

*На правах рукописи*

УДК 621.91.01

**ГУСЕВ АНТОН ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА  
СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Новоуральск – 2019

Работа выполнена в Новоуральском технологическом институте – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Новоуральск).

**Научный руководитель:**

**Закураев Виктор Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технологии машиностроения  
Новоуральский технологический институт  
НИЯУ МИФИ

**Официальные оппоненты:**

**Козочкин Михаил Павлович,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
высокоэффективных технологии обработки  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет «СТАНКИН»

**Ничков Андрей Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент  
ООО Вебер Комеханикс (Weber Comechanics),  
главный инженер направления зубообработки

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образова-  
тельное учреждение высшего образования «Омский  
государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «ОмГТУ»)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ час. на за-  
седании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном  
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я  
Бауманская, д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по  
адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5, стр. 1 и на сайте  
<http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.06,  
доктор технических наук, доцент



В.П. Михайлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Эффективность работы современных металлообрабатывающих систем во многом определяется режимами резания. Выбор эффективного режима особенно актуален на начальной стадии запуска изделий в производство (период освоения). Обычно «стартовый» вариант режима резания устанавливается по справочнику или рекомендациям фирм-производителей инструмента. При этом невозможно учесть многие факторы, имеющиеся в реальном производстве. Поэтому, чаще всего режимы устанавливаются экспериментально при отладке процесса. В таких условиях появилась насущная необходимость создания метода определения режимов резания на основе получения необходимой информации непосредственно из зоны резания от работающего станка. Создание такого метода на базе вычислительной техники должно обеспечить снижение трудоемкости механической обработки. При дальнейшем развитии данного метода создаются предпосылки к автоматическому определению эффективных режимов механической обработки на современном станочном оборудовании. Поставленная задача соответствует приоритетной группе направлений Национальной технологической инициативы – развитие и совершенствование искусственного интеллекта и систем управления (Постановление Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2016 г. №317 «О реализации Национальной технологической инициативы»).

Разработка основ создания автоматизированных методов определения режимов резания, непосредственно на работающих станках, ведется продолжительное время. Возможности создания таких методов существенно повышаются в связи с ростом уровня вычислительной техники, созданием новых сенсорных устройств на основе микропроцессорной техники, а также с появлением новых результатов в области изучения физических явлений при механической обработке. Разработка методов контроля режимов резания базируется на комплексе физических явлений, высокоскоростной деформации и разрушения материалов. Из области изучения физических явлений процесса лезвийной обработки, связанной с автоматизированным определением режимов резания, необходимо отметить работы Г. И. Грановского, Т.Н. Лоладзе, А. Д. Макарова, В. И. Зориктуева, С. С. Силина, В. Ф. Безъязычного, А. Н. Резникова, М. М. Тверского, В. Л. Заковоротного, В. С. Кушнера, А. Е. Древяля, С. В. Грубого, Ю. Г. Кабалдина, В. К. Старкова, А. Л. Плотникова, В. В. Постнова и других.

Методы контроля процесса резания на основе измерения колебаний элементов динамической системы станка разрабатывались учеными: А. Н. Кашириным, В. Н. Подураев, В. А. Кудиновым, С. Н. Григорьев, Л. С. Мурашкиным, М. П. Козочкиным, И. Г. Жарковым, Л. А. Васиным, А. П. Соколовским и др.

В базе данных Роспатента имеются описания изобретений, направленных на определение эффективных режимов обработки, стабилизации процесса резания, оценку вибрационной активности в технологической системе.

Анализ научных трудов по проблеме контроля процесса резания и определения эффективных режимов, которую предполагается решать в данной диссертации

онной работе, дает основание полагать, что проблема находится в стадии поиска более совершенных решений.

**Целью диссертационной работы** является создание автоматизированного метода и средств контроля эффективных режимов токарной обработки на основе установления связи вибросигналов с деформационными характеристиками процесса стружкообразования.

**Основные задачи исследования:**

1. Обоснование возможности определения эффективных режимов токарной обработки путем установления значений деформационных характеристик процесса стружкообразования, особенностей их изменения и связи с параметрами износа режущих лезвий.

2. Выявление информативных параметров стружкообразования, а также корреляционных связей деформационных характеристик процесса с колебаниями, генерируемыми в технологической системе.

3. Выполнение экспериментальных исследований, обработка их результатов для определения параметров физической модели процесса контроля и создания методики идентификации процесса стружкообразования.

4. Практическая реализация предлагаемого метода контроля процесса точения для повышения его эффективности в условиях автоматизированной обработки.

**Научная новизна работы:**

1. Установлено, что циклические изменения деформационных характеристик процесса стружкообразования порождают изменение амплитудных, частотных и спектральных характеристик вибросигналов в зоне резания.

2. Выявлена устойчивая корреляционная связь между размерами фрагментов стружки –  $\Delta x$ , временем (частотой –  $f_c$ ) их образования, амплитудно – частотными и спектральными характеристиками виброускорения на каждом режиме резания.

3. Впервые установлено, что наибольшие амплитудные значения виброускорений в спектре соответствуют диапазону частот сдвиговых деформаций локальных фрагментов стружки на каждом заданном режиме резания, что позволяет косвенно идентифицировать частоту стружкообразования.

4. Установлено, что при режимах резания при точении, считающихся эффективными, отношение толщины сдвигающихся фрагментов ( $\Delta x$ ) к толщине срезаемого слоя ( $a$ ) стремится к 1.

5. Разработана методика процесса идентификации деформационных параметров стружкообразования посредством определения спектральных (информационных) характеристик вибросигналов, генерируемых в зоне резания.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработан способ выбора оптимальных режимов резания (Патент РФ №2514251)

2. Предложен и реализован алгоритм, на основе которого разработана программа работы и управления процессом резания, представленная в виде виртуального прибора – пульта оператора.

3. Разработан программный продукт для сбора и обработки информации с вибропреобразователя, а также человеко – машинный интерфейс для оценки оператором эффективных режимов токарной обработки.

**Достоверность результатов исследований и разработок** обеспечивается использованием современного технологического виброизмерительного оборудования, известных и широко используемых компьютерных программ, статистической обработкой результатов измерений и соответствием требованиям ГОСТ при проведении экспериментальных испытаний.

**Личный вклад** автора состоит в постановке задач диссертации, разработке способа и средств определения эффективных режимов токарной обработки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке их результатов, формулировке выводов и положений, подготовке публикаций по данной теме.

**Реализация работы.** Предложенный метод контроля режимов резания прошел опробования при внедрении технологического процесса механической обработки валов прокатных станков на ПАО «Уралмашзавод». Результаты диссертационной работы Гусева А. В., использовались для реализации договора № 16/5981-Д от 06.12.2017г. на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме: «Экспериментальные исследования системы эффективных режимов резания токарной обработки», в условиях ООО «НПО «ЦЕНТРОТЕХ».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались, на выездной научной сессии НИЯУ МИФИ (г. Снежинск, 2011-2012 г.г.), на всероссийской молодёжной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (г. Юрга, 2011 г.), на XXIII международной конференции молодых ученых и студентов «МИКМУС - 2011» (Москва, 2011 г.), на XV международной телекоммуникационной конференции «Молодёжь и наука», (Москва, 2012 г.), на VII международной научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли», (г. Новоуральск, 2012 г.), на II Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерение, контроль и диагностика – 2012» (г. Ижевск, 2012 г.), на III международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (г. Томск, 2012 г.), на Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (г. Ижевск, 2013 г.), на XIII международной конференции компании National Instruments «Инженерные и научные приложения на базе технологий NI» NI days – 2014 (г. Москва, 2014 г.), на IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения-2015) «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (г. Тольятти, 2015г.).

**Публикации по теме диссертации.** По основным материалам диссертационной работы опубликовано всего 18 научных статей, 3 из них в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент на способ выбора оптимальных режимов резания (Патент РФ №2514251).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 167 наименований, 9 приложений на 54 с. Основной текст диссертации изложен на 217 страницах машинописного текста, в том числе, имеется 66 рисунков и 64 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, ее цель и задачи, приведены основные результаты работы.

**В первой главе** рассмотрены и проанализированы работы, посвященные современному состоянию вопросов по автоматизированному выбору эффективных режимов токарной обработки, колебаний и вибрационных явлений при резании металлов. Также рассмотрена эволюция моделей процесса стружкообразования.

На основе исследований отечественных и зарубежных ученых, в главе дан обзор решений проблем, связанных с контролем и диагностикой процесса обработки, а также методов и математических моделей, направленных на определение и поддержание эффективных режимов резания металлов.

Выделены проблемы определения эффективных режимов резания с учетом требований снижения затрат, обеспечения высокой производительности, качества процесса формообразования и его надежности. Наиболее перспективным направлением в решении данной проблемы является разработка и создание диагностических методов определения эффективных режимов обработки.

В результате были определены цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе основное внимание уделено** разработке методики исследования и построения физической модели идентификации процесса стружкообразования.

Анализ результатов исследований, выполненный авторами (гл.1) указывает на термомеханическую природу процесса стружкообразования. Это дает основание к рассмотрению гипотезы о существовании определенных физических условий в зоне стружкообразования, формирующихся при установленных, опытным путем, эффективных режимах резания. Указанные условия определяются соотношением термодеформационных характеристик стружкообразования: степени и скорости деформации; относительного сдвига; контактных напряжений на передней поверхности лезвия и напряжений в условной плоскости сдвига; температуры на передней поверхности лезвия и в зоне сдвига.

Изучение текстуры стружек, различных материалов, свидетельствует о формировании локальных объемов материала, обладающих повторяющимися формами их фрагментов, и размерными характеристиками. Во всех случаях размеры фрагментов изменяются при изменении скорости резания либо рабочей подачи. Указанные внешние геометрические характеристики фрагментов текстуры образовавшейся стружки позволяют сформулировать рабочую гипотезу о возможности описания процесса стружкообразования непрерывным спектром формирующихся элементов стружки на постоянном режиме резания. Указанный спектр размерных характеристик фрагментов одновременно будет являться энергетическим спектром процесса.

Также во второй главе исследованы физические условия возникновения циклических деформаций при стружкообразовании. Для исследования процесса стружкообразования принята известная модель стружкообразования с параллельными границами, Рис.1. Особенностью данной модели является образование дискретных элементов стружек толщиной  $\Delta x$ , соответствующих периодам сдвиговых деформаций.

На Рис. 2 показаны фотографии стружек, полученных на электронном микроскопе при различной степени увеличения.

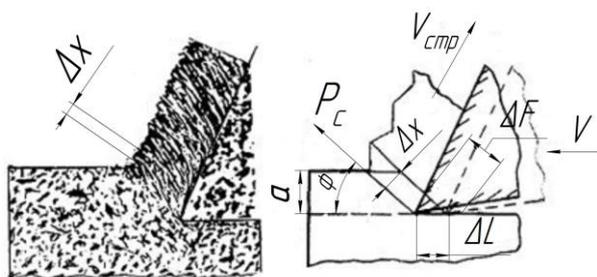


Рис. 1. Корень стружки и геометрическая модель стружкообразования при резании пластичных материалов;  $\Delta x$  – толщина фрагмента стружки;  $V$  – скорость резания,  $\Delta L$  – расстояние, пройденное лезвием инструмента,  $V_{стр}$  – скорость схода стружки,  $P_c$  – сила сдвига,  $a$  – толщина срезаемого слоя,  $\Phi$  – угол наклона условной плоскости сдвига,  $\Delta F$  – абсолютный сдвиг

На фотографиях поверхностей стружек, противоположных прирезцовой стороне, отчетливо наблюдается характер сдвиговых деформаций в виде чередующихся выступов и впадин. Был отмечен различный шаг пилообразных выступов при изменении скорости резания и подачи.

На крупных пилообразных выступах просматриваются выступы с более мелким шагом. Величина шага мелких выступов практически остается постоянной при изменении скорости резания или подачи. Основной причиной (источником) колебаний в системе резания, в соответствии с предлагаемой моделью стружкообразования, являются деформационные процессы, протекающие в каждом цикле (упрочнение – разупрочнение – сдвиг) и формирующие локальные объемы материала стружки величиной  $\Delta x$ . В указанном цикле изменяется величина мгновенных сил, вследствие колебаний (неоднородности) напряжений сжатия и последующего сдвига.

Время (частота) протекания цикла зависит от физико – механических свойств материалов и режимов резания.

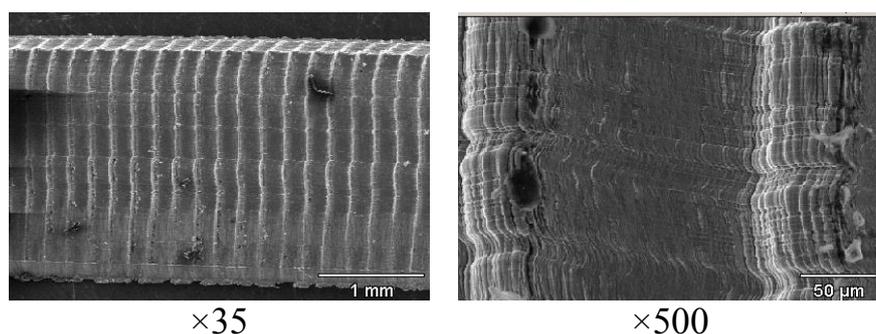


Рис.2. Фотографии стружек, полученных на электронном микроскопе при различной степени увеличения

В этом случае следует полагать, что спектр колебательного процесса (спектр воздействия) будет определяться величиной фрагментов  $\Delta x$ , участвующих в сдвиговых деформациях.

Указанные явления являются случайными, как и формирующиеся случайные фрагменты стружки, величиной  $\Delta x$ , Рис. 3. Поэтому величина, направление и продолжительность действия импульсов сил, являющиеся результа-

тами сдвиговых деформаций. Указанные явления являются случайными, как и формирующиеся случайные фрагменты стружки, величиной  $\Delta x$ , Рис. 3. Поэтому величина, направление и продолжительность действия импульсов сил, являющиеся результа-

том взаимодействия инструмента со стружкой, будут событиями случайными. Процесс стружкообразования на одном режиме резания рассматривается как одна конкретная реализация случайной функции, не зависящей от начала отсчета времени. Для таких стационарных случайных процессов основными характеристиками являются

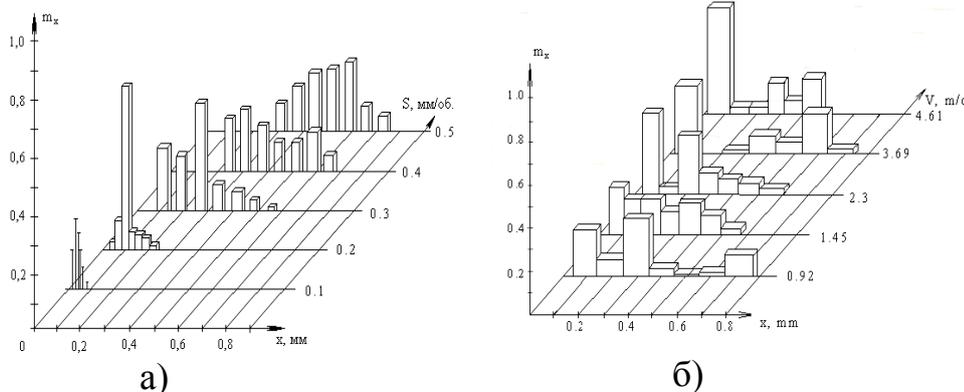


Рис.3. Распределение величины  $\Delta x$  от изменения рабочей подачи (а), и скорости резания (б)

является энергетическим спектром, пропорциональным квадратам амплитуд мгновенных сил резания, пропорциональных величинам сдвиговых деформаций ( $\Delta x$ ):

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cdot X(t + \tau) dt, \quad (1)$$

где  $T$  – период записи реализации, с;

$X(t)$  – случайный процесс;

$t$  – момент времени, с;

$\tau$  – сдвиг времени, с.

Корреляционную функцию для каждой скорости резания и подачи определяют по результатам измерения стружек. Кроме этого, для оценки процесса в частотной области, принимается другая характеристика – спектральная плотность ( $G_x$ ), которая является отображением Фурье корреляционной функции:

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cdot \cos 2\pi f \cdot \tau \cdot d\tau, \quad 0 \leq f < \infty \quad (2)$$

где  $f$  – частота сдвиговых деформаций;

$R_x$  – значение корреляционной функции.

Неустойчивость динамической системы резания (ДС), интенсивность колебательного процесса ДС зависит как от воздействия (процесса стружкообразования), так и от свойств самой динамической системы резания. Реакцию ДС на возмущение в зоне стружкообразования оценивают передаточной функцией или частотной характеристикой  $H(f)$ :

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-2\pi j f \tau} \cdot d\tau \quad (3)$$

где  $h(\tau)$  – весовая функция.

корреляционная функция и спектральная плотность (энергетический спектр).

Для оценки процесса сдвиговых деформаций используется спектр корреляционной функции ( $R_x$ ) стационарного случайного процесса, который

Упругая динамическая система – станок, инструмент – заготовка с некоторым допущением рассматривается как линейная система с одним входом и постоянными параметрами (для данного режима резания), Рис.4. На вход этой системы подается случайный сигнал  $X(t)$ , зависящий от динамики образования величины  $\Delta x$ . Система обладает частотной характеристикой  $H(f)$ . На выходе системы получают реализацию случайного процесса  $Y(t)$ . Проведенные исследования показали, что характеристики стружек можно оценивать через выходные параметры сигналов вибропреобразователя.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса стружкообразования при токарной обработке. Экспериментальная установка показана на Рис. 5. Опыты проводились на токарно – винторезном станке 16К20. На резце 5 закреплялся вибропреобразователь АР2019. Запись виброколебаний процесса резания осуществлялась промышленным компьютером NI PXI-1042.

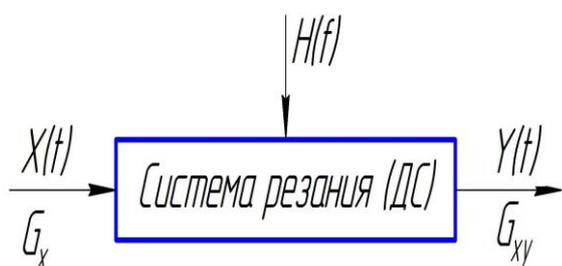


Рис.4. Линейная система с одним входом

Полученные данные переносились на ПК для дальнейшей обработки.

Осуществлялась токарная обработка заготовок в широком диапазоне режимов: при изменении скорости резания  $V=0.47...5.9$  м/с и при подачах  $S=0.075..0,6$  мм/об. Основные эксперименты были выполнены для материалов заготовки - сталь 40ХН, ст. 45, 08Х18Н10Т, глубина резания  $t=1,5$  мм, инструмент: резец с механическим креплением СМП марки Т15К6,  $\phi = 45^0$ , режущее лезвие с укороченной передней поверхностью.

Для подтверждения цикличности процесса стружкообразования были определены значения пластически деформированной зоны -  $\Delta x$  и толщины срезаемого слоя –  $a_c$  (размеры берутся в сечении, нормальном к главной режущей кромке).

Графики изменения значений  $\Delta x$  для различных материалов от изменения режимов резания представлены на Рис. 6 а,б.

На Рис. 7 а,б представлены графики изменения отношения  $\Delta x/a$  от изменения режимов резания. Установлено, что при скоростях резания (подачах), считающихся эффективными, относительные величины

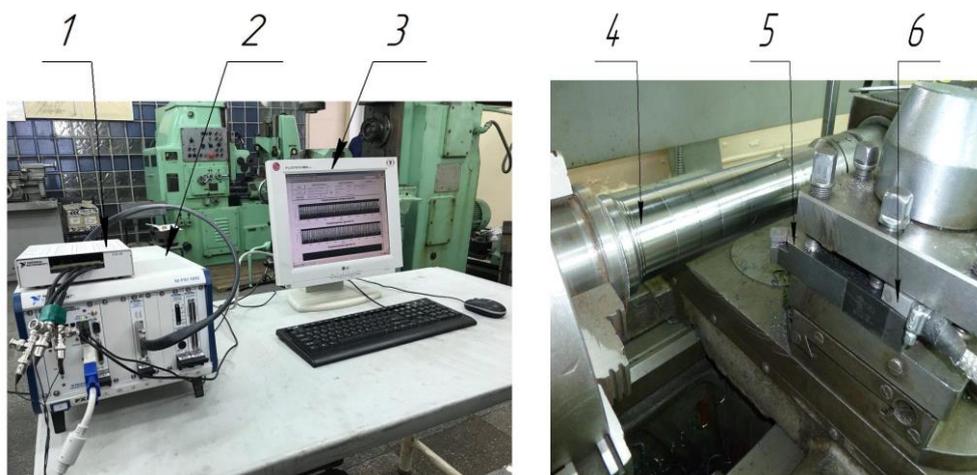


Рис.5. Экспериментальная установка для изучения вибрационных характеристик процесса резания: 1-Коммутационный блок SCB-68; 2- Промышленный компьютер PXI-1042 с модулем сбора данных NI PXI-6254; 3-Монитор; 4- Заготовка; 5- Резец; 6- Вибропреобразователь

сдвиговых деформаций ( $\Delta x/a$ ) стремятся к значениям близким к 1. Это говорит о том, что фрагменты сдвиговых деформаций при эффективных скоростях резания становятся одинаковых размеров в направлении сдвига и направлении схода стружки.

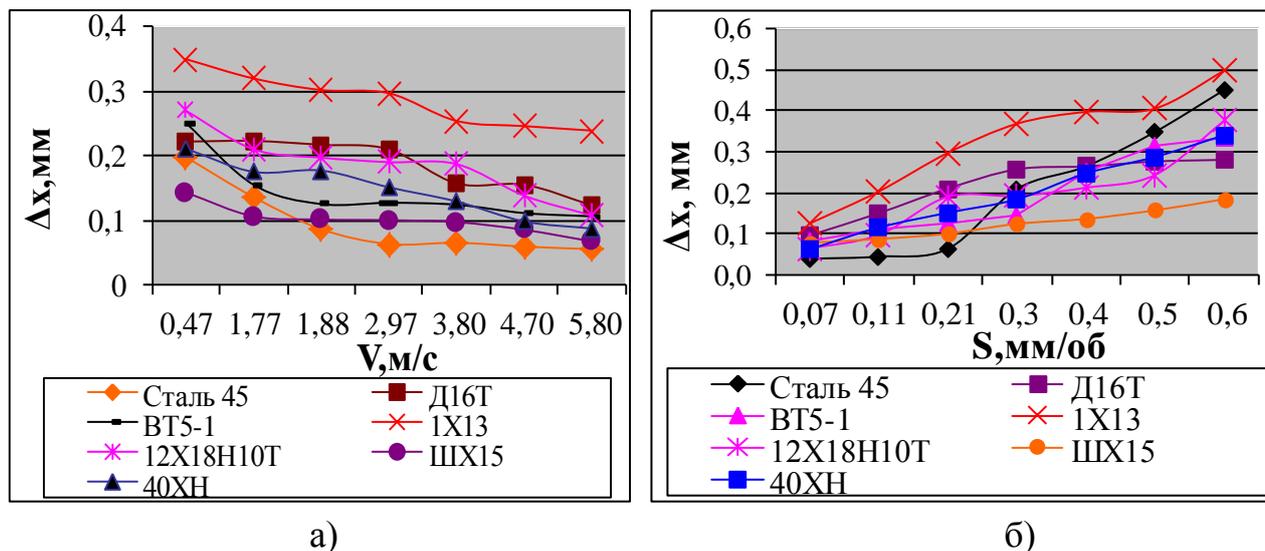


Рис.6. Графики изменения значений  $\Delta x$  для различных материалов: а) от изменения скорости резания б) от изменения рабочей подачи

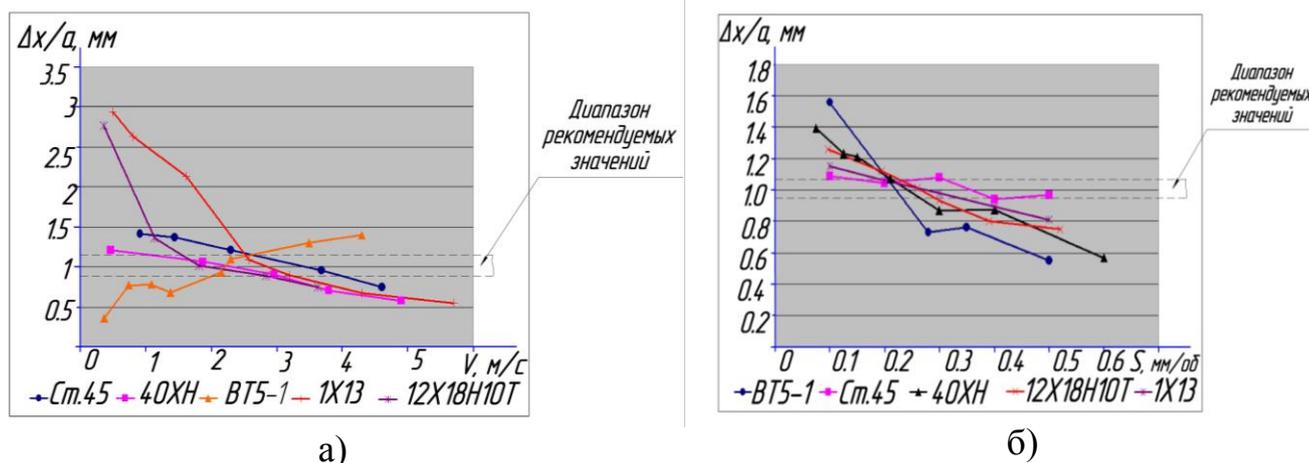


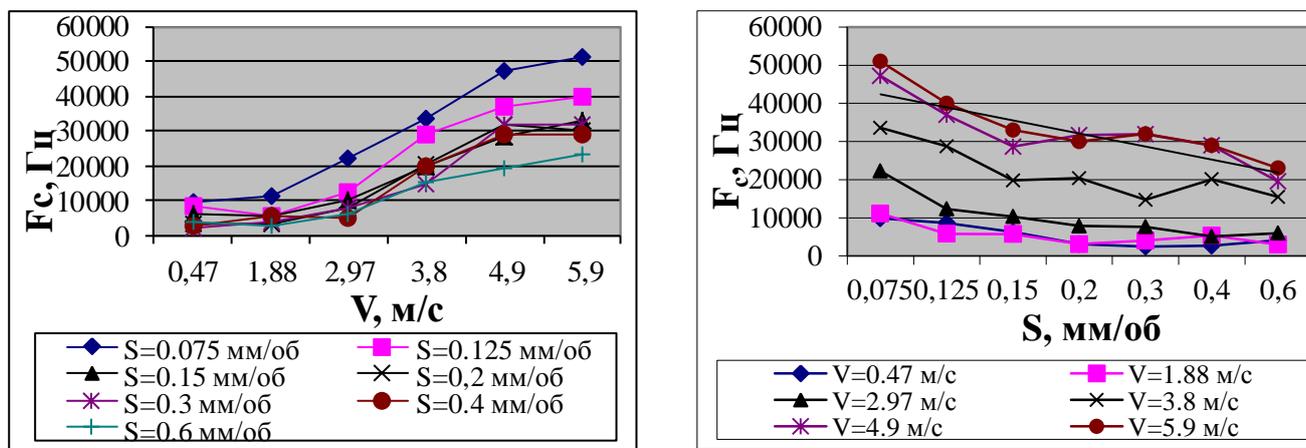
Рис.7. Графики изменения отношения  $\Delta x/a$  от: а) изменения скорости резания и б) рабочей подачи

Оценены частотные параметры образования элементов  $\Delta x$ . На Рис. 8 а,б приведены зависимости частоты сдвиговых деформаций  $f_c$  от изменения скорости резания и рабочей подачи. Полученные результаты хорошо согласуются с данными Рис. 6, где показано, что с ростом скорости резания величина  $\Delta x$  уменьшается, а с ростом подачи (толщина срезаемого слоя)  $\Delta x$  увеличивается. Увеличение этих фрагментов  $\Delta x$  связано с увеличением времени их образования и, соответственно, уменьшением частоты сдвиговых деформаций.

Оценка спектральных плотностей сигналов вибропреобразователя для всей совокупности записей выходного сигнала при изменении скоростей резания и подач приведена на графиках спектральной плотности мощности виброускорения (Рис.9).

Установлена корреляционная связь термомеханических условий формирования дискретных элементов стружек и соответствующих им условий возникновения

вибросигналов в технологической системе. Из спектров вибросигналов выделены полосы частот, соответствующих интервалам частот стружкообразования. Эти значения соответствуют графикам спектральных плотностей мощности виброускорения на всем интервале частот.

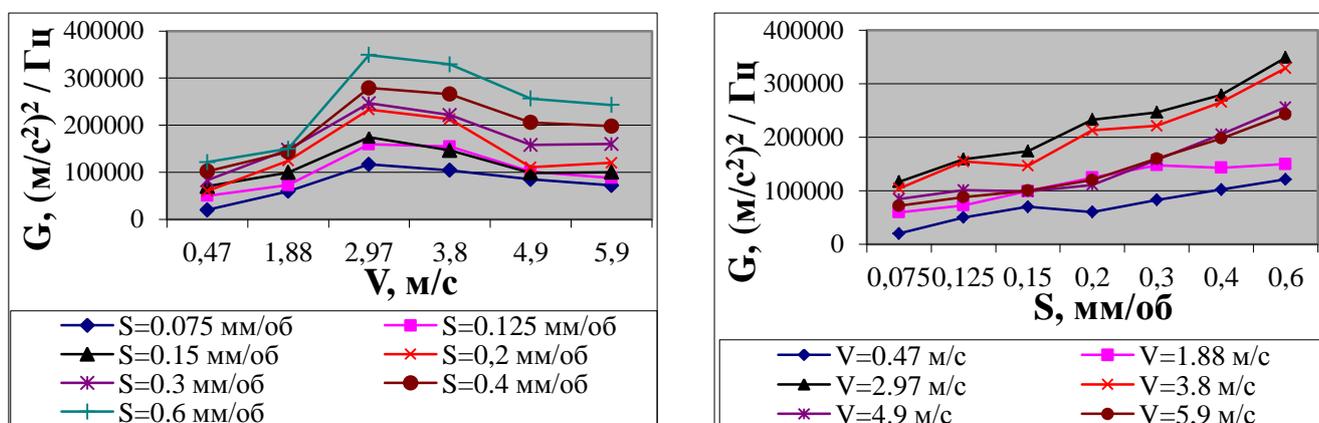


а)

б)

Рис.8. Графики зависимостей частоты сдвиговых деформаций  $f_c$  от: а) изменения скорости резания при различных подачах и б) от изменения рабочей подачи при различных скоростях резания (сталь 40ХН)

Интенсивность колебательного процесса в технологической системе (динамическая система резания) зависит от термодинамических условий процесса стружкообразования, а также и от свойств самой технологической системы.



а)

б)

Рис.9. Изменения значений спектральной плотности мощности виброускорения на записи всего спектра от: а) изменения скорости резания при различных подачах и б) изменения рабочей подачи при различных скоростях резания (сталь 40ХН)

Выполненные эксперименты и анализ их результатов подтвердил гипотезу о связи амплитудных значений вибросигналов с размерами ( $\Delta x$ ) фрагментов стружки, коэффициент корреляции  $r=0,9-0,97$ .

Кроме того, теоретическими расчетами показано, что доля мощности, затрачиваемой на деформацию в условной плоскости сдвига является наибольшей (60-65 %) от суммарной мощности стружкообразования. Это обстоятельство позволяет полагать, что мощность спектра на полосе частот стружкообразования, а также

амплитудное значение сигналов на этой полосе частот, должны иметь наибольшие значения. Анализ экспериментальных данных подтверждает эту гипотезу.

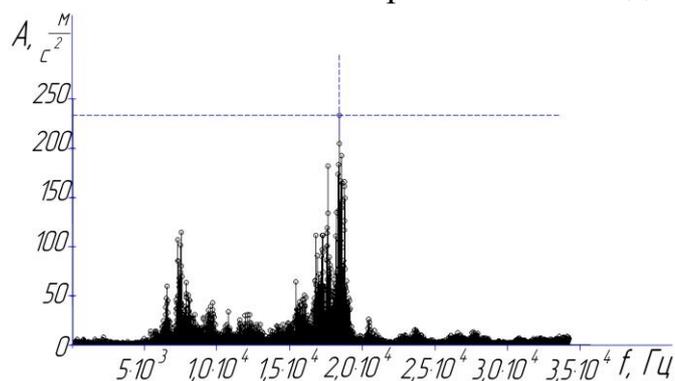


Рис.10. Спектр мощности виброускорения и выделение основной частоты стружкообразования (по максимальному пику) из спектра всей записи

режиме резания. Полученные результаты составили основу метода автоматизированного определения эффективных значений режимов резания.

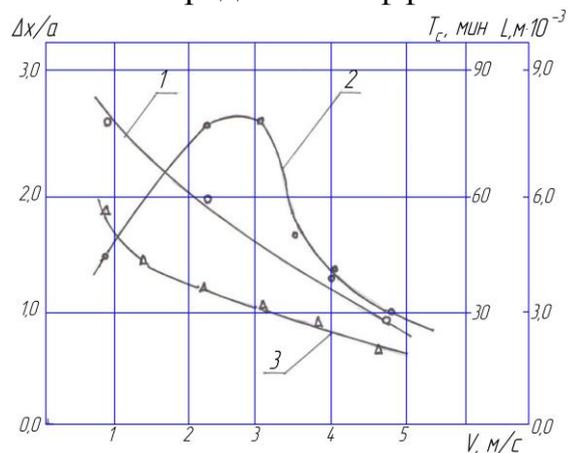


Рис.11. Зависимость периода стойкости  $T_c$  инструмента, длины пути резания  $L$  и относительной толщины сдвиговых деформаций стружки  $\Delta x/a$  от скорости резания для стали 45

$\Delta x/a \approx 1$ . Аналогичные результаты получены при обработке других материалов: стали 40ХН, стали 08Х18Н10Т. На Рис. 12 приведены зависимости относительного износа инструмента ( $I$ ) от величины  $\Delta x/a$ . Во всех случаях минимальный относительный износ соответствует величине  $\Delta x/a \approx 0,9..1,1$  для трех видов сталей. В столбцах таблицы выделены данные результатов расчетов, соответствующих оптимальным скоростям резания для трех марок сталей. Во всех случаях при оптимальных значениях сдвиговых деформаций ( $\Delta x/a$ ) близких к 1, отношение удельных касательных напряжений на передней поверхности к величине удельных напряжений сдвига, а также значения  $T_p / T_{пл}$ , примерно одинаковы. Отношение удельных касательных напряжений на передней поверхности лезвия к напряжениям сдвига снижается с ростом скорости резания и при оптимальных скоростях составляет величину 0,3-0,38. Величина относи-

На Рис. 10 показан участок спектра с максимальной амплитудой гармоники, что соответствует полосе частот стружкообразования на данном режиме резания. Статистический анализ выборочных дисперсий частот, определенных по параметрам сдвиговых деформаций ( $\Delta x$ ) и измеренных частот по пиковым значениям гармоник, показал их однородность в соответствии с критерием Фишера. Этот установленный факт позволяет идентифицировать полосу частот стружкообразования на каждом

В соответствии с известным положением Розенберга А. М. о всеобщей связи явлений в процессе резания, выполнены стойкостные испытания инструмента в тех же условиях, что и исследования процесса стружкообразования. Установлена косвенная связь между характером изменения термомеханических характеристик стружкообразования, спектральными характеристиками и относительным износом лезвий.

Зависимость периода стойкости  $T_c$  инструмента, длины пути резания  $L$  и относительной толщины сдвиговых деформаций стружки -  $\Delta x/a$  от скорости резания для стали 45 приведены на Рис.11. Максимальный путь резания ( $L$ ) совпадает с величиной

тельной температуры резания (гомологической)  $T_p/T_{пл}$  составляет 0,55..0,63 для трех видов сталей. Результаты изучения изнашивания режущих лезвий и стружкообразования указывает на существование связи между этими процессами. Интенсивность изнашивания лезвий зависит от характера и размеров формирующейся текстуры стружек, которая определяется скоростью резания и толщиной срезаемого слоя.

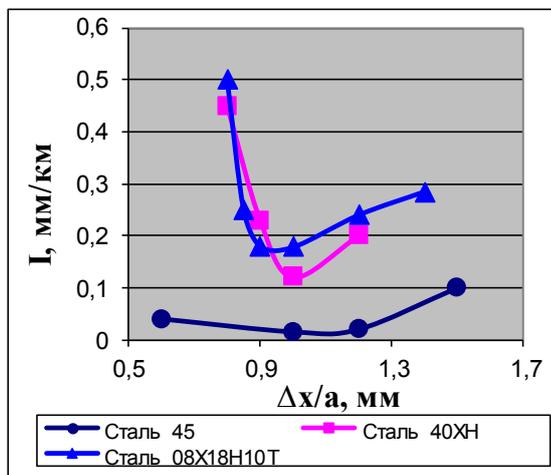


Рис.12. Зависимость относительного износа инструмента (I) от величины  $\Delta x/a$ .

необходимо. Графический код программы (блок-диаграмма виртуального прибора) создан в среде программирования LabView.

В четвертой главе представлен метод автоматизированного определения эффективного режима токарной обработки на основе контроля вибросигнала. Приведена схема алгоритма работы системы контроля процесса и результаты производственного опробования разработанного метода контроля (Рис.13).

На основе алгоритма разработана программа работы и управления, которая представлена в виде виртуального прибора – пульта оператора (Рис.14).

Данный виртуальный пульт позволит оператору оперативно следить за процессом определения режимов резания, а также вносить поправки в программу, если это будет необходимо.

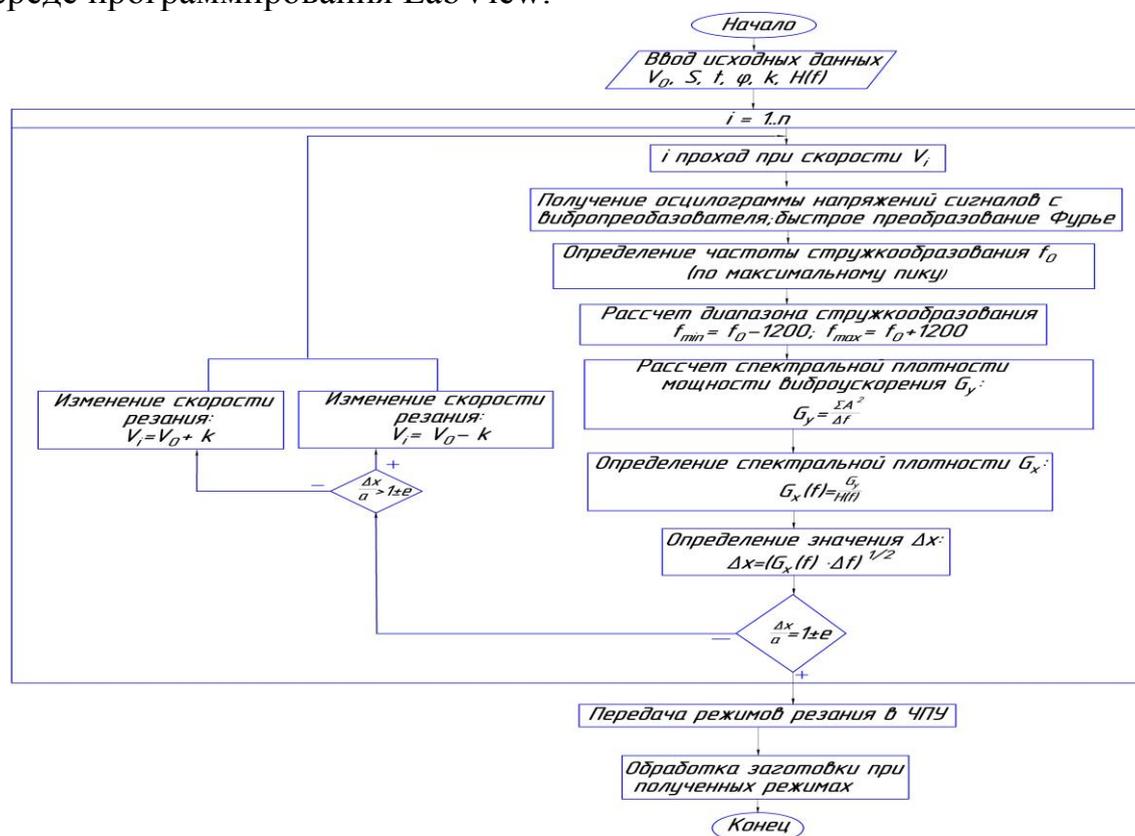


Рис.13. Алгоритм работы автоматизированной системы определения эффективных режимов резания

Предложенный метод контроля режимов резания прошел опробования при внедрении технологического процесса механической обработки валов прокатных станов на ПАО «Уралмашзавод». Фотографии обрабатываемого изделия и стружек, полученных при обработке, показан на Рис. 15 а,б. Станок НОЕСН MFD с ЧПУ. Материал валов: сталь 8Х3СМФ, сталь 9Х2МФ. Исходная заготовка – поковка, твердость HRC 24..26. Чистовая обработка – твердость HRC 33,1..38,5. Инструмент – резец с механическим креплением сменной многогранной пластины (СПМ) – SNMM-250724 (Pramet). Материал СПМ – P50.

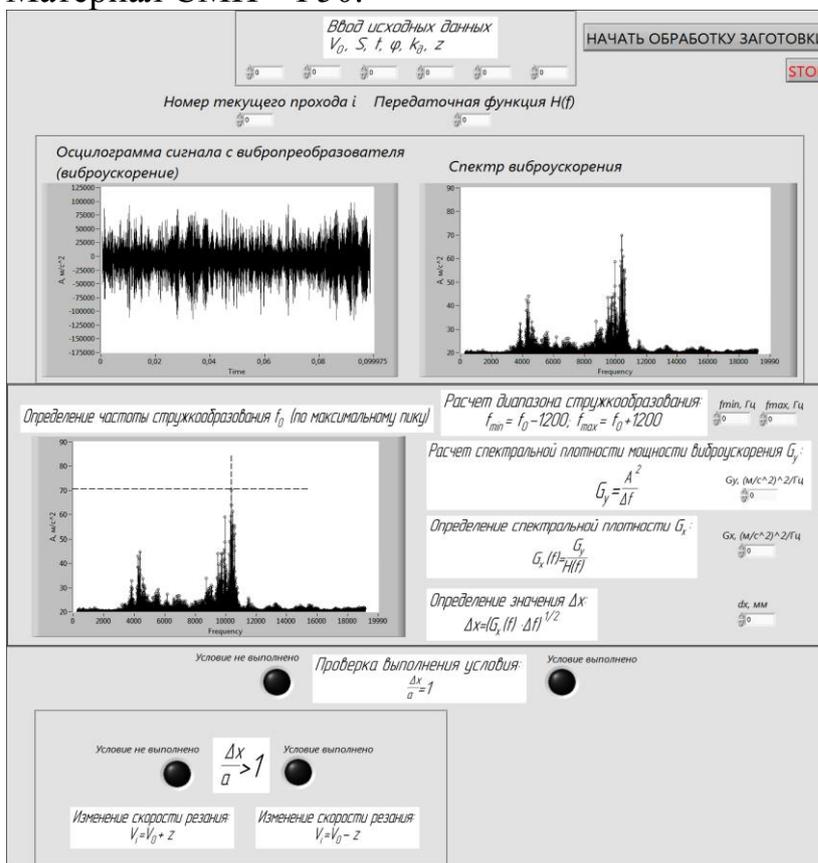


Рис.14.Лицевая панель виртуального прибора – пульта оператора



а)



б)

Рис.15. Фотографии: а) вала прокатного стана и б) образцы стружек

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) На основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача разработки метода и средств контроля эффективных режимов токарной обработки на основе связи деформационных характеристик процесса стружкообразования с параметрами вибросигналов в процессе резания материалов.

2) В соответствии с механикой процесса стружкообразования, образующиеся дискретные элементы стружки размером  $\Delta x$  создают циклические изменения «мгновенных» сил резания. При этом амплитудные значения мгновенных сил резания коррелируют с размерами  $\Delta x$ . Указанные явления позволяют вести косвенные измерения параметров циклического процесса стружкообразования (деформационного цикла); его амплитудно – частотных и спектральных характеристик. Это положение подтверждено экспериментально.

3) Установлено, что при режимах резания, считающихся эффективными, относительная величина сдвиговых деформаций стремится к  $\Delta x/a \approx 1$ . Это свидетельствует о том, что фрагменты стружки при сдвиговых деформациях, при эффективных скоростях резания (подачах), стремятся к одинаковым размерам в направлении сдвига и направлении схода стружки.

4) Установлена устойчивая корреляционная связь между размерами фрагментов стружек  $\Delta x$ , временем их образования и амплитудно – частотными характеристиками сигналов вибропреобразователя в достаточно широком диапазоне изменения скоростей резания и рабочих подач. Установленная корреляционная связь условий стружкообразования с амплитудными, частотными, спектральными характеристиками сигналов вибропреобразователя позволяет осуществлять контроль над процессом стружкообразования.

5) Экспериментально установлено, что участок спектра, с максимальной амплитудой гармоник, соответствует диапазону частот сдвиговых деформаций стружкообразования (определяющие колебания мгновенных сил резания), что позволяет идентифицировать (определять) частоту стружкообразования на каждом заданном режиме резания.

6) Выводы по результатам исследования процесса стружкообразования и выявления корреляционных связей с характеристиками виброспектров, хорошо согласуются с результатами стойкостных испытаний режущих лезвий инструмента. Значения режимов обработки, установленные на основе практического опыта и режимы, определенные на основе изучения вибросигналов совпадают с минимальной интенсивностью износа. На основе этих результатов создан способ определения эффективных режимов резания.

7) Предложен и реализован алгоритм определения эффективных режимов резания, на основе которого разработана программа работы и управления, представленная в виде виртуального прибора – пульта оператора. Разработан программный продукт для сбора и обработки информации с датчиков, а также человеко – машинный интерфейс для принятия решения оператором о назначении эффективных режимов резания. Результаты выполненных исследований обеспечивают возможность

установки вибропреобразователя вблизи зоны стружкообразования с возможностью передачи сигнала без значительной модернизации существующего станочного оборудования.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

*В рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:*

1. Гусев А.В., Закураев В.В., Турыгин Ю.В. Процесс стружкообразования и его изучение на основе частотного и спектрального анализа// Интеллектуальные системы в производстве. Ижевск, 2013. № 2. С. 49-55. (0,66 п.л. / 0,46 п.л.).

2. Способ определения оптимальных режимов резания: Пат. 2514251 РФ, / Гусев А.В., Закураев В.В.; заявл. 20.07.2012, опубл. 27.04.2014. Бюлл.№12. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).

3. Гусев А.В., Закураев В. В., Ничков А. Г. О связи деформационных параметров стружкообразования с характеристиками колебаний при резании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Тольятти: 2015. № 3-1. С.52–59. (0,87 п.л. / 0,54 п.л.).

4. Гусев А. В., Закураев В. В. Процесс стружкообразования и характеристики износа инструмента при точении конструкционных сталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск, 2016. №11. С. 24-36. (1,5 п.л./ 0,72 п.л.).

*В других научных изданиях:*

5. Гусев А.В., Закураев В. В. Предпосылки к созданию метода определения оптимальных режимов резания // XII научно-практическая конференция Дни науки ОТИ НИЯУ МИФИ -2012. 60-летию института посвящается. Том 1. Материалы конференции. Озерск, 25-26 апреля 2012 г. Озерск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2012. С. 166-169.

6. Гусев А.В., Закураев В. В. Определение оптимальных режимов механической обработки с помощью виброакустических измерений // XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 95-97.

7. Гусев А.В., Закураев В. В., Хадеев С. И. Обоснование возможности контроля процесса механической обработки // Машиностроение – традиции и инновации: сборник трудов Всероссийской молодежной конференции. Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. С. 195-198. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

8. Гусев А.В. Предпосылки к созданию метода определения оптимальных режимов резания // Измерение, контроль и диагностика-2012: сб. материалов II Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, с междунар. участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, 14-16 мая 2012 года). Ижевск: А4, 2012. 380 с. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Гусев А.В. К определению корреляции деформационных параметров и вибросигналов в процессе механической обработки // Автоматизация и прогрессив-

ные технологии в атомной отрасли: Труды VI международной научно-технической конференции (15 – 19 октября 2012 г.), – Новоуральск: Изд-во Форт -Диалог, 2012. – С. 283-286. (0,5 п.л. / 0,225 п.л.).

10. Гусев А.В., Закураев В. В. К созданию модели процесса стружкообразования при резании материалов // Научная сессия НТИ НИЯУ МИФИ – 2015: Труды VII всероссийской научно-практической конференции, Новоуральск 12 февраля 2015 г. Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 46-54. (1,0 п.л. / 0,26 п.л.).

11. Гусев А.В., Закураев В. В., Девятковский Н.А. О связи коэффициента усадки стружки с термомеханическими условиями резания материалов//Научная сессия НТИ НИЯУ МИФИ – 2015: Труды VII всероссийской научно-практической конференции, Новоуральск 12 февраля 2015 г. Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 54-59. (0,75 п.л. / 0,2 п.л.).

12. Гусев А.В., Закураев В. В., Ничков А.Г. Предпосылки к созданию метода автоматизированного выбора режимов резания//Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти: 2015. С. 207-214. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

13. Гусев А.В., Закураев В. В. Процесс стружкообразования и характеристики износа инструмента при точении конструкционных сталей // Научно-технический вестник БГУ. Брянск, 2016. №4. С. 16-27. (1,4 п.л. / 0,72 п.л.).

14. Гусев А.В., Закураев В. В. Система автоматического определения эффективных режимов токарной обработки // Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. 25–28 сентября 2017 г. / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 29-31. (0,19 п. л. / 0,15 п.л.).

Гусев Антон Валерьевич

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

### АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

---

Подписано в печать .02.2019. Формат А5. Тираж 70 экз.

Заказ 1298.

---

Отпечатано в типографии