V)$, после которой следует стремительный прирост ее значения (более 200%), и точкой перегиба функции $A_z(V)$.

Во время работы системы действуют программные ограничения для обеспечения безопасности работы. Система не сможет превысить заданную максимальную скорость резания, зависящую от технологической системы станка. Система не будет работать при слишком низкой скорости во избежание закусывания заготовки или остановки привода. В системе организована пассивная защита по превышению допустимого порога общего уровня вибрации. Поскольку система для обеспечения своей работы регулярно измеряет общий уровень вибрации, логично использовать эти данные для контроля технического состояния станочной системы с точки зрения классической вибродиагностики.

Следует понимать, что метод, основанный на измерении вибрации, и использовании ее в качестве диагностического параметра, крайне чувствителен к

посторонним источникам колебаний, однако, их можно подавить цифровыми или аналоговыми фильтрами или исключить из анализируемого спектра определенные гармоники. Например, если известно, что в производственных условиях рядом с модернизируемым станком неизбежно будет находиться источник вибрации (компрессорная станция и др.) необходимо добавить в систему программный фильтр на соответствующей частоте. Аналогичным образом, требует программной корректировки обработка тонкостенной детали или детали, закрепленной с длинным вылетом. Поскольку, в таких случаях общий уровень и спектральный состав вибрации будет зависеть от непостоянной жесткости заготовки и изменяться в зависимости от удаления резца от патрона.

Получение значения поддерживаемой скорости резания на основании вибрации сборного резца осуществляется по следующему алгоритму (рисунок 5.1).

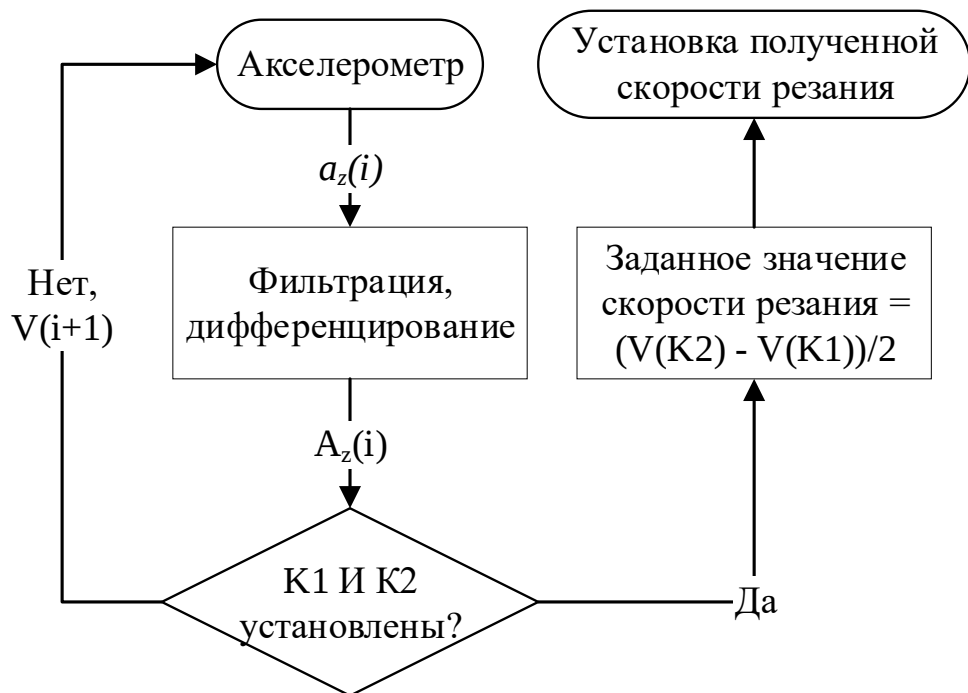


Рисунок 5.1 – Алгоритм определения и поддержания скорости максимальной работоспособности резца по главной составляющей виброускорения;
 $V(i+1) - V(i) = H$ (шаг повышения скорости резания), $H = [0,5; 20]$ м/мин

Алгоритм определения и поддержания скорости максимальной работоспособности резца по главной составляющей виброускорения

1. Получение временного сигнала главной составляющей виброускорения при заданной скорости резания
2. Синтез зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения от скорости резания в виде таблично заданной функции.
3. Определение диапазона скоростей резания, включающего качественные изменения в поведении СКЗ главной составляющей виброускорения.
4. Формирование нового значения поддерживаемой оборотной частоты заготовки согласно принятому решению о сохранении или изменении текущей скорости резания.

Диапазон рекомендуемых скоростей резания, полученный таким образом, согласуется с результатами по механическим характеристикам (изменение вида стружки), относительному износу по задней поверхности, главной составляющей силы резания, это доказывает, что главной составляющей виброускорения резца достаточно для определения диапазона скоростей максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин сборных инструментов. Применение других методов, в таком случае, не является обязательным.

5.2 Разработка функциональной схемы системы автоматического управления

Проектирование САУ заключается в синтезе функциональной схемы из отдельных универсальных и специальных узлов, с детерминированными характеристиками. Функциональная схема отражает все процессы, происходящие в САУ для реализации заложенного алгоритма. В обязательном порядке, любая САУ содержит объект управления и устройство управления (УУ), связанные

согласно общей концепции алгоритма управления. На рисунке 5.2 представлена обобщённая функциональная схема САУ скоростью резания.

В указанной схеме технологическая система станка (ТСС) выступает в качестве объекта управления, о состоянии которого система следит по временному сигналу главной составляющей виброускорения $a(t)$, обороты заготовки n и диаметр обрабатываемой поверхности D являются вспомогательными для определения текущей скорости резания.

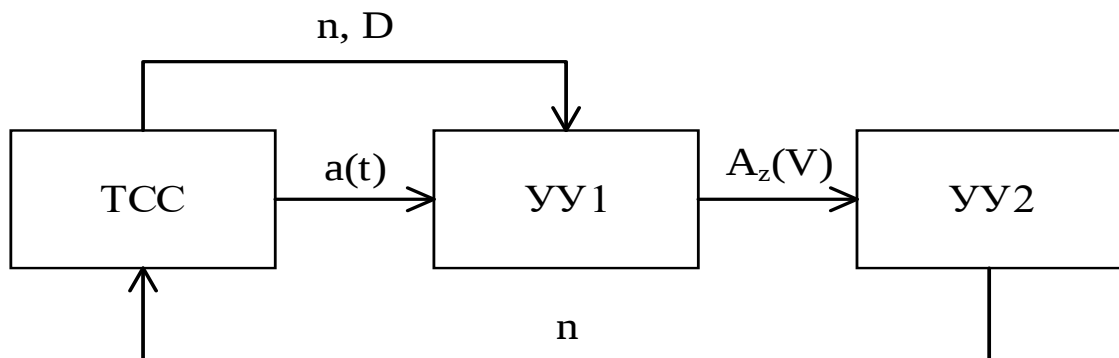


Рисунок 5.2 – Обобщённая функциональная схема САУ скоростью резания:
 ТСС – технологическая система станка (объект управления); УУ1 – устройство управления №1; УУ2 – устройство управления №2; $a(t)$ – временной сигнал ГСВ; $A_z(V)$ – среднее квадратичное ГСВ при скорости резания V ; n – число оборотов заготовки в единицу времени; D – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки

Выход системы выражается величиной числа оборотов заготовки в единицу времени для корректирования скорости резания при известной геометрии обрабатываемой поверхности. Каждый узел схемы (рисунок 5.2) представляет собой подсистему, выполняющую ключевые преобразования для перехода между основными точками Алгоритма. На рисунке 5.3 показаны узлы технологической системы станка, задействованные в реализации Алгоритма.

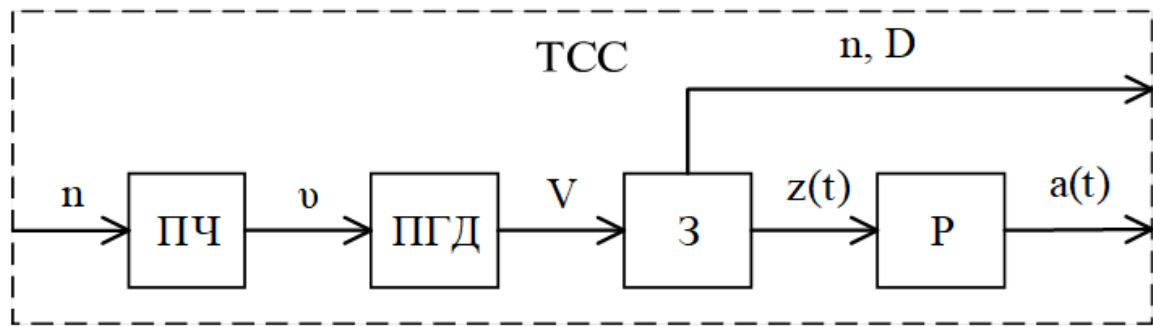


Рисунок 5.3 – Реализация п.1 Алгоритма. Узел «ТСС» функциональной схемы:

ПЧ – преобразователь частоты; ПГД – привод главного движения станка (в совокупности с механикой передачи вращения на заготовку); З – заготовка в процессе точения; Р – сборный резец с СРТП; v – частота напряжения питания ПГД; V – скорость резания; $z(t)$ – механические колебания

На вход ТСС принимает уставку в виде аналогового сигнала, пропорционального оборотам заготовки n . Аналоговый сигнал принимается преобразователем частоты, генерирующим переменное трехфазное напряжение частотой v для питания привода главного движения, обеспечивающего требуемые обороты заготовки для достижения скорости резания V . В процессе точения со скоростью V в точке контакта «заготовка – резец» наводятся механические колебания вершины резца $z(t)$. На державке резца жестко закреплен пьезоакселерометр, преобразующий механические колебания в электрический сигнал, пропорциональный виброускорению $a(t)$. В качестве вспомогательных сигналов учитываются текущая оборотная частота и диаметр заготовки, необходимый для вычисления текущей фактической скорости резания.

Рисунок 5.4 раскрывает функциональное содержание узла УУ1. Блок аналоговой фильтрации и нормализации преобразует первичный сигнал виброускорения в пригодный для оцифровки $A(t)$ с помощью аналого-цифрового преобразователя, выдающего сигнал $A(k)$ в виде кодов значений квантованной амплитуды от отсчетов k .

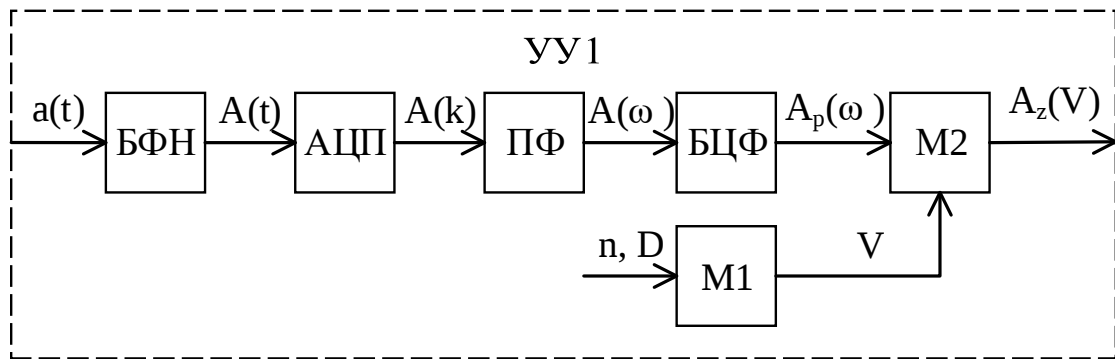


Рисунок 5.4 – Реализация п.2 Алгоритма. Узел «УУ1» функциональной схемы: БФН – блок аналоговой фильтрации и нормализации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПФ – преобразование Фурье; БЦФ – блок цифровой фильтрации; М1 – вычислительный узел №1; М2 – вычислительный узел №2; $A(t)$ – нормализованный временной сигнал ГСВ; $A(k)$ – оцифрованный сигнал ГСВ; $A(\omega)$ – спектр ГСВ; $A_p(\omega)$ – приведенный спектр ГСВ; $A_z(V)$ – зависимость СКЗ ГСВ от скорости резания

Далее заданный в виде табличных данных сигнал переводится в частотную область $A(\omega)$ с помощью преобразования Фурье и подвергается цифровой фильтрации, преобразуясь в приведенный спектр $A_p(\omega)$, лишенный посторонних компонент. Вычислительный узел №2 рекурсивно синтезирует зависимость $A_z(V)$.

Рисунок 5.5 раскрывает функциональное содержание узла УУ2, отвечающего за получение первой и второй производной функции $A_z(V)$ и накопления информации о необходимой уставке.

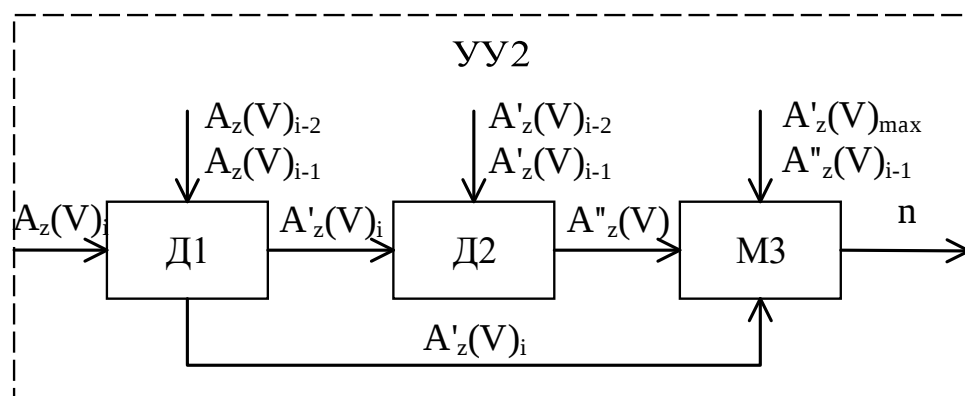


Рисунок 5.5 – Реализация п.3 и п.4 Алгоритма. Узел «УУ2» функциональной схемы; Д1 - первое дифференцирование; Д2 – второе дифференцирование; М3 – узел финальной математической обработки и сравнения

5.3 Реализация алгоритма управления по функциональной схеме

Система управления скоростью резания основана на взаимодействии четырех основных узлов (рисунок 5.6): микроконтроллер (МК), преобразователь частоты (ПЧ), акселерометр, главный привод станка.

Микроконтроллер получает данные с акселерометра, проводит математическую обработку согласно авторскому алгоритму и генерирует уставку скорости резания, воспринимаемую частотным преобразователем. Согласно

полученной уставке ПИД-регулятор частотного преобразователя управляет главным приводом станка с целью достижения требуемой скорости резания. В это время МК проводит следующий цикл получения и обработки данных для актуализации уставки. Таким образом, обратная связь по виброускорению резца вызывает со стороны микроконтроллера управляющее воздействие на привод через преобразователь частоты.

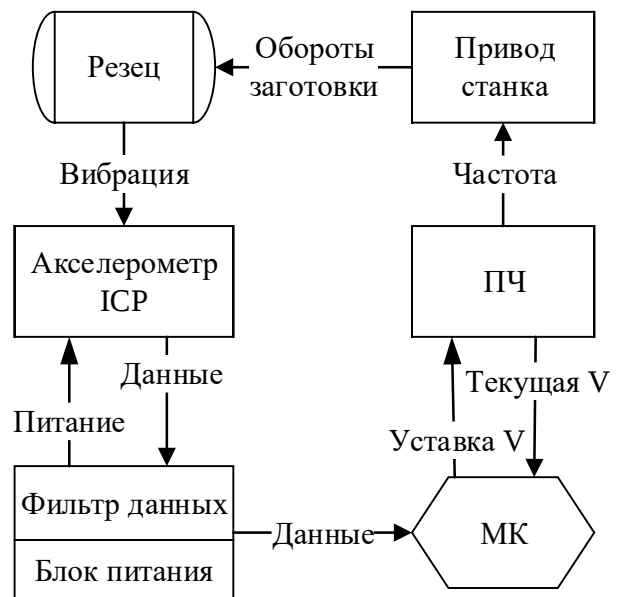


Рисунок 5.6 – Блок-схема системы управления; БП – блок питания,

МК – микроконтроллер,

ПЧ – преобразователь частоты

5.3.1 Аналоговая часть

Акселерометр с ICP выходом преобразует механические колебания резца в переменное напряжение, которым модулируется постоянное напряжения питания акселерометра указанного типа. В итоге, на выходе имеется переменное напряжение с тем же частотным составом, что и вибрация, но с постоянной составляющей, равной питающему напряжению. Отделение полезного сигнала от питающего напряжения осуществляется через разделительный конденсатор, так же выполняющий роль емкостной гальванической развязки между ICP выходом

акселерометра и микроконтроллером, поскольку входные цепи микроконтроллера имеют предельно допустимое напряжение в 3,3 В, а питание акселерометра 24 В.

В качестве аналого-цифрового преобразователя применен периферийный АЦП микроконтроллера. Это целесообразно, поскольку используемый МК STM32F303 адаптирован для работы с обработкой аналоговых сигналов и имеет усиленную в этом направлении периферию, включающую три АЦП с высокой скоростью в 5 MSPS (5 миллионов тактов в секунду), двухканальный ЦАП и операционные усилители (ОУ) с программируемым коэффициентом усиления (PGA). Подача сигнала с ВП на АЦП осуществляется через периферийный ОУ, оснащенный антиалязинговым фильтром и обеспечивающий двукратное усиление по напряжению. Такая схема позволяет ступенчато, без перегрузок и нелинейных искажений, усилить сигнал с ВП, обеспечить защиту от попадания высокого напряжения акселерометра и наложения спектров при последующем Фурье преобразовании.

Фильтрация первичного сигнала разделена на два блока – аппаратный и программный. Первый блок реализован на базе прецизионного ОУ, выполняющего роль приемного каскада по напряжению и полосового фильтра, подавляющего частоты в диапазоне 0 – 10 Гц и выше половины частоты дискретизации используемого АЦП для предотвращения наложения спектров при переходе из временной области в частотную посредством преобразования Фурье.

5.3.2 Цифровая часть

Применение в качестве вычислительного центра микроконтроллера с шириной шины данных в 32 бита, тактовой частотой 72 МГц и встроенным вычислительным ядром FPU для аппаратной поддержки операций с плавающей точкой позволяет осуществить все математические операции по фильтрации и анализу спектра без участия сторонних вычислительных устройств.

Программный блок реализован на базе вычислительной мощности МК с применением CMSYS-DSP инструкций и представляет собой каскад режекторных цифровых фильтров, подавляющих гармоники на собственных частотах технологической системы станка. Это необходимо для отделения спектральных

компонент, вносимых автоколебаниями на собственных резонансных частотах системы, от вынужденных колебаний, возникающих под действием сил резания и трения.

Функциональная схема программы МК для системы автоматического управления приведена на рисунке 5.7.

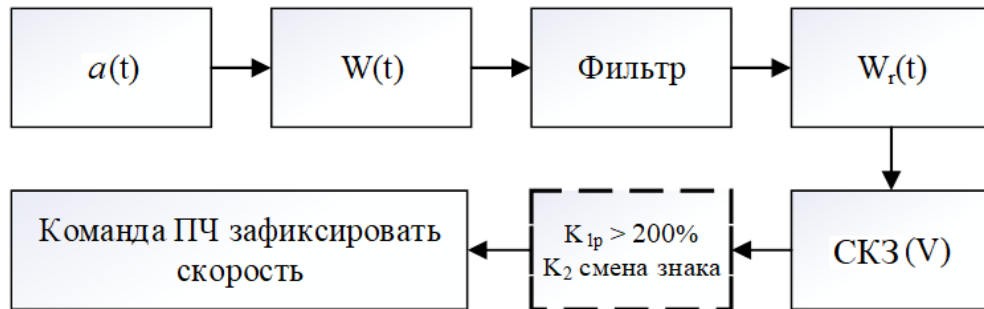


Рисунок 5.7 – Алгоритм обработки данных микроконтроллером:

$a(t)$ – временной сигнал виброускорения; $W(t)$ – спектр сигнала виброускорения; $W_r(t)$ – вынужденная спектральная составляющая, вносимая процессом резания; $СКЗ(V)$ – среднее квадратичное значение $W_r(t)$ при разных скоростях резания; K_{1p} – изменение величины первой производной в процентах; K_2 – вторая производная

Цель выполнения программы – в конце каждого цикла обновлять величину управляющего воздействия на преобразователь частоты, основываясь на совокупности входных данных, часть из которых система динамически обновляет в начале работы. В качестве рабочих констант программа имеет уставки по порогам: K_{1p} – предельное изменение величины первой производной зависимости СКЗ виброускорения от скорости резания в процентах; массив параметров режекторных фильтров для подавления собственных резонансных частот технологической системы станка.

В начале каждого цикла система обновляет массив данных о мгновенных значениях СКЗ виброускорения резца, локализованных во времени с помощью известной частоты дискретизации АЦП и прерываниями от блока прямого доступа к памяти (DMA) микроконтроллера. Таким образом, программа на входе получает дискретно заданную функцию $a(t)$ – временной сигнал виброускорения. Далее для

последующей обработки и наложения цифровых фильтров временной сигнал с помощью Быстрого преобразования Фурье (БПФ) переводится в частотную область $W(t)$ – спектр сигнала виброускорения. При пусконаладочных работах для оснащаемого станка проводится сбор ударных спектров основных его частей, подверженных колебательному движению на звуковых частотах. Это необходимо для исключения из спектра посторонних гармоник, не несущих диагностической информации, и автоколебательных процессов, возникающих на собственных резонансных частотах компонентов системы. В результате имеем $W_r(t)$ – спектральную составляющую спектра $W(t)$, вносимую процессом резания. Для количественной оценки полученного спектра вычисляется его среднее квадратичное значение – СКЗ. Поскольку, первоначальные данные $a(t)$ были получены при некоторой скорости резания V , полученное значение становится точкой на искомой зависимости $СКЗ(V)$.

Анализ зависимости $СКЗ(V)$ является основой метода и выполняется по следующему алгоритму (рисунок 5.7, выделенный блок).

Известно, что скорость изменения функции – это ее первая производная, соответственно, наступление скачкообразного изменения СКЗ вибрации приведет к значительному ($> 200\%$) процентному изменению значения первой производной. Однако, для исключения ошибочных или преждевременных срабатываний необходим второй критерий – наличие перегиба функции, определяемого по изменению знака второй производной. Таким образом, система автоматического управления примет решение о достижении условий максимальной работоспособности по вибрации резца при выполнении двух условий: на текущей итерации цикла опроса процентный прирост скорости изменения СКЗ виброускорения резца составил более 200%, при этом, в окрестности текущей точки, значение второй производной поменяло знак.

В качестве уставки скорости резания для автоматического поддержания берется средняя скорость между скачкообразным изменением значения первой производной и скоростью резания, при которой произошло изменение знака второй производной.

Выполнение описанных ранее операций МК требуются конечные интервалы времени, определяющие быстродействие системы. При указанных на рисунке 5.8 временных интервалах, общее время цикла составит 250 мс.

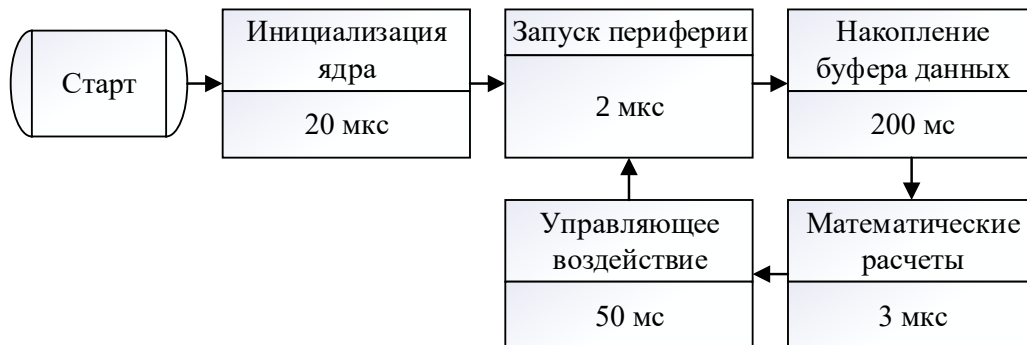


Рисунок 5.8 – Время выполнения основных блоков программы

Временем на запуск периферии и математические расчеты можно пренебречь в сравнении с накоплением буфера $a(t)$ и управляющего воздействия. Время накопления буфера задается оператором при пуске системы – чем больше буфер, тем точнее управляющее воздействие и больше задержка в управлении и наоборот.

Например, при продольном точении прутка диаметром 50 мм из жаропрочной стали со скоростью 60 м/мин управляющее воздействие будет обновляться каждые полтора оборота заготовки, чего более чем достаточно для динамического поддержания скорости резания. Время управляющего воздействия ограничено быстродействием частотного преобразователя, максимально допустимым током и инертностью двигателя (нагрузкой на двигатель). Следует понимать, что набрать скорость под нагрузкой силы резания значительно труднее, чем сбросить, в связи с этим на рисунке 5.8 указано среднее время управляющего воздействия, полученное экспериментальным путем.

Общий вид системы, реализующей показанный ранее метод, представлен на рисунке 5.9.

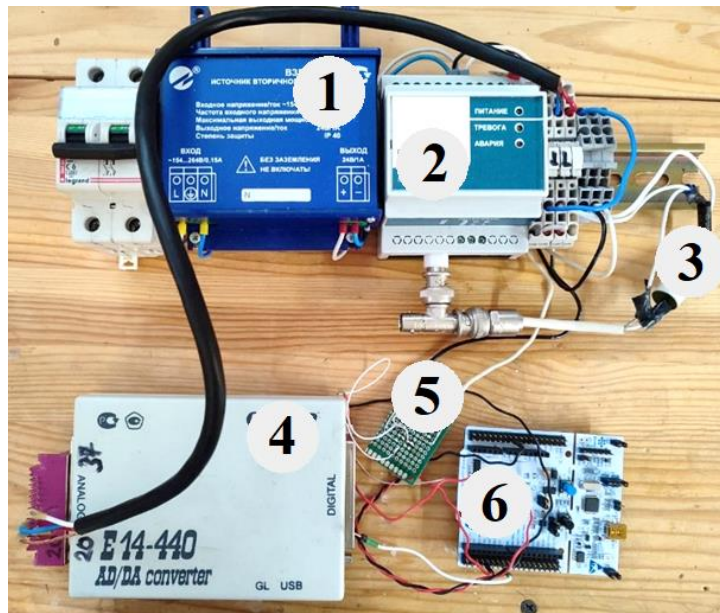


Рисунок 5.9 – Функциональный прототип системы автоматического определения и поддержания скорости резания по вибрации сборного резца при точении:

1 – источник питания; 2 – модуль питания акселерометра и фильтрации первичного сигнала; 3 – емкостная гальваническая развязка, аналоговый фильтр; 4 – внешний аналого-цифровой преобразователь; 5 – согласующий преобразователь; 6 – главное вычислительное/управляющее ядро на базе 32-разрядного микроконтроллера ARM

В состав приведенной на рисунке выше системы включается акселерометр и силовая часть используемого станка, например, частотный преобразователь привода главного движения, управляемый по унифицированному аналоговому сигналу, генерируемого согласующим преобразователем (рисунок 5.9, поз. 5).

5.4 Формирование УМР СРТП сборных резцов в условиях автоматизированного машиностроения

Анализ процесса изготовления, технического контроля и приемки деталей ГТД на механических участках станочных цехов ПАО «Тюменские моторостроители» показал, что к ряду деталей предъявляются повышенные требования в части обеспечения работоспособности СРТП при точении: 25% деталей из числа забракованных получают клеймо по причине преждевременного

выхода из строя инструмента. Кроме крупногабаритных деталей ГТД, для которых необходимость обеспечения максимальной работоспособности СРТП сборных резцов очевидна, существуют детали, в операционных картах которых имеют место особые указания к токарным операциям, например, требование о точении наружной и внутренней поверхностей за один проход без подналадки. В качестве примера такой детали рассмотрим кольцо упругое из стали 10X11H23T3MP (Приложение Б).

Данная деталь является частью лабиринтных уплотнений компрессора высокого давления ГТД и работает в условиях высоких температур при 9000 об/мин. Операционная карта, часть которой приведена в Приложении Б, содержит переход №2 с требованием к обработке за один проход. Точение по наружной поверхности сборным резцом с СРТП T15K6, геометрия указана в перечне оснастки.

Согласно операционной карте (Приложение В), данные переходы осуществляются на токарно-винторезном станке 1К62. Первая деталь из партии всегда предъявляется контроллеру БТК, а также каждая деталь после подналадки или замены инструмента.

Аналогичная задача имеет место при точении детали «Кольцо» в составе камеры сгорания из сплава ХН78Т на токарном станке с ЧПУ Victor VTurn II-26Y. Операционная карта представлена в Приложении Г.

Переход №8 требуется осуществить за один проход. Применяется сборный резец со сменной пластиной ISCAR SNMG 120404/8 (рисунок 5.10) из сплава IC807 или В35

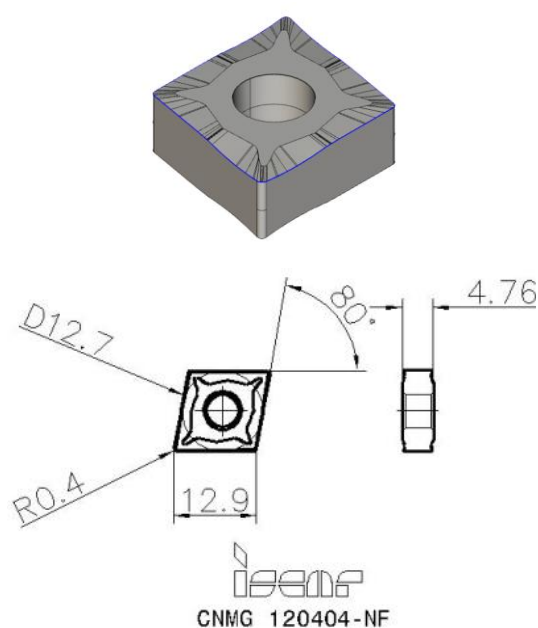


Рисунок 5.10 – Сменная режущая твердосплавная пластина, применяемая на операции №8 при изготовлении детали «Кольцо ДА25» из сплава ХН78Т

(аналог BK8), геометрия резца $\gamma = 7^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\varphi = 75^\circ$. Способ крепления пластины типа М (ISO) прижим сверху и поджим штифтом за отверстие.

При разработке операционной карты и назначении режимов резания технолог опирается на рекомендации производителя СРТП (рисунок 5.11)

Производитель предлагает весьма широкий диапазон скоростей резания 100-180 м/мин, поскольку невозможно предугадать все параметры и нюансы конкретного перехода, в котором будет применена СРТП на производстве. Оптимальная скорость по методу профессора Макарова А. Д. (рисунок 1.4) составит 120 м/мин для исследуемых условий, но его реализация требует значительных временных и ресурсных затрат.

Нержавеющие стали				
М	Ферритная/Мартенситная	08Х13, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 14Х17Н2, 12Х17, 15Х25Т, 40Х9С2Л, 95Х18		
	Теплостойкие и мартенситно стареющие	11Х11Н2В2МФ, Х5Н12К3М7Т, Н18К9М5Т, Н12К9М4Г2, Н10Х11М2Т, Н9Х12Д2ТБ, 30Х9Н8М4Г2С2, 25Н25М4Т(ТРИП или ПНП), 04Х11Н9М2Д2ТЮ (ЭП832), 03Н17К10В10МТ-ВД (ЭП836-ВД), 03Н18К9М5Т-ВД (ЭП637-ВД), ЧС4-ВИ, ЧС5-ВИ		
	Аустенитная	12Х18Н10Т, 17Х18Н9, 06Х18Н11, 10Х14АГ15, 10Х14Г14Н4Т (ЭИ711), 12Х17Г9АН4, (ЭИ878), 20Х13Н4Г9 (ЭИ100), 08Х10Н20Т2, 09Х16Н4Б (ЭП56)		

Р	12	Нержавеющая сталь.	Ферритная/мартенситная	200 НВ	170-265 m/min
Р	13	Нержавеющая сталь.	Мартенситная	240 НВ	140-235 m/min
М	14	Нержавеющая сталь.	Аустенитная	180 НВ	100-180 m/min
К	15	Серый чугун	Перлитный/ферритный	180 НВ	30-140 m/min
К	16	Серый чугун	Перлитного/мартенситный	260 НВ	30-140 m/min

Рисунок 5.11 – Рекомендуемый диапазон скоростей резания при точении стали

14Х17Н2 от производителя СРТП сборных резцов ISCAR (аналог BK8)

Более точные данные (рисунок 5.12), относительно рекомендаций производителя, технолог найдет в справочнике по режимам резания труднообрабатываемых материалов [64]

Марка	$\sigma_{в},$ МПа	Ориентировочная скорость резания при обработке инструментом, м/мин		Коэффициент обрабаты- ваемости по отношению к стали	
		из твердого сплава	из быстро- режущей стали	45	12Х18Н10Т
11Х11Н2ВМФ 1Х12Н2ВМФ	>750	170—200	30—40	0,65	1,3
20Х13 30Х13	1100—1400	80—100	15—20	0,3	0,6
09Х16Н4Б	1700	30—40	—	0,15	0,30
	>1000	130—160	28—38	0,55	1,1
	>1300	70—90	15—20	0,3	0,6
14Х17Н2					
20Х17Н2	>1100	120—150	25—35	0,5	1,0

Рисунок 5.12 – Фрагмент таблицы из справочника по режимам резания труднообрабатываемых материалов Я. Л. Гуревича

Однако назначение скорости резания зачастую производится на основании личного опыта токаря или оператора-наладчика станка с ЧПУ в рамках широкого диапазона, рекомендованного производителем используемых пластин.

На рисунке 5.13 показан результат, полученный по разработанному автором методу для рассматриваемых условий.

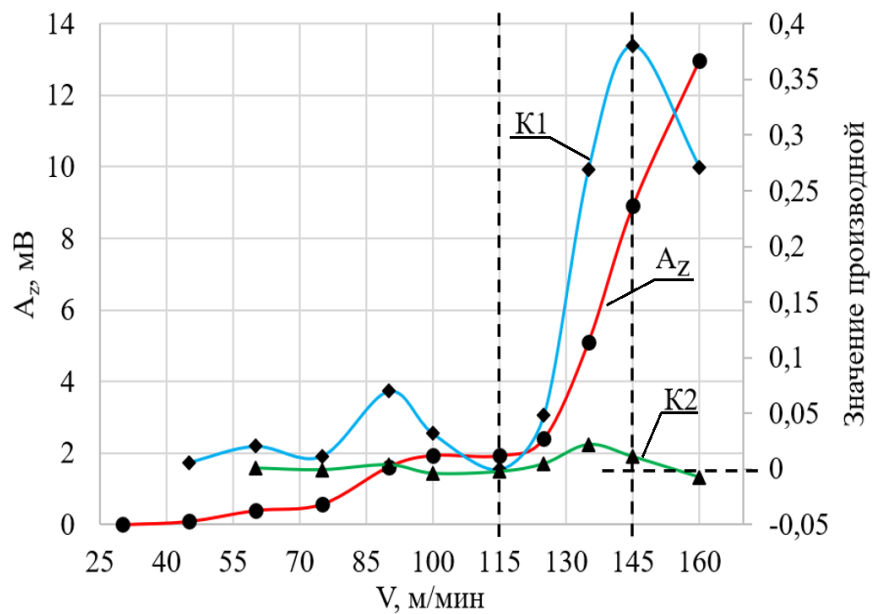


Рисунок 5.13 – Зависимость СКЗ главной составляющей виброускорения A_z резца от скорости резания V при точении стали 14Х17Н2

Результаты метода автора, реализованного в автоматическом режиме, рекомендации изготовителя СТПП, оптимальная скорость по методу А. Д. Макарова и справочные данные приведены в таблице 5.1 для сравнения.

Таблица 5.1 – Сравнение полученных автором результатов с рекомендацией производителя СТПП и классическими методами

Метод	Производитель СТПП (ISCAR)	Справочник Я. Л. Гуревича	Метод А. Д. Макарова	Метод автора
Скорость резания, м/мин	100 – 180	120 – 150	120	115 – 145

Диапазон скоростей резания, определенный по разработанному методу, составил 115 – 145 м/мин, средняя скорость диапазона равна 130 м/мин. Данный результат не противоречит другим источникам и соответствует оптимальной скорости резания, определенной по методу профессора А. Д. Макарова с отклонением не более 7,5 %.

5.5 Выводы по главе

1. Диапазон рекомендуемых скоростей резания, полученный по главной составляющей виброускорения резца, согласуется с результатами, полученными по механическим характеристикам процесса резания: виду стружки, относительному износу резца по задней поверхности, главной составляющей силы резания.

2. Доказано, что главной составляющей виброускорения резца достаточно для определения диапазона скоростей максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин сборных резцов. Применение других методов, в таком случае, не является обязательным.

3. Разработан метод, позволяющий определить диапазон скоростей резания, обеспечивающий условия максимальной обрабатываемости, которые обуславливают максимальную работоспособность сменных режущих твердосплавных пластин, по главной составляющей виброускорения резца.

4. Разработана функциональная схема системы автоматического управления скоростью резания на основе главной составляющей виброускорения резца.

5. Быстродействие разработанной системы автоматического управления достаточно для динамического поддержания скорости резания в процессе точения жаропрочных сталей и сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача по разработке и практической реализации метода формирования условий максимальной работоспособности СРТП 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 среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения резца A_z при разных скоростях резания и диапазоном скоростей резания, обеспечивающим УМР СРТП в процессе точения деталей из сталей 12Х18Н10Т, 14Х17Н2, 10Х11Н23Т3МР и сплавов ХН60ВТ, ХН78Т в зоне высокотемпературного охрупчивания.

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

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

5. Разработан алгоритм математического анализа зависимости СКЗ главной составляющей виброускорения от скорости резания для формирования условий максимальной работоспособности сборных резцов с СРТП 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».

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

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a_z – временной сигнал главной составляющей виброускорения резца

A_z – среднеквадратичное значение приведенного спектра главной составляющей виброускорения резца

P_z – главная составляющая силы резания

АСУ – автоматизированная система управления

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

БПФ – быстрое преобразование Фурье

ВД – вибродатчик

ВП - вибропреобразователь

ГСВ – главная составляющая виброускорения

ДПФ – дискретное преобразование Фурье

МК – микроконтроллер

ОПФ – оконное преобразование Фурье

ПР – процесс резания

ПФ – преобразование Фурье

САУ – система автоматического управления

СКЗ – среднеквадратичное значение

СРТП – сменная режущая твердосплавная пластина

ТСС – технологическая система станка

УМР – условия максимальной работоспособности

ФЧХ – фазо-частотная характеристика

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Акселерометр – пьезоэлектрический вибропреобразователь, преобразующий величину виброускорения колеблющегося объекта в пропорциональный электрический сигнал.

Вибрационные характеристики – временные сигналы, описывающие механические колебания тела в пространстве. К ним относятся: виброперемещение, виброскорость и виброускорение.

Проксиметр – вихретоковый датчик вибрации, преобразующий величину виброперемещения колеблющегося объекта в пропорциональный электрический сигнал.

Спектрограмма – результат Оконного преобразования Фурье в координатах: «частота» по оси ординат, «время» по оси абсцисс, «амплитуда» по оси аппликат (показана цветом).

Главная составляющая виброускорения A_z – сигнал виброускорения, снятый акселерометром, ось чувствительности которого расположена параллельно оси Z при тчении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивное управление станками. Под ред. Балакшина Б.С. // М.: Машиностроение. 1973. 684 с.
2. Адаскин, А.М. Влияние скорости резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов на основе хрома и никеля / А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.А. Верещака, А.С. Верещака, В.В. Каширцев // СТИН. 2014. № 10. С. 23-27.
3. Анцев А. В., Данг Х. Ч. Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на основе контроля вибрации в процессе фрезерования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №7.
4. Анцев А. В., Пасько Н. И., Янов Е. С. [и др.]. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296.
5. Анцев А. В., Янов Е. С., Данг Х. Ч. Зависимость вынужденных колебаний машинной части технологической системы в процессе резания от износа режущего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 6. С. 263–272.
6. Анцев А.В., Пасько Н.И. Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // Вестник ВГТУ. 2019. №4.
7. Анцев А.В., Янов Е.С., Данг Ч.Х. Оптимизация режимов резания с учетом уровня вибрации на основе применения методов искусственного интеллекта // Вестник ВГТУ. 2020. №3.

8. Артамонов Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. 192 с.
9. Артамонов Е. В., Василега Д. С. Анализ возможности применения зависимостей физико-механических характеристик материалов от температуры для определения температуры максимальной обрабатываемости материала // ОНВ. 2008. №4 (73).
10. Артамонов Е. В., Василега Д. С. Определение температуры максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов // ОНВ. 2008. №4 (73).
11. Артамонов Е. В., Василега Д. С. Тверяков А. М. Определение температуры максимальной работоспособности сменных режущих пластин из инструментальных твердых сплавов // ОНВ. 2013. №3 (123).
12. Артамонов Е. В., Василега Д. С., Васильев Д. В., Утешев М. Х. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на основе высокотемпературного охрупчивания при резании: монография / под общей редакцией М. Х. Утешева. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2016. 162 с.
13. Артамонов Е. В., Васильев Д. В. О взаимосвязи работоспособности режущих элементов и вида стружки // ОНВ. 2013. №3 (123).
14. Артамонов Е. В., Васильев Д. В. Тверяков А. М., Штин А. С. Повышение работоспособности токарных резцов со сменными режущими пластинами из твердых сплавов при обработке деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №3.
15. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Воронин В. В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета №4 – 2020. – С. 18 – 28.
16. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Воронин В. В. Определение частоты сегментообразования суставчатой стружки при резании металлов // Материалы

национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации». – 2020. – Т. 3, С. 119 – 122.

17. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Воронин В. В. Экспериментальное определение частоты сегментообразования стали ЭП33ВД // Сборник статей международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева. – 2021. – С. 161 – 164.

18. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Утешев М. Х. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании // СТИН. 2016. № 9. С. 21-24.

19. Артамонов Е. В., Воронин В. В. Исследование гармонического состава вибрации при токарной обработке металлов // Материалы Национальной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации». – 2021. – Т. 2, С. 65 – 68.

20. Артамонов Е. В., Воронин В. В. Метод исследования гармонического состава колебаний силы резания при токарной обработке металлов // Материалы международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева. – 2022. – Т. 2, С. 22 – 25.

21. Артамонов Е. В., Воронин В. В. Оперативная диагностика процесса обработки металла резанием посредством анализа вибрационных параметров // Тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию Уральского федерального университета «Физика. Технологии. Инновации.» – 2020, С. 456 – 458.

22. Артамонов Е. В., Воронин В. В., Помигалова Т. Е. Исследование колебаний главной составляющей силы резания при токарной обработке // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 5–10

23. 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 №2 – 2022. – С. 4 – 12.

24. Артамонов Е. В., Костив В. М., Воронин В. В. Исследование параметров вибрации при токарной обработке нержавеющей стали // Тезисы докладов IX международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора С. П. Распопина. –2022. – С. 461 – 462.

25. Артамонов Е. В., Тверяков А. М. Штин А. С. Выбор инструментального твердого сплава для обработки деталей газотурбинных двигателей // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. №4.

26. 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 №1 – 2023. С. 464 – 470.

27. Артамонов Е. В., Утешев М. Х., Костив Т. Е., Воронин В. В. Формирование условий максимальной работоспособности резцов при точении жаропрочных сталей и сплавов // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении – 2022». – 2022. – С. 174 – 178.

28. Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24 (4). С. 18– 28.

29. 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» № 2 (69) – 2024. – С. 33–39.

30. Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Константинов А.В. и др. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 1993. - 184 с.

31. Беляев Н. М. Соппротивление материалов // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976 г., 608 с.
32. Бердников Л.Н. Влияние температурного перепада на хрупкое разрушение зубьев твердосплавных фрез // Станки и инструмент 1982 - № 5.- С.23-24.
33. Бесекерский В.А. Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования М.: Наука, 1966. 920с.
34. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. - Тбилиси: Сабчота сакартвело, 1973. 304 е.: ил.
35. Бетанели А.И. Хрупкая прочность режущей части инструмента. - Тбилиси: Грузинский политехнический ин-т, 1969. 319 с.
36. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с.
37. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение. 1975. 343с.
38. Бобров В.Ф., Седельников А.И. Особенности образования суставчатой и элементной стружки при высокой скорости резания // Вестник машиностроения. 1976. -№ 7. -С.61-66.
39. Бобров В.Ф., Спиридонов Э.С. Оптимизация режима при точении // Станки и инструмент. 1980. - № 10. - С.22-23.
40. Бородкин Н. Н., Васин Л. А., Васин С. А., Бородкина Н. Н. Исследования структурного критерия устойчивости при формировании высокочастотных автоколебаний при точении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №12.
41. Бородкин Н. Н., Васин Л. А., Васин С. А., Бородкина Н. Н. Исследование автоколебаний на основе "неоднозначности" силы резания при использовании структурированных державок резца // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №12.
42. Васильев С.В, Измерение ЭДС резания // Станки и инструмент. 1983. — № 6. - С.23.

43. Васильев С.В. ЭДС и температура резания // Станки и инструмент. — 1980. - № 10. - С.20-22.
44. Васин Л. А., Васин С. А., Кошелева А. А. Эмерджентный подход к созданию виброустойчивых режущих инструментов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №11-2.
45. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Библиотека инструментальщика. – Москва.: Машиностроение, 2006. – 384 с. ил.
46. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 448 с.
47. Верещака, А.С. Резание материалов: А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высшая школа, 2009. – 535 с.: ил.
48. Вибрации в технике: Справочник. В 66ти т./ Ред. Совет: В. Н. Челомей (пред.) – М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 1981. 456 с
49. Вибродиагностика : монография / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский [и др.] ; Министерство энергетики Российской Федерации, петербургский энергетический институт повышения квалификации. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2003. – 284 с. – Текст : непосредственный.
50. Волков Д. И., Проскуряков С. Л. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // Вестник УГАТУ. 2011. №3 (43).
51. Воронин В.В. Исследование зависимости спектрального состава колебаний резца от типа стружки при точении // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» – 2020. – С. 117 – 119.
52. Воронин В.В. Формирование условий максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин в автоматическом режиме // Материалы международной научно-технической конференции им. Д. И. Менделеева. – 2023. – С. 171 – 174.

53. Воронин В.В. Исследование параметров вибрации при токарной обработке труднообрабатываемых материалов // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону». – 2022. – С. 128 – 130.

54. Воронин В.В. Выбор параметра и датчика для системы управления процессом токарной обработки металлов // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону». – 2021. – С. 199-202.

55. Гаврилин А. Н., Рожков П. С., Ангаткина О. О., Мойзес Б. Б. Динамический виброгаситель с системой автоматической настройки на частоту колебаний // Известия ТПУ. 2011. №2.

56. Гаврюшин С. С., Досько С. И., Утенков В. М. [и др.]. Исследование динамических процессов с использованием анализа форм частотных декомпозиций сигнала на основе метода Прони // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 6 (75). С. 126–136.

57. ГОСТ 24346680 «Вибрация. Термины и определения». Издательство стандартов, 1980. 36 с

58. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы

59. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации

60. Гречишников, В.А. Процессы и операции формообразования и инструментальная техника. учебник / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, С.В. Лукина, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе, В.И. Власов – М.:МГТУ «Станкин», Янус-К, 2006.

61. Григорьев С. Н. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, Ф. С. Сабилов. – Москва : Машиностроение, 2011. – 600 с. – Текст : непосредственный.

62. Грубый С. В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов // Известия вузов. Машиностроение. 2017. №1 (682).
63. Грубый С.В. Расчет сил резания при обработке пластичных материалов в широком диапазоне толщин срезаемого слоя // Известия вузов. Машиностроение. 2018. №2 (695).
64. Гуревич Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986, 240 с., ил.
65. Досько С. И., Утенков В. М., Молчанов А. А. Спектральный анализ в исследовании и диагностике станков // Вестник машиностроения 2021.- № 6. С. 23–27
66. Древаль А. Е., Лужанский М. С. Наростообразование и работоспособность режущего инструмента // Известия вузов. Машиностроение. 2012. №12.
67. Жарков И. Г. Вибрация при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. 184 с.
68. Жмурин В. В., Сальников В. С., Ерзин О. А., Анцев А. В. Влияние средств технологического оснащения на динамические характеристики оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №12-1.
69. Жмурин В. В., Сальников В. С., Ерзин О. А., Анцев А. В. Мониторинг динамических ограничений технологического оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №12-1.
70. Захаревич Е. М., Лапшин В. В., Шавва М. А., Грубый С. В. Экспериментальное определение границ хрупкопластичного перехода при резании хрупких материалов // Известия вузов. Машиностроение. 2016. №7 (676).
71. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956.

72. Зориктуев, В. Ц. Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания / В. Ц. Зориктуев // Вестник УГАТУ. - 2009. - Т.12, №4. - С. 14-19.

73. Зориктуев, В. Ц. Автоматизация технологических процессов и производств / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Загидуллин, А. Г. Лютов, Ю. А. Никитин, А. Г. Схиртладзе. - М.: Машиностроение, 2008. - 428 с.

74. Зориктуев, В. Ц. Идентификация и автоматическое управление технологическими процессами в станочных системах: Учебное пособие / В. Ц. Зориктуев. - Уфа: УГАТУ, 1992. - 118 с.

75. Идрисова Ю. В., Кудояров Р. Г., Фецак С. И. Метод оперативной диагностики технического состояния приводов металлообрабатывающих станков // Вестник УГАТУ. 2012. №4 (49).

76. Идрисова Ю. В., Кудояров Р. Г., Фецак С. И. Моделирование относительных колебаний рабочих органов металлообрабатывающего станка // Вестник УГАТУ. 2013. №8 (61).

77. Иноземцев А. Н., Пасько Н. И., Анцев А. В. Автоматизированное управление режимами резания металлорежущих станков с использованием самообучающихся систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №12.

78. Ишметьев Е. Н., Панов А. Н., Романенко А. В., Васильев Е. Ю., Коробейников С. М. Опыт применения автоматизированных стационарных систем виброконтроля и вибродиагностики // ЭС и К. 2014. №1 (22).

79. Ишметьев Е. Н., Чистяков Д. В., Панов А. Н., Бодров Е. Э., Врабел М. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования // ЭС и К. 2019. №1 (42).

80. Кабалдин Ю.Г. Кузьмишина А.М. Влияние кристаллической решетки на процесс стружкообразования при резании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – №7. – С.72-80.

81. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ инструмента при резании // Вестник машиностроения. 1995. - Вып. №1. — С.26-31.

82. Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М., Просолович А.А. Синергетический анализ причин возмущения вибраций при резании // Вестник машиностроения. — 1997. -№10.-С. 21-29.
83. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М. Машиностроение. 1978. 198 с.
84. Ковалев А. В., Трушин Н. Н., Сальников В. С. Прогнозирование технического состояния технологического оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №11-2.
85. Козочкин М. П. Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29-35.
86. Козочкин М. П., Порватов А. Н., Дуйсенгали А. Система адаптивного управления станочным оборудованием по сигналам вибрации и активной мощности автоматизация и управление в машиностроении // Автоматизация и управление в машиностроении. 2016. №1 (23). С. 17 – 25.
87. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Боган А. Н. [и др.]. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 8 (61). С. 56–62.
88. Колбасников Н. Г., Матвеев М. А. Исследование влияния бора на высокотемпературную пластичность микролегированных сталей // Глобальная энергия. 2016. №1 (238).
89. Королев П. Г., Балашов Е. В. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) Анализ характеристик вибрации инструмента металлорежущего станка Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 7/2015
90. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.:Машиностроение, 1967. - 359 с.
91. Кудинов В.А. Динамическая характеристика резания // Станки и инструмент. 1963. №10.
92. Кушнер В.С. Основы теории стружкообразования. Кн.1. Механика резания: Учеб. пособие. Омск: ОмГТУ, 1996. - 130 с.

93. Кушнер В.С. Основы теории стружкообразования. Кн.2. Теплофизика и термомеханика резания: Учеб. пособие. Омск: ОмГТУ, 1996. - 136 с.
94. Кушнер, В. С. Теория стружкообразования: монография / В. С. Кушнер, О. Ю. Бургонова. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 176 с.
95. Ласуков А. А. Влияние основных факторов процесса резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов // ГИАБ. 2010. №12.
96. Ласуков А. А., Смирнов Ю.В. К вопросу изучения образования элементной стружки // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3, с. 14 – 21.
97. Либерман Л. Я. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. Л: ЦКТИ. 1967. 672 с.
98. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. М., ГНТИМП, 1958. – 356 с.
99. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. / Т. Н. Лоладзе – Москва: Машиностроение, 1982. – 320 с. – Текст: непосредственный.
100. Макаров А. Д. О выборе оптимальных режимов обработки резанием в условиях автоматизированного производства. В кн.: Автоматизация процессов механической обработки и сборки. М., «Наука», 1967, с. 132 – 142.
101. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение. 1976. 278 с.
102. Макаров А. Д., Зориктуев В. Ц. Автоматическое регулирование процессов резания при торцевом и продольном точении. В кн.: резание и инструмент, вып. 7. Изд-во Харьковского университета, 1973, с. 5 – 11.
103. Мальцева Л. А., Гервасьев М. А., Кутьин А. Б. Материаловедение: учебное пособие / Л. А. Мальцева, М. А. Гервасьев, А. Б. Кутьин – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.
104. Маслеников И. А. Зависимость вида стружки от условий процесса резания при обработке пластичных материалов лезвийным инструментом // Металлообработка. 2013. №5, с. 45 – 53.

105. Масленников С. Б. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Metallurgy, 1983. 192 с.
106. Маслов А. Р. Инновационные устройства для мониторинга процессов металлообработки // Инновации. 2015. №8 (202).
107. Пасько Н. И., Анцев А. В. Непараметрическая оптимизация периода профилактической замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №10.
108. Патент № RU 2535839 Российская федерация. Способ определения оптимальной скорости резания / Е. В. Артамонов., Д. В. Васильев. Оpubл. 20.10.2014. Бюл. № 29.
109. Патент № RU 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. Оpubл. 08.11.2023 Бюл. № 31.
110. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977.
111. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. -357с.
112. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, 1974.587 с.
113. Подураев В. Н., Валиков В. И, Чирков В. И. Эффективные процессы резания при нестационарном режиме обработки // Станки и инструмент. 1976, №3, с. 25-28.
114. Подураев В. Н., Горнев В. Ф., Бурмистров В. В. К теории гашения автоколебаний при механической обработке с осциллирующей подачей. // Изв. Вузов. Машиностроение. 1974. - № 11. С. 12 - 14.
115. Полетика М. Ф. Контактные условия как управляющий фактор при элементном стружкообразовании // Сборник научных трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – С. 6-13.

116. Постнов В. В., Хадиуллин С. Х., Шафиков А. А., Федоровцев А. Ю. Исследование влияния интенсивности автоколебаний на формоустойчивость режущей кромки твердосплавного инструмента // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 43–49.

117. Райхельсон В. А. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учетом их физико-механических свойств, М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018, – 508 с.

118. Резников А. Н., Теплофизика процессов механической обработки материалов. Москва: Машиностроение, 1981.

119. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956.-319 с.

120. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания // Отв. Ред. Родин И. Р.; АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов. – Киев : наук. Думка, 1990. – 320 с.

121. Розенберг Г. Ш., Мадорский Е. З. Вибродиагностика : моногр. СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации, 2003. 284 с.

122. Розенберг Ю.А. Резание материалов: Учебник для техн. вузов.- Курган: Изд-во "Полиграфический комбинат" Зауралье: 2007. - 294 с.: ил.

123. Розенберг Ю.А., Тахман С.И., Силы резания и методы их определения Часть I. Общие положения: Учебное пособие. Курган: КМИ, 1995.

124. Сальников В. С., Ерзин О. А., Шадский В. Г. Повышение эффективности управления процессом резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №12-1.

125. Сальников В. С., Жмурин В. В., Анцев А. В. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №10.

126. 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. Оpubл. 01.12.2023

127. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.

128. Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Протопопов С. П. и др. Автоматическое управление технологическими процессами М.: Машиностроение, 1980 -536с.

129. Станюкович А. В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов. М.: Металлургия, 1967. 200 с.

130. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний / С.П. Стрелков. – М.: Нука, 1964. – 437с.

131. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992.

132. Ташлицкий Н. И. Методы приближенного определения скоростей точения жаропрочных сталей и сплавов // Вестник машиностроения. 1959. – № 3. – С. 10 – 12.

133. Ташлицкий Н. И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов. // Вестник машиностроения 1960 №2.

134. Тлусты И. Автоколебания в металлорежущих станках. -М.: Машгиз. 1956.

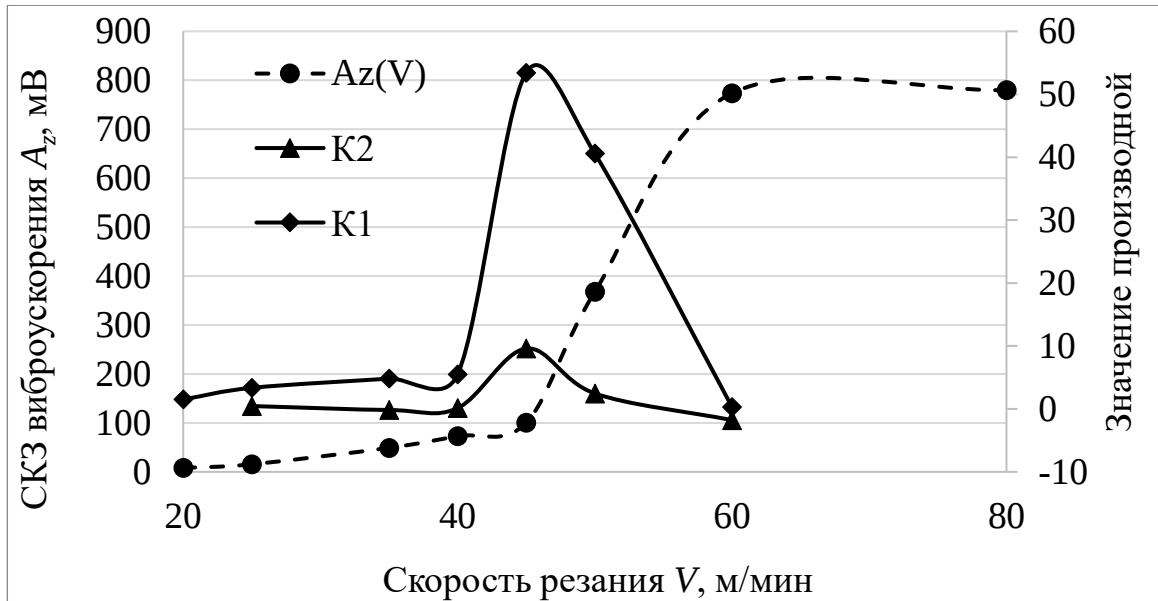
135. Трофимов В. В., Несмеянов Е. А. Регулирование амплитуды колебаний инструмента при обработке на многошпиндельных станках для твердого точения // Вестник ВГТУ. 2011. №3.

136. Трусов В. В. Автоматическое регулирование процесса резания по температуре при обработке точением фасонных поверхностей. Труды Рыбинского авиационного технол. ин-та, №4. – Автоматическое регулирование процесса резания по температуре. Ярославль, изд. Ярославского политехн. ин-та, 1976, с. 28 – 33.

137. Тычинский А. В., Коровин Г. И., Гаврилин А. Н. Определение рациональных режимов торцевого фрезерования на основе снижения ударно-вибрационных воздействий // Вестник ИрГТУ. 2019. №6 (149).
138. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969, 752 с.
139. Хоменко А. П., Елисеев С. В., Засядко А. А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №1.
140. Шадский Г. В., Сальников В. С., Ерзин О. А. Принципы регулирования направления вектора внешнего воздействия при лезвийном разрушении материала в режиме реального времени // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №10.
141. Шустер Л. Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом, - М.: Машиностроение, 1988, 96 с.
142. Эльясберг М. Е. Об устойчивости процесса резания. Известия АН СССР. ОТН, 1958. №9. -с.39-52.
143. Эльясберг М. Е., Биндер М. Г. Повышение устойчивости автоколебательной системы станка при воздействии периодического низкочастотного изменения скорости резания. //Станки и инструмент. 1989. №10,11,- с. 6 – 9.
144. Юркевич В. В. Измерение вертикальной составляющей силы резания при точении // Металлообработка. 2012. №5-6 (71-72).
145. Ямникова О. А. Адаптивная система стабилизации силы резания как способ борьбы с вибрациями // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. № 4.
146. Artamonov E., Vasilyev D. and Voronin V. Rapid diagnostic test of metal turning by cutting using vibration parameters analysis // AIP Conference Proceedings 2313, 060031 (2020); DOI: 10.1063/5.0032239 EID: 2-s2.0-85097999961 ISBN: 15517616 0094243X

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример расчета для определения границ искомого диапазона скоростей резания



Первая производная (приращение по правым разностям (2.10)):

$$K1 \approx \frac{A_{z(i+1)} - A_{z(i)}}{V_{(i+1)} - V_{(i)}}$$

Вычисление производной второго порядка (2.12):

$$K2' \approx \frac{A_{z(i+1)} - 2A_{z(i)} + A_{z(i-1)}}{(V_{(i+1)} - V_{(i)})^2}$$

V, м/мин	Az, мВ	K1	K2
20	7,99198	1,511902	
25	15,551492	3,35025	0,461209
35	49,053991	4,811457	-0,16791
40	73,111278	5,470417	0,131792
45	100,46336	53,43578	9,593072
50	367,64225	40,58261	2,464839
60	773,46831	0,311024	-1,77602
80	779,6888		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Карта эскизов детали «Кольцо упругое» из стали 10X11H23T3MP

Изд.	Цех	Уч.	Опер.
			270

КАРТА ЭСКИЗОВ	514	
	Кольцо упругое	Литера

2.5/ (✓)

А-А
увеличено

									Разраб.		21.06.2023	Лис.
												1
												Л-о
	№	Подпись	Дата		№	Подпись	Дата	Н. контр.				

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



Публичное акционерное общество «Тюменские моторостроители»
(ПАО «ТМ»)

АКТ

УТВЕРЖДАЮ
Главный технолог
ПАО «Тюменские моторостроители»
В. М. Костин
«05» «07» 2023 г.

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Воронина Владислава Вадимовича

Настоящий акт составлен по результатам внедрения результатов научно-технической работы на тему «Формирование условий максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе вибрационных характеристик».

По результатам исследований взаимосвязи главной составляющей силы резания, относительного поверхностного износа по задней поверхности и главной составляющей виброускорения сборных резцов при точении составлен научно-технический отчет. Результаты работы доложены на заседании испытательного цеха №35 ПАО «Тюменские моторостроители» и переданы для внедрения.

Использование указанных результатов позволяет: установить и поддерживать диапазон скоростей резания, обеспечивающий условия максимальной обрабатываемости материалов, обуславливающие максимальную работоспособность сборных резцов со сменными режущими твердосплавными пластинами при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Исполнители: аспирант кафедры «СИ» ФГБОУ ВО «ТИУ» Воронин В. В. и канд. техн. наук, доцент кафедры «СИ» ФГБОУ ВО «ТИУ» Васильев Д. В.

Начальник технологического бюро цеха №35
ПАО «Тюменские моторостроители»

Д. В. Цесаренко

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



БАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Юридический адрес: 625019, г. Тюмень, ул. 2 км Старого
Тобольского тракта, д. 8, стр. 8, офис 201
Фактический адрес: 625014, г. Тюмень, ул. 2 км Старого
Тобольского тракта, д. 8, стр. 8, офис 201
Телефон: (3452) 69-39-30, 69-39-39
e-mail: office@npobazmash.ru
web-сайт: <http://www.npobazmash.ru>

ИНН 7203310064, КПП 720301001,
ОГРН 1147232024147,
Р/с 40702810738290005977,
Филиал «Екатеринбургский» АО «Альфа-Банк»,
К/с 30101810100000000964 в Уральское ГУ Банка России,
БИК 046577964

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

ООО «Базовое машиностроение»

М.С. Белов

« 18 » 2024 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

**о внедрении в производство результатов кандидатской диссертационной работы
Воронина Владислава Вадимовича**

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Воронина В.В. на тему: «Формирование условий максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе вибрационных характеристик» внедрены в производственную деятельность ООО «Базовое машиностроение».

Вид результатов внедрения: Руководящие технические материалы и методика обеспечения условий максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин при точении деталей из труднообрабатываемых материалов. Прототип системы автоматического определения и поддержания диапазона скоростей резания, обеспечивающего условия максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин, по главной составляющей виброускорения сборных резцов при точении.

Область внедрения: точение крупногабаритных деталей газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых материалов.

Эффект от внедрения:

1. Снижение трудозатрат на освоение нового изделия или возобновление производства при смене инструментального твердого сплава или партии обрабатываемого материала.

2. Годовой экономический эффект (ожидаемый): 314,7 тыс. руб. (триста четырнадцать тысяч семьсот рублей)

Начальник отдела технологического развития
ООО «Базовое машиностроение»

 А.А. Ачимов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2806933

**Способ определения скорости резания, обеспечивающей
максимальную работоспособность резца при точении
труднообрабатываемых сталей и сплавов с помощью
сборных резцов со сменными режущими
твердосплавными пластинами**

Патентообладатель: *Воронин Владислав Вадимович (RU)*

Авторы: *Артамонов Евгений Владимирович (RU), Воронин
Владислав Вадимович (RU), Костив Владимир Михайлович
(RU), Васильев Дмитрий Вячеславович (RU), Костив
Татьяна Евгеньевна (RU)*

Заявка № **2023103953**

Приоритет изобретения **21 февраля 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **08 ноября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **21 февраля 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b60c7e3453164baf96183b73b4a07
Владимир Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 01.01.2023 по 01.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11) 2 806 933 (13) C1

(51) МПК
B23B 1/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23B 1/00 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023103953, 21.02.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.02.2023

Дата регистрации:
08.11.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 21.02.2023

(45) Опубликовано: 08.11.2023 Бюл. № 31

Адрес для переписки:
625048, г. Тюмень, ул. Александра Матросова,
1, корп. 2, Воронин Владислав Вадимович

(72) Автор(ы):
Артамонов Евгений Владимирович (RU),
Воронин Владислав Вадимович (RU),
Костив Владимир Михайлович (RU),
Васильев Дмитрий Вячеславович (RU),
Костив Татьяна Евгеньевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Воронин Владислав Вадимович (RU)

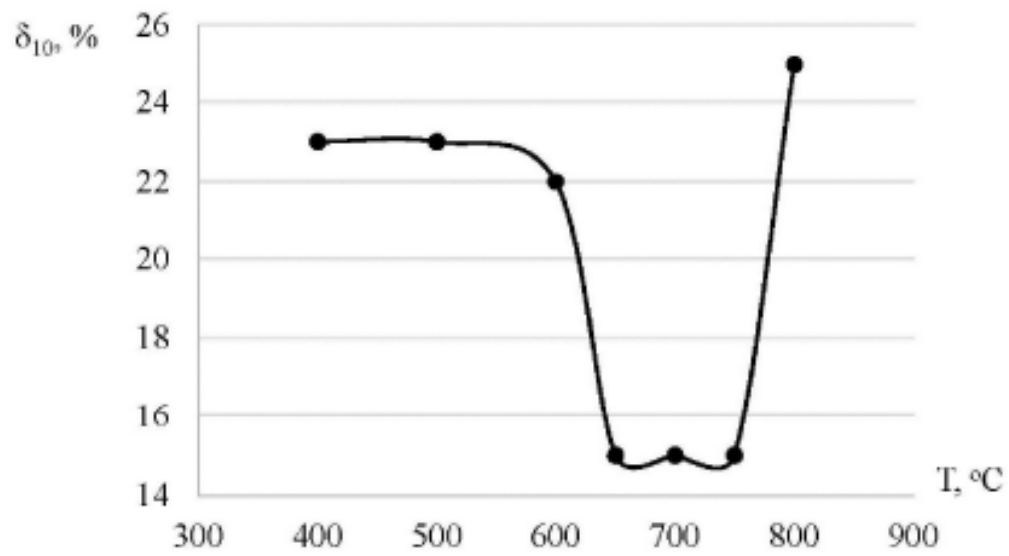
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2535839 C2, 20.12.2014. SU 770661
A1, 15.10.1980. RU 2538750 C2, 10.01.2015. US
6477927 B1, 12.11.2002. US 5170358 A1,
08.12.1992.

(54) Способ определения скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резца при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с помощью сборных резцов со сменными режущими твердосплавными пластинами

(57) Реферат:
Изобретение относится к области обработки металлов резанием. Способ определения скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резца при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с помощью сборных резцов со сменными режущими твердосплавными пластинами, включающий определение скорости резания, при котором происходит изменение вида стружки из сливной в элементную. На державке сборного резца вертикально устанавливают акселерометр. Осуществляется предварительная обработка заготовки при разных скоростях резания V с записью временного сигнала главной составляющей виброускорения Az(t) и вида сходящей при этом стружки. Записывают временной сигнал виброускорения во время точения заготовки с разными скоростями резания.

Скорость резания, обеспечивающая максимальную работоспособность резца, соответствует скачкообразному изменению величины среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения сборного резца и лежит в диапазоне между критической точкой первой производной функции Az(V), после которой следует прирост ее значения более 200%, и точкой перегиба функции Az(V), построенной по результатам предварительной обработки заготовки при разных скоростях резания V с записью временного сигнала главной составляющей виброускорения Az(t) резца при точении. Обеспечивается снижение трудоемкости определения и поддержания скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резцов. 3 ил., 1 пр.

Продолжение приложения Ж



Фиг. 1

R U 2 8 0 6 9 3 3 C 1

R U 2 8 0 6 9 3 3 C 1

RU 2 806 933 C1

1. Область техники, к которой относится объект:

Изобретение относится к области обработки металлов резанием, а именно к способам определения скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резцов, оснащенных твердосплавными пластинами, путем формирования условий максимальной обрабатываемости материала с возможностью реализации автоматического определения и управления режимами резания при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов в различных отраслях машиностроения, а также для оценки качества используемого оборудования.

Изобретение может быть использовано при определении режимов резания для обработки новых материалов или в условиях применения новых инструментов и инструментальных материалов или их износостойких покрытий, а также при введении в производство нового технологического оборудования.

Изобретение может быть использовано при построении автоматической системы управления токарной обработкой труднообрабатываемых сталей и сплавов для установления скорости резания, обуславливающей условия максимальной обрабатываемости материала, что обеспечивает максимальную работоспособность резцов со сменными режущими твердосплавными пластинами.

2. Уровень техники:

Известны способы определения оптимальной скорости резания по графикам зависимостей различных параметров от скорости резания [А.с. СССР №841779, МКИ 3В23В1/00, А.с. СССР №1021519, МКИ 3В23В1/00, А.с. СССР №1155361, МКИ 4В23В1/00, Пат. РФ №2173611, МПК 7 В23В 1/00]. Недостатком известных способов является остановка процесса резания для промежуточных измерений и применение дополнительных контролирующих приборов, приспособлений и методик.

Известен способ определения оптимальной скорости резания для твердосплавного инструмента [А.с. СССР №770661, МКИ 3 В23В 1/00, 15.10.80], согласно которому по результатам кратковременных испытаний стандартных образцов обрабатываемого материала определяют температуру, при которой происходит изменение "температурного коэффициента" твердости обрабатываемого материала, далее находят зависимость температуры резания от скорости резания $\theta=f(V)$. По изменению коэффициента твердости обрабатываемого материала от температуры на графике $\theta=f(V)$ определяется оптимальная скорость резания. Однако, недостаток данного метода заключается в необходимости проведения трудоемких температурных испытаний, которые также снижают конечную точность результата из-за необходимости измерения температуры в процессе резания, что связано с рядом трудностей.

Известен способ определения оптимальной скорости резания при обработке металлов (RU 2538750 C2, МПК В23В 1/00 (2006.01) опубл. 13.10.2021, Бюл. № 29), включающий предварительную обработку заготовки из заданного материала при разных скоростях резания, полученных путем непрерывного торцевого точения от центра заготовки к краю, с измерением параметров, отображающих износ режущего инструмента, и определение по ним значения оптимальной скорости резания. В качестве информативных параметров для определения износа используют амплитудные значения высокочастотной и низкочастотной составляющих вибрации станка, за величину оптимальной скорости резания принимают значение скорости, при которой отношение амплитудных значений высокочастотной составляющей к низкочастотной минимально. Недостатком описанного способа является принятое в итоге значение оптимальной скорости резания, которое значительно больше скоростей, полученных другими методами. За оптимальную скорость принимается та, при превышении которой

RU 2 806 933 C1

начинаются интенсивные колебания системы «резец-заготовка», сопровождаемые ударами в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности, приводящие к резкому росту высокочастотной составляющей спектра. Следовательно, скорость, принимаемая за оптимальную, является ничем иным, как пределом чувствительности рассматриваемого способа и пределом устойчивости технологической системы станка.

Известен способ определения скорости максимальной обрабатываемости резанием при точении сталей и сплавов (RU 2535839 C2 МПК В23В 1/00, В23В 25/06 опубл. 20.12.2014), выбранный в качестве прототипа, заключающийся в предварительной обработке выбранного материала на разных скоростях резания и построении зависимостей $P=f(V)$, $\xi=f(V)$, $\theta=f(V)$, по которым определяется диапазон температуры резания, соответствующий переходу стружки из сливной в элементную, сопровождающийся стабилизацией коэффициента усадки стружки на постоянном значении. Соответствующий диапазон скоростей резания обеспечивает максимальную обрабатываемость материала, что доказывается минимальным относительным износом резца по задней поверхности при этих скоростях.

Недостатком рассмотренного способа является отсутствие рационального способа использования его в автоматических системах для динамического контроля скорости токарной обработки и невозможность реализации без непосредственного участия человека.

3. Сущность изобретения:

Предлагаемое изобретение решает задачу применения данного способа в станках с ЧПУ и модернизированных (оснащенных частотным преобразователем для главного привода) универсальных токарных станках в части автоматического поддержания необходимой скорости резания, которая была определена в результате кратковременных испытаний по экстремальным точкам зависимости главной составляющей виброускорения сборного резца от скорости резания.

Техническим результатом изобретения является снижение трудоемкости определения и поддержания скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резцов, оснащенных твердосплавными пластинами, путем формирования условий максимальной обрабатываемости материала. Возможность использования предлагаемого метода в автоматических системах для токарных станков с ЧПУ или модернизированных универсальных станках.

Поставленная техническая задача решается посредством предварительной обработки заготовки из заданного материала при разных скоростях резания с записью параметров, обеспечивающих определение режимов резания максимальной обрабатываемости материала, обуславливающих условия максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин. Результат предварительной обработки - зависимость среднеквадратичного значения (СКЗ) вынужденной части спектра главной составляющей виброускорения резца A_z от скорости резания V . По экстремальным точкам зависимости $A_z(V)$ определяют диапазон рекомендуемых скоростей резания. Предварительная обработка может быть произведена оператором станка в ручном режиме или автоматически согласно авторскому алгоритму непосредственно перед началом обработки.

4. Перечень фигур графических изображений:

Указанное техническое решение (способ) поясняется чертежами:

на фиг. 1 - изображена зависимость относительного удлинения (δ_{10} , %) образцов из стали 10X11H23T3MP от температуры (T , °C) при испытаниях на растяжение;

RU 2 806 933 C1

на фиг. 2 - зависимость среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения (A_z , мВ) от скорости резания (V , м/мин) и диапазоны скоростей резания, характеризующиеся разным видом стружки;

на фиг. 3 - зависимости температуры в зоне резания (θ , °C), главной составляющей силы резания (P_z , Н), относительного износа по задней поверхности ($h_{отр}$, мкм/ 10^3 см²) от скорости резания (V , м/мин) при точении стали 10X11H23ТЗМР.

5. Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения (полезной модели):

Согласно изобретению, осуществляется предварительная обработка (точение) заготовки из труднообрабатываемого сплава или стали с помощью сборного резца со сменной режущей твердосплавной пластиной при разных скоростях резания V с записью главной составляющей виброускорения $A_z(t)$ резца и вида сходящей при этом стружки. Скорости резания подбираются таким образом, чтобы перекрыть диапазон температур в зоне резания, вызывающих высокотемпературное охрупчивание материала - изменение вида стружки с сугавчатой на элементную. Затем, строится зависимость среднеквадратичного значения (СКЗ) $A_z(t)$ для каждой скорости резания V , по которой определяется диапазон скоростей, соответствующий скачкообразному изменению величины СКЗ виброускорения.

Физическая основа предлагаемого способа описана ниже.

С ростом температуры ряд жаропрочных сплавов имеет склонность к высокотемпературному охрупчиванию, заключающемуся в провале пластичности, выражающемся в значительном уменьшении относительного удлинения перед разрушением при испытаниях на растяжение. Показанное свойство влияет на вид стружки, поскольку при увеличении скорости резания повышается и температура в зоне контакта инструмента и заготовки, материал охрупчивается (фиг. 1), стружка утрачивает пластичность и становится сугавчатой, а затем элементной. Изменение вида стружки отражается в качественном изменении силового воздействия на режущий инструмент, так как для каждого вида стружки характерна различная площадь контакта с передней поверхностью резца, причем, для элементной и сугавчатой прослеживается периодичность в воздействии на резец, в то время как сливная стружка предполагает стабильное, безотрывное нагружение. Переход из сливной, безотрывно скользящей по передней поверхности резца, стружки в сугавчатую, состоящую из слабо связанных между собой частиц, сопровождается качественным изменением спектрального состава колебаний режущего инструмента, а именно, в появлении дополнительных гармоник, изменение вида стружки с сугавчатой в элементную сопровождается количественным изменением спектра, то есть увеличением его среднеквадратичного значения.

Температурно-скоростной фактор вызывает изменения механических характеристик обрабатываемого материала, что отражается в изменении вида стружки и, соответственно, характера вертикальной составляющей P_z , являющейся вынуждающей силой вертикальных осцилляций режущего инструмента.

Пример осуществления способа

На державке сборного резца, вертикально вблизи режущей пластины устанавливаются акселерометр, сигналы с которого после усиления и оцифровки записывают в память компьютера. Запись сигнала виброускорения проводят во время точения заготовки из жаропрочной стали или сплава с разными скоростями резания, заданными для обеспечения температуры резания в диапазоне высокотемпературного охрупчивания по зависимости относительного удлинения от температуры при испытаниях на

RU 2 806 933 C1

растяжение (фиг. 1). После цифровой фильтрации спектра сигнала виброускорения от собственных резонансных частот станка по полученному спектру вычисляют СКЗ записанных временных сигналов виброускорения (фиг. 2). При увеличении скорости резания наступает высокотемпературное охрупчивание обрабатываемого материала, выражающееся в скачкообразном изменении СКЗ виброускорения (фиг. 2).
5 Рекомендуемые скорости резания лежат в диапазоне между критической точкой первой производной функции $A_z(V)$, после которой следует стремительный прирост ее значения (более 200%), и точкой перегиба $A_z(V)$.

10 Диапазон рекомендуемых скоростей резания, полученный по главной составляющей виброускорения резца, согласуется с результатами по механическим характеристикам (вид стружки), относительному износу по задней поверхности, главной составляющей силы резания (фиг. 3). Это доказывает, что главной составляющей виброускорения резца достаточно для определения диапазона скоростей максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин сборных инструментов.
15 Применение других методов, в таком случае, не является обязательным. Таким образом, достигается уменьшение трудоемкости процесса, поскольку нет необходимости проводить дополнительные испытания, а сбор данных о вибрации резца не требует внесения изменений в конструкцию станка.

20 Описанный метод в полной мере поддается алгоритмизации с реализацией в системе автоматического определения рекомендуемого диапазона скоростей резания по признакам скачкообразного роста значения первой производной и изменению знака второй производной функции СКЗ виброускорения от скорости резания. Имея результаты кратковременных испытаний образца, можно настроить автоматическую систему на динамическое поддержание необходимой скорости резания по результатам
25 контроля среднеквадратичного значения вертикальной составляющей виброускорения резца в определенном диапазоне скоростей резания при точении на станках с ЧПУ или модернизированных универсальных токарных станках. Использование вибрации резца в качестве диагностического параметра снижает трудоемкость определения рекомендуемой скорости резания за счет автоматизации процесса.

30 В данном примере диапазон рекомендуемых скоростей резания, определённый по вибрации резца, составляет 40 - 50 м/мин (фиг. 2). Минимальный относительный износ по задней поверхности резца наблюдается на скоростях резания 35 - 50 м/мин (фиг. 3). Как и предполагалось, в окрестности данных скоростей происходит изменение вида стружки со сливной в суставчатую, то есть материал охрупчивается. Минимальное
35 значение относительного удлинения от температуры (фиг. 1) наблюдается в диапазоне 650 - 750 °С, что при точении соответствует скорости резания 30 - 50 м/мин. Пересечение указанных диапазонов дает интервал скоростей 40 - 50 м/мин, который обеспечивает условия максимальной обрабатываемости, обуславливающие максимальную работоспособность сборных резцов со сменными режущими твердосплавными
40 пластинами.

6. Промышленная применимость

Таким образом, предлагаемое изобретение позволяет уменьшить трудозатраты инженеров-технологов и операторов-наладчиков станков с ЧПУ на определение
45 рекомендуемых скоростей резания при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов.

Упростить внедрение в производство новых материалов с неотработанными режимами резания за счет ускорения определения диапазона скоростей максимальной работоспособности с применением автоматических систем.

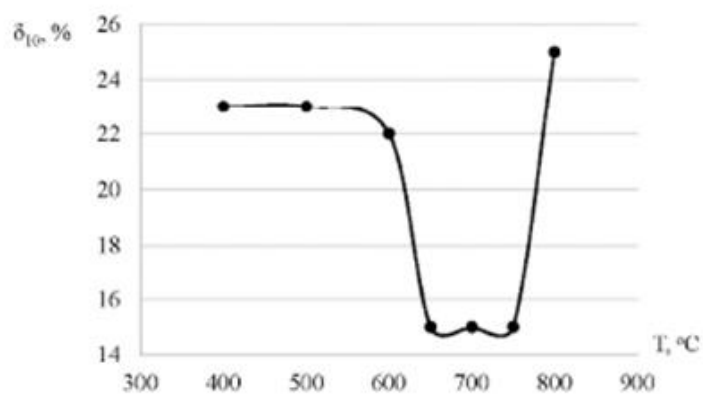
RU 2 806 933 C1

Уменьшить затраты на расходные материалы: рациональное использование сменных режущих твёрдосплавных пластин сборных резцов, экономия дорогостоящих труднообрабатываемых материалов в связи с исключением необходимости проведения стойкостных испытаний, перевода дорогостоящего металла в стружку, снижение процента брака изготавливаемых деталей.

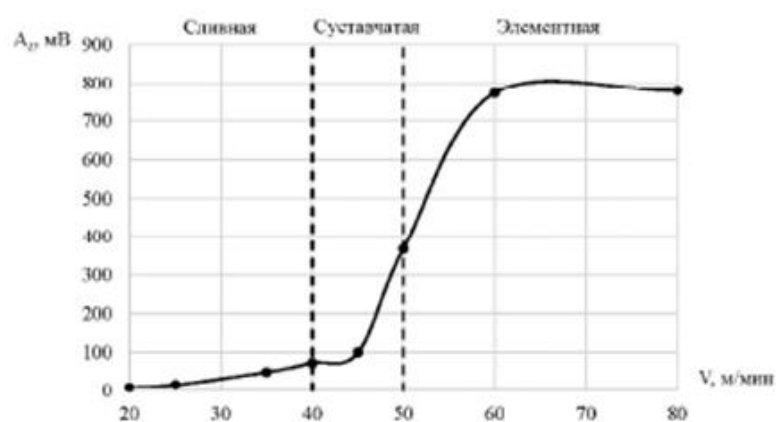
(57) Формула изобретения

Способ определения скорости резания, обеспечивающей максимальную работоспособность резца при точении труднообрабатываемых сталей и сплавов с помощью сборных резцов со сменными режущими твёрдосплавными пластинами, включающий определение скорости резания, при котором происходит изменение вида стружки из сливной в элементную, отличающийся тем, что на державке сборного резца вертикально устанавливают акселерометр, осуществляют предварительную обработку заготовки при разных скоростях резания V с записью временного сигнала главной составляющей виброускорения $A_z(t)$ и вида сходящей при этом стружки, записывают временной сигнал виброускорения во время точения заготовки с разными скоростями резания, при этом скорость резания, обеспечивающая максимальную работоспособность резца, соответствует скачкообразному изменению величины среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения сборного резца и лежит в диапазоне между критической точкой первой производной функции $A_z(V)$, после которой следует прирост ее значения более 200%, и точкой перегиба функции $A_z(V)$, построенной по результатам предварительной обработки заготовки при разных скоростях резания V с записью временного сигнала главной составляющей виброускорения $A_z(t)$ резца при точении.

Продолжение приложения Ж

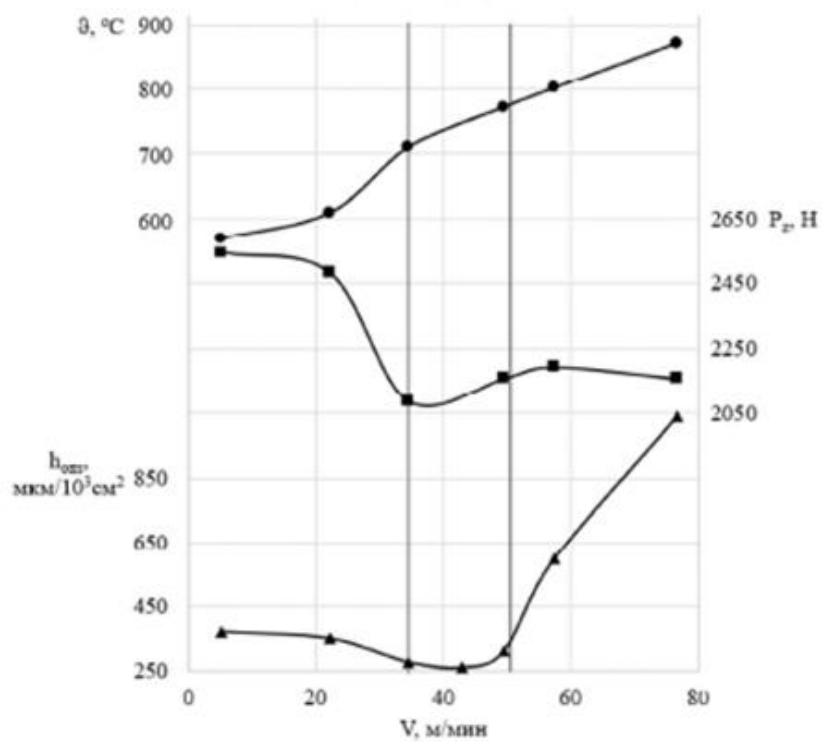


Фиг. 1



Фиг. 2

RU 2 806 933 C1



Фиг. 3

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023685988

**Программа для автоматического определения и
поддержания скорости резания при точении
труднообрабатываемых сплавов**

Правообладатель: **Воронин Владислав Вадимович (RU)**

Автор(ы): **Воронин Владислав Вадимович (RU)**

Заявка № **2023682380**

Дата поступления **24 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 декабря 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 4296400F835671640aF96183b73b4a07
Владимир **Зубов** Юрий Сергеевич
Действителен с 20.01.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Таблица аналогов отечественных твердых сплавов

ОАО «КЗТС», г.Кировоград

Новые марки твердых сплавов

Марка сплава	Подгруппа применения по ИСО		Сплавы-аналоги, выпускаемые ранее ОАО «КЗТС»
	Основная	Дополнительная	
A10	M10	K10	BK6OM
B20	K20	K30	MC321
B25	K20	-	BK6
B35	K30	M30-M40	BK8
H05	P01	-	T30K4
H10	P10	P20	T15K6
H20	P20	P25	T14K8
H30	P30	-	T5K10
T20	M20	M10	MC221
T25	P25	P20	MC137
T30	P30	P25	TC125
T35	P30	P35	TC1
T40	P40	M30	MC146
T50	P50	-	TT7K12

Термины и определения общих понятий.»

ГОСТ 25751—83 С. 11

Термин	Определение
5. НАДЕЖНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ	
5.1. Работоспособное состояние режущего инструмента (лезвия) Работоспособность	Состояние режущего инструмента (лезвия), при котором выполняется обработка резанием при установленных условиях с установленными требованиями Примечания: 1 Состояние режущего инструмента характеризуют совокупностью значение его параметров (например, значениями заднего и переднего углов, износа по задней поверхности лезвия и др.) в данный момент 2 К условиям обработки относят, например, обрабатываемый материал, технологическое оборудование, режим резания, порядок технического обслуживания, восстановления и ремонта 3 К требованиям обработки относят, например, допуски размеров, формы и расположения обработанных поверхностей, параметры шероховатости, производительность обработки резанием, удельные приведенные затраты на обработку и др.
5.2. Неработоспособное состояние режущего инструмента (лезвия) Неработоспособность	Состояние режущего инструмента (лезвия), при котором нарушается хотя бы одно из установленных требований при установленных условиях обработки