

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.789: 621.91

**ГОРАВСКИЙ**  
**Игорь Андреевич**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА КОНЦЕВОГО  
ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5,  
УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

Минск, 2024

Работа выполнена в учреждении образования «Барановичский государственный университет».

Научный руководитель

**ЖИГАЛОВ Анатолий Николаевич,**

доктор технических наук, доцент, директор государственного научного учреждения «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет»

Официальные оппоненты:

**АКУЛОВИЧ Леонид Михайлович,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»;

**ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич,** кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики поверхностных явлений Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 25 октября 2024 в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202; тел. и.о. ученого секретаря (+375 17) 296-67-85, e-mail: mitomd@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Белорусского национального технического университета.

**Автореферат разослан «24 » сентября 2024г.**

И.о. ученого секретаря  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

В. А. Томило



## **ВВЕДЕНИЕ**

Около 60 % механической обработки деталей машин связано с процессами прерывистого резания, которые в основном осуществляются фрезерованием концевым инструментом (концевые, шпоночные и др. фрезы), широко применяемым для получения пазов, уступов, канавок и других поверхностей деталей машин. При таких процессах резания возникают удары и циклические воздействия температуры на зуб инструмента при его врезании в материал и выходе из него; охлаждении инструмента при холостых ходах, что усугубляется из-за малых диаметров инструмента. В результате чего режущие зубья скалываются, и ресурс инструмента снижается.

Потребление фрезерного концевой инструмента из быстрорежущей стали P6M5 достигает 80 % от всего объема выпуска быстрорежущей стали. Недостатком такого инструмента является низкая ударная вязкость 27–48 кДж/м<sup>2</sup> при высокой твердости 63–65 HRC, что не позволяет осуществлять эффективную обработку при процессах прерывистого резания. Концевой фрезерный инструмент имеет пониженный в 1,6–2 раза ресурс в сравнении с цилиндрическими, дисковыми и др. фрезами. Противостоять этому возможно путем совершенствования структуры инструмента методами упрочнения такими как ионно-плазменная обработка, цементация, упрочнение лазером, ионно-катодное распыление, электроискровое легирование, магнитно-импульсное упрочнение, нанесение износостойких покрытий и др.

Наиболее перспективным в научном и эффективном в прикладном плане является метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий при сохранении исходной твердости обеспечивать повышение ударной вязкости сплавов и за счет этого повышать ресурс металлорежущего инструмента, работающего при прерывистых процессах резания. Однако метод АДУ не приспособлен для концевой фрезерной инструмента из быстрорежущих сталей, так как не исследован для такого рода инструмента, отсутствуют рекомендации по его техническому применению.

В этой связи технологическое обеспечение ресурса концевой фрезерной инструмента из быстрорежущей стали P6M5, упрочненного АДУ, направлено на решение важной народнохозяйственной проблемы, связанной со снижением затрат на приобретение инструмента.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы в части создания новых многофункциональных материалов с заданными свойствами (пункт 4 Приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156). Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках научного направления «Высокоэнергетические технологии упрочнения материалов» и темы научных исследований «Исследование силовых и износостойких показателей инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом» (приказ № 04 от 03.01.2023), выполняемых на кафедре технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет».

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

**Целью исследования** является технологическое обеспечение ресурса концевго фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 с АДУ.

Для достижения цели потребовалось решение следующих **задач**:

- установить математические зависимости, описывающие условия работы концевго фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей, и выработать рекомендации по повышению ресурса работы такого рода инструмента;
- разработать режимы и технологию упрочнения концевго фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей АДУ;
- исследовать структуру, фазовый состав и физико-механические свойства быстрорежущих сталей, упрочненных АДУ;
- исследовать износ концевго фрезерного инструмента из стали Р6М5 с АДУ и осуществить оптимизацию технологических режимов обработки;
- разработать технологию механической обработки концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 с АДУ, обеспечивающую повышение ресурса режущего инструмента и производительность обработки.

**Объект исследования:** технологический процесс упрочнения концевго фрезерного инструмента из быстрорежущей стали методом АДУ.

**Предмет исследования:** структуры, фазовый состав, физико-механические свойства, износ, ресурс инструмента.

### **Научная новизна**

1. Установлено влияние кинематики процесса резания концевым фрезерным инструментом на возникновение существенных изменений толщины и ширины срезаемого слоя, ударов на режущем зубе, сил резания в пределах оборота фрезерного инструмента, позволившее обосновать техническую возможность и правомерность применения метода АДУ для повышения эффективности работы такого рода инструмента, выбор объекта и предмета исследований.

2. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров (частота, время ее воздействия, температура предварительного нагрева и выдержки инструмента) при аэродинамическом звуковым упрочнении быстрорежущей стали марки Р6М5 на ее структуру и свойства установлено, что упрочнение методом АДУ улучшает однородность структуры быстрорежущей стали за счет устранения дефекта структуры в виде строчечности и сорентированных вдоль оси деформации карбидных фаз, снижения балла карбидной неоднородности, изменения исходных растягивающих макронапряжений на напряжения сжатия, уменьшения микронапряжений и плотности дислокаций, уменьшения размеров карбидной фазы (с 10 мкм до 5,5–6 мкм), что обеспечивает повышение ударной вязкости на 37–43 %.

3. Выявлены взаимосвязи износа и ресурса концевго фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, как без упрочнения, так и упрочненного АДУ, от режимов резания, что позволило получить математические зависимости для определения прогнозируемой величины износа и ресурса такого инструмента от режимов резания.

4. С помощью оптимизационного моделирования показано, что при фрезеровании стали 45 концевым фрезерным инструментом из стали Р6М5 с АДУ на оптимальных режимах резания, наряду с увеличением ресурса инструмента в 1,8 раза, обеспечивается одновременно и повышение производительности обработки на 7,5 %.

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

1. Результаты теоретических исследований влияния кинематики процесса резания концевым фрезерным инструментом на возникновение изменений толщины и ширины срезаемого слоя, ударов на режущем зубе, сил резания, позволившие определить математические зависимости с помощью которых установлено, что такой инструмент работает со значительными ударными нагрузками и изменяющимися силами резания, и теоретически обосновать возможность и правомерность применения метода АДУ для повышения эффективности работы такого рода инструмента, что явилось основанием выбора объекта и предмета исследований.

2. Результаты теоретических исследований влияния параметров (температура нагрева, частота и амплитуда) АДУ на генерирование энергий на атомы химических элементов, входящих в быстрорежущую сталь Р6М5, способных вызвать в структуре диффузионные процессы, приводящие к смещению атомов углерода и легирующих элементов из перенапряженных кристаллических решеток  $\alpha$ -Fe и устранению искажений решеток, снижению внутренних напряжений, позволившие установить, что смещение атомов возможно осуществить при нагреве стали Р6М5 до температуры хладноломкости и воздействию на атом волновой энергии  $(5,4-2,7) \cdot 10^{-19}$  Дж в диапазоне резонансных частот 150–170 Гц и амплитуд 130–140 мкм, при этом для разработанной установки АДУ смещение атомов, связанных наименьшими расстояниями в кристаллической решетке, происходит на режиме 1 (154 Гц), а атомов с наибольшими расстояниями на режиме 2 (168 Гц).

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов АДУ (частота, время ее воздействия, температура предварительного нагрева и выдержки) концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 на структуру (дефект структуры в виде строчечности и сорентированных вдоль оси деформации карбидных фаз, балл карбидной неоднородности, размеры первичных карбидов и их количество), фазовый состав (макро- и микронапряжения, плотность дислокаций) и физико-механические свойства (твердость, ударная вязкость), что позволило предложить двухстадийную технологию упрочнения методом АДУ и выбрать рациональные режимы упрочнения.

4. Результаты исследований режимов резания (скорость, глубина резания, подача на зуб), при обработке концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 с АДУ, на величину износа по задней поверхности, что позволило получить зависимости величины износа от пути резания, на основании которых определены рациональные диапазоны режимов резания, обеспечивающие снижение износа по задней поверхности инструмента.

5. Результаты оптимизационного моделирования ресурса концевого фрезерного инструмента из стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, с учетом взаимосвязей в виде линейно-квадратичных взаимодействий между собой скорости и глубины резания, подачи на зуб, позволившие выработать рекомендации по установлению рациональных технологических режимов резания, при которых обеспечивается увеличение ресурса упрочненного АДУ инструмента с одновременным повышением производительности обработки.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Соискателем получены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе. Разработана и исследована технология упрочнения концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали мето-

дом АДУ и механической обработки таким инструментом, позволившие обеспечить повышение ресурса инструмента в 1,8 раза с одновременным повышением производительности обработки.

Постановка целей и задач исследований, анализ полученных результатов и формулировка выводов проводились вместе с научным руководителем д-ром техн. наук, доц. А. Н. Жигаловым. В совместных работах с А. Н. Жигаловым, Д. Д. Богданом, Г. В. Дейхиной, Д. Г. Шатуровым, К. С. Винничек, Л. Л. Сотником, С. И. Русаном соискатель принимал непосредственное участие на этапах проведения исследований, подготовки публикаций. Результаты, полученные соавторами работ, в диссертации не рассматриваются.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения диссертации обсуждены на международных научно-технических конференциях и семинарах: «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2020); «Наука – практике» (Барановичи, 2020); «Новые материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2020); «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2021); «Наука – практике» (Барановичи, 2021); «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (Санкт-Петербург, 2022); «Наука – практике» (Барановичи, 2022); «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (Брест, 2022) и др.

По результатам исследований разработаны оборудование и технологический процесс упрочнения концевго фрезерного инструмента методом АДУ, которые внедрены в производство УП «Локомотивное депо Барановичи» Республики Беларусь. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии АДУ составил 3 800,00 рублей. Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс учреждения образования «Барановичский государственный университет» в лекционных и практических занятиях по дисциплинам «Режущий инструмент», «Теория резания», «Технология машиностроения», «Основы технологии машиностроения», «Эффективные методы упрочнения деталей машин».

#### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах, в том числе в 9 статьях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (7,23 авторских листов), 11 статьях в сборниках научных трудов и докладов на конференциях.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, списка использованных источников (библиографический список из 97 наименований, список публикаций соискателя из 20 наименований), 3 приложений. Изложена на 149 страницах, из которых 136 содержат основной текст, включая 20 таблиц, 75 рисунков.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** проведен аналитический обзор литературы по теме исследования, выполнен анализ результатов исследований, представленных в отечественных и иностранных источниках научной информации, описаны основные этапы представлений по рассматриваемой проблеме ресурса концевго фрезерного инструмента. Рассмотрены особенности обработки деталей машин инструментом из быстрорежущей стали P6M5, производства инструмента из таких инструменталь-

ных сталей, а также совершенствование структуры быстрорежущих сталей различными методами упрочнения.

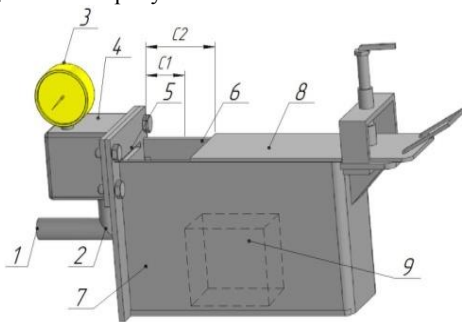
При изготовлении инструмента из быстрорежущих сталей образуются погрешности, которые оказывают существенное влияние на структуру сталей и свойства инструмента. Недостатком концевых фрезерных инструментов из сталей P6M5 является невысокая ударная вязкость – до 48 кДж/м<sup>2</sup> при высокой твердости 63–65 HRC, что не позволяет осуществлять эффективную обработку при процессах прерывистого резания. Такой инструмент имеет пониженный в 1,6–2,0 раза ресурс в сравнении с другими видами фрез (цилиндрическими, дисковыми и др.). Решение данной проблемы может быть в использовании инструмента, обладающего повышенными характеристиками твердости и ударной вязкости.

Показано, что известные методы совершенствования инструмента из быстрорежущих сталей, такие как ионно-плазменная обработка, цементация, упрочнение лазером, ионно-катодное распыление, электроискровое легирование, магнитно-импульсное упрочнение, нанесение износостойких покрытий и др., не в состоянии решить проблему повышения ресурса инструмента из быстрорежущей стали P6M5, работающего при процессах прерывистого резания. Приведены положительные и отрицательные стороны каждого метода.

Наиболее перспективным в научном и прикладном плане является метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий не изменяя геометрию режущего лезвия, сохранять исходную твердость и обеспечивать повышение ударной вязкости упрочняемого материала.

Общий вид установки для АДУ представлен на рисунке 1.

Установка для АДУ работает следующим образом. Изделия 9 помещаются в резонансную камеру 7 через выходной канал 6. Режим обработки настраивается регулирующей заслонкой 8 на размер  $C_1$  или  $C_2$  с последующей фиксацией заслонки 8. Воздух в камеру сглаживания пульсации 4 поступает через регулирующий вентиль 2 от компрессорной установки через сопло для подачи воздуха 1. Объем подаваемого воздуха контролируется при помощи манометра 3. Воздух, проходя через щелевое сопло 5, образует давление и частоту звукового поля, обеспечивающие вхождение в резонанс боковых стенок резонансной камеры 7.



- 1 – сопло для подачи воздуха;
- 2 – регулирующий вентиль; 3 – манометр;
- 4 – камера сглаживания пульсации воздуха;
- 5 – щелевое сопло; 6 – выходной канал;
- 7 – резонансная камера; 8 – регулирующая заслонка; 9 – упрочняемые изделия

**Рисунок 1 – Установка аэродинамического звукового воздействия**

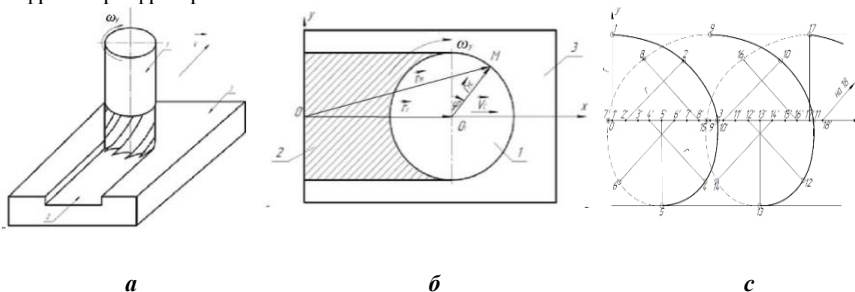
Метод АДУ наиболее эффективен для инструментов, работающих при весьма интенсивных процессах прерывистого резания, наличии больших ударных нагрузок, существенных изменений силы резания в пределах одного рабочего хода инструмента. АДУ заключается в предварительном нагреве изделия до температуры

хлодноустойкости и затем воздействию на него энергией от резонансных волн звуковой частоты.

**Во второй главе** представлены результаты теоретических исследований влияния технологических параметров процесса резания цилиндрическим фрезерным инструментом на кинематику резания и силу резания, которые позволили обосновать техническую возможность и правомерность применения метода АДУ для повышения эффективности работы концевой фрезерного инструмента по сравнению с осевым инструментом, выбор объекта и предмета исследований.

Большой вклад в изучение вопросов влияния стойкости инструмента при процессах прерывистого резания внесли работы Лоладзе Т. Н., Жигалова А. Н., Кабалдина Ю. Г., Симоняна М. М., Андреева Г. С., Чигодаева Н. Е. и др., которые обосновали, что прерывистые процессы резания являются сложными процессами резания, протекающими в наиболее тяжелых условиях из-за явлений удара при врезании инструмента в заготовку и выходе из нее, частого циклического изменения температурного поля на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятного расположения режущего клина инструмента в процессе стружкообразования и других явлений.

На рисунке 2 изображены общий вид, схема и траектория движения зуба концевой фрезы при фрезеровании паза в заготовке.



**1 – фреза; 2 – паз; 3 – заготовка**  
***a* – общий вид резания концевой фрезы, *б* – схема движения зуба,**  
***с* – траектория движения точки зуба**  
**Рисунок 2 – Схема резания концевой фрезы**

Фреза 1 радиусом  $r_\phi$  в процессе фрезерования паза 2 за время  $\tau$  совершает сложное движение: поступательное вдоль заготовки 3 со скоростью  $v = v_c$  и вращающееся вокруг собственной оси симметрии с угловой скоростью  $\omega_y$ . Значения скорости  $v_M$  и ускорения  $a_M$  точки  $M$  равны:

$$v_M = \sqrt{v^2 + 2r_\phi \omega_y v \cos(\omega_y \tau) + r_\phi^2 \omega_y^2}; \quad a_M = r_\phi \omega_y^2. \quad (1)$$

Анализ полученных математических зависимостей скорости  $v_M$  и ускорения  $a_M$  зуба фрезы в горизонтальной плоскости резания (точка  $M$ ) показывает, что движение происходит по циклоиде (рисунок 2, *с*), траектория которой и определяет неравномерность толщины срезаемого слоя.

На рисунке 3 представлены кинематические схемы срезаемого слоя в горизонтальной (расстояние между двумя последовательными траекториями, образующееся смежными зубьями) и вертикальной плоскости. Посредством кинематического

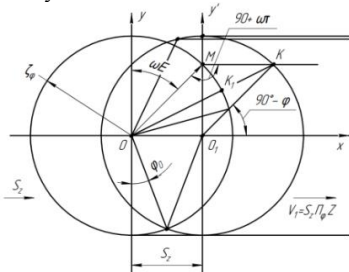
анализа движения зуба фрезы в горизонтальной и вертикальной плоскости определены зависимости толщины  $a_c$  и ширины  $b_c$  срезаемого слоя:

$$a_c = \sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi; \quad b_c = r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}, \quad (2)$$

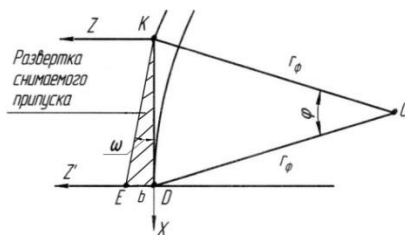
где  $s_z$  – подача на зуб;

$\varphi$  – угол контакта зуба с заготовкой,

$\omega$  – угол подъема винтовой части зуба.



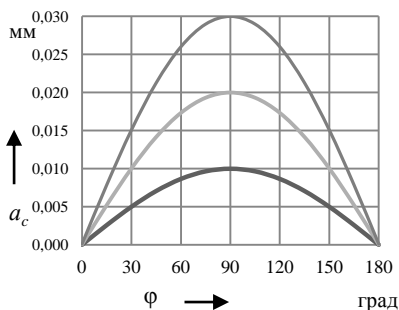
**a**



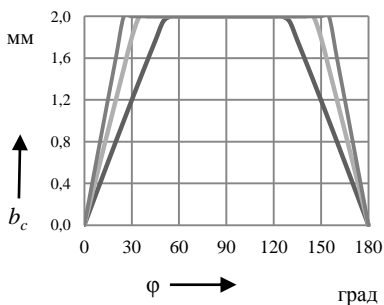
**б**

**Рисунок 3 – Схемы движения зуба фрезы в (а) горизонтальной и (б) вертикальной плоскости**

На рисунке 4 представлены смоделированные по (2) зависимости толщины  $a_c$  и ширины  $b_c$  срезаемого слоя при контакте зуба концевой фрезерного инструмента с металлом ( $r_\phi = 4, 6, 8$  мм;  $t = 2$  мм;  $\omega = 30^\circ$ ).



**a**



**б**

**Рисунок 4 – Зависимости толщины  $a_c$  (а) и ширины  $b_c$  (б) срезаемого слоя, снимаемых зубом винтовой формы концевой фрезерного инструмента, от угла контакта зуба с заготовкой  $\varphi$**

Математические выражения (2) для определения толщины  $a_c$  и ширины  $b_c$  срезаемого слоя позволили установить, что наихудшие условия резания с точки зрения прерывистости обработки происходят в пределах от начала врезания зуба фрезы и контакта его до  $30^\circ$ , а также от  $150^\circ$  и до выхода зуба из обрабатываемого материала, а сам процесс резания является нестабильным.

Определена зависимость количества циклов нагрузки концевой фрезерного инструмента  $N_y$ , совершенных на единице площади срезаемого слоя металла:

$$N_y = \frac{zkr_\phi}{s_z \left[ \int_0^{180^\circ} \left( (\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2} + 2r_\phi s_z \sin \varphi - r_\phi) (r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left( (\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2} + 2r_\phi s_z \sin \varphi - r_\phi) (r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}) d\varphi \right) \right] }, \quad (3)$$

где  $k$  – количество ударов за один оборот (два или четыре);

$z$  – количество зубьев;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – начальный и конечный угол контакта фрезы с заготовкой.

Получено математическое выражение для определения касательной составляющей силы резания  $P_z$ , влияющей на выбор мощности оборудования, от удельной силы резания  $q_p$ , толщины и ширины срезаемого слоя:

$$P_z = q_p r_\phi (\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2} + 2r_\phi s_z \sin \varphi - r_\phi) \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}. \quad (4)$$

Подставив в (4)  $s_z = 0$ , что имитирует обработку осевым инструментом, видно, что  $P_z = 0$ , а это означает, что процесс резания при сверлении происходит значительно равномернее по сравнению с резанием концевой фрезой.

С помощью математических зависимостей установлено, что концевой фрезерный инструмент работает со значительными циклическими нагрузками (8,1–8,5 ударов на единице площади срезаемого слоя металла) и изменяющимися составляющих сил резания (касательная составляющая сила резания на зубе инструмента в пределах одного реза изменяется до 30 раз, от 1,4 до 42,1 Н/град), что явилось теоретическим обоснованием технической возможности и правомерности применения АДУ, наиболее эффективного при процессах прерывистого резания и с ударными нагрузками, для повышения ресурса такого рода инструмента, и основанием выбора объекта и предмета исследований.

**В третьей главе** произведены теоретические и экспериментальные исследования метода АДУ, на основании которых разработана установка АДУ и определены эффективные режимы АДУ для фрезерного инструмента из Р6М5.

Проведенные расчеты (таблица 1), для стали Р6М5 при плотности 8600 кг/м<sup>3</sup>, температуре хладноломкости 280 °С, коэффициентах затухания  $\delta = 20$  и расположение изделия в камере  $k_8 = 19,96$ , показали, что смещения атомов углерода и легирующих элементов при АДУ происходят при энергии на атом (5,4–2,7)·10<sup>-19</sup> Дж в диапазоне частот 150–170 Гц.

Разработана и изготовлена установка АДУ (рисунок 1) для которой смещение атомов, связанных наименьшими расстояниями в кристаллической решетке происходит на режиме 1 – резонансная частота 154 Гц, а атомов с наибольшими расстояниями в кристаллической решетке на режиме 2 – резонансная частота 168 Гц.

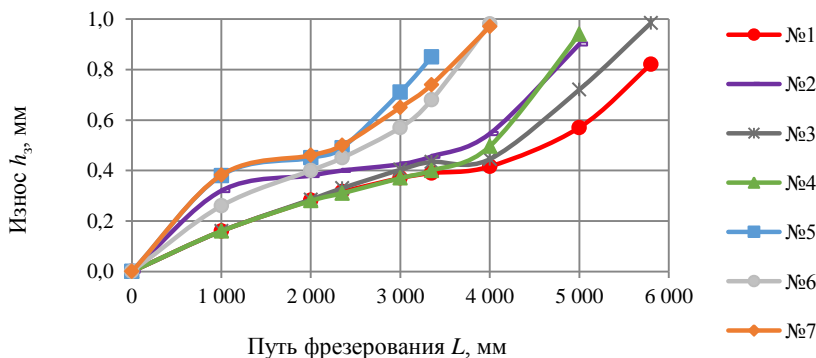
Применение двух последовательных режимов 1 и 2 направлено не только на изменения в кристаллических решетках, но и на изменение формы, количества карбидных включений, процесс формирования которых также осуществляется за счет перемещения дислокаций в напряженном состоянии.

Таблица 1 – Расчетные значения резонансных частот  $\omega_{рез}$  и резонансных амплитуд  $A_{рез}$ , с наименьшими  $a_{рм} \cdot E^{-10}$  и наибольшими  $a_{рм} \cdot E^{-10}$  расстояниями ребер элементарных ячеек кристаллических решеток, при которых для стали Р6М5 при АДУ происходит смещение атомов химических элементов

Элементы	$k_{св}$	$k_v$	$m \cdot E^{-27}$ , кг	$a_{рм} \cdot E^{-10}$ , м	$A_{рез, мкм}$	$\omega_{рез}$ , Гц	$a_{рм} \cdot E^{-10}$ , м	$A_{рез, мкм}$	$\omega_{рез}$ , Гц
C	106	0,60	1,994	2,46	134	153,5	6,71	74	168,3
Si	48	0,68	4,664	10,437	134	24,0	10,437	74	43,5
Mn	63	0,52	9,123	8,89	134	25,2	8,89	74	45,6
Ni	81	0,74	9,746	3,524	134	38,3	3,524	74	69,4
S	67	0,68	5,325	10,437	134	27,5	24,369	74	32,5
P	36	0,68	5,143	18,8	134	13,1	18,8	74	23,7
Cr	74	0,52	8,634	2,885	134	48,2	2,885	74	87,3
Mo	36	0,68	15,933	3,147	134	22,3	3,147	74	34,7
W	36	0,68	30,527	3,16	134	19,1	3,16	74	36,6
V	36	0,68	8,459	3,024	134	27,6	3,024	74	50,0
Co	81	0,74	9,786	2,505	134	45,0	4,084	74	63,9
Cu	294	0,74	10,552	3,615	134	68,5	3,615	74	124,0
Fe	36	0,68	9,273	2,866	134	29,4	2,866	74	53,3

$k_{св}$  – коэффициент, учитывающий количество межатомных связей в кристаллической решетке;  $k_v$  – коэффициент плотности упаковки кристаллической решетки.

На рисунке 5 представлены результаты оптимизации режимов АДУ. За критерий эффективности упрочнения при АДУ принимался износ зуба фрезы по задней поверхности  $h_z$ .



№ 1 – 280 °С,  $\tau = 3,0$  мин, 1 и 2 режим; № 2 – 260 °С,  $\tau = 3,0$  мин, 1 и 2 режим;  
 № 3 – 280 °С,  $\tau = 3,0$  мин, 1 режим; № 4 – 280 °С,  $\tau = 3,0$  мин, 2 режим;  
 № 5 – 280 °С,  $\tau = 2,0$  мин, 1 и 2 режим; № 6 – 280 °С,  $\tau = 4,0$  мин, 1 и 2 режим;  
 № 7 – 300 °С,  $\tau = 3,0$  мин, 1 и 2 режим (где  $\tau$  – время обработки)

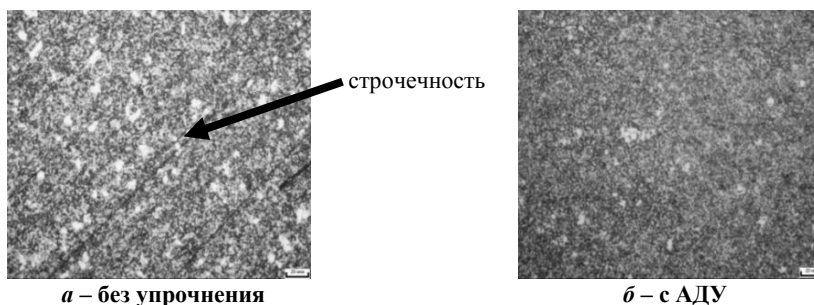
Рисунок 5 – Изменение износа по задней поверхности  $h_z$  от пути резания при фрезеровании стали 45

Разработана технология АДУ концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, отличающаяся тем, что упрочнение осуществляется при давлении воздуха 0,16 МПа последовательно в течение 3 минут на режиме 1 с частотой

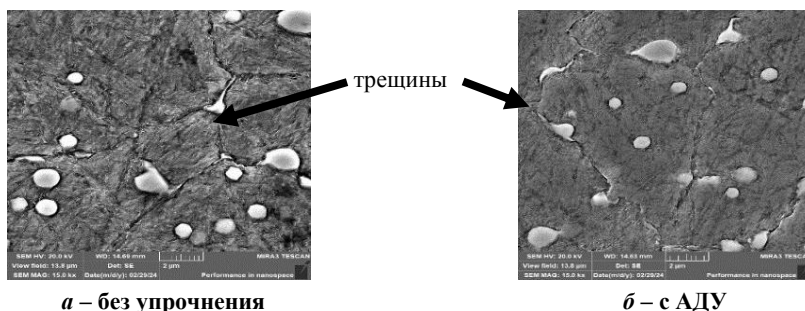
154 Гц и режиме 2 с частотой 168 Гц, перед каждым из которых предварительно осуществляется нагрев инструмента до температуры хладноломкости 280 °С с выдержкой в течение 30 минут, после чего производится двукратный нагрев до температуры 160 °С с последующим остыванием до комнатной температуры.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям структуры, фазового состава и физико-механических свойств быстрорежущей стали.

Установлено, что АДУ стали Р6М5 обеспечивает устранение дефекта структуры в виде строчечности (рисунок 6) и сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций. На образцах из Р6М5 без упрочнения (рисунок 6, а) явное присутствие продольных деформационных линий – строчечность. Уменьшается количество и размер трещин (рисунок 7).



**Рисунок 6 – Микроструктура стали Р6М5**



**Рисунок 7 – Трещины в структуре стали Р6М5**

Рентгеноструктурный анализ образцов: № 1 – исходный; № 2 – № 4 – после упрочнения АДУ на режимах 1, 2 и 1+2 (рисунок 8, таблица 2) позволил выяснить, что после АДУ образца № 2 на режиме 1 фазы  $\alpha$ -Fe и состав карбидов сохраняются, при этом доля карбидов увеличилась с 32,73 % до 42,75 %. Значения величины физического уширения фазы  $\alpha$ -Fe составляют  $\beta_{110} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  рад и  $\beta_{220} = 31,29 \cdot 10^{-3}$  рад. Для фазы  $\alpha$ -Fe близкие значения отношения  $\beta_{220} / \beta_{110} = 3,75$  к значению отношения  $\text{tg}\theta_{220} / \text{tg}\theta_{110} = 3,81$ . Значения плотности дислокаций составляет  $\rho \approx 1,321 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .



После обработки образца № 4 на режиме 1+2 фазы  $\alpha$ -Fe и состав карбидов также сохраняются. Доля карбидов увеличилась до 55,59 %. Уменьшается количество и размер трещин. Значение плотности дислокаций составляет  $\rho \approx 2,1731 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Таблица 2 – Фазовый состав, микро- и макронапряжения, плотность дислокаций

Номер образца	Фазовый состав (hkl)	Микронапряжения, %	Макронапряжения, ГПа	Плотность дислокаций, $\rho, 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Исх	$\alpha$ Fe (110)	0,879944	0,4391	4,0560
2	$\alpha$ Fe (110)	0,670120	-2,4854	1,3210
3	$\alpha$ Fe (110)	0,442619	-2,3392	1,1925
4	$\alpha$ Fe (110)	0,851220	-1,7544	2,1731

– сжатие; +растяжение

Установлено, что после АДУ быстрорежущей стали Р6М5 изменяются исходные растягивающие макронапряжения на напряжения сжатия в 4,9–6,6 раз, уменьшаются микронапряжения в 1,3–2,0 раза и плотности дислокаций в 1,8–3,4 раза, уменьшаются размеры карбидной фазы до 1,8 раз (с 10 мкм до 5,5–6 мкм), при этом после упрочнения доля карбидных включений размерного класса № 1 (до 1 мкм) увеличивается в 1,17–1,43 раза и уменьшается наименьший размерный класс с 0–1 мкм до 0–0,5 мкм.

Некоторое уменьшение на образце № 4, обработанного на режимах 1 и 2 при АДУ, величины напряжений и плотности дислокаций можно объяснить тем, что на режимах 1 и 2 происходят в быстрорежущей стали изменение формы и количества карбидных включений, процесс формирования которых именно и осуществляется за счет перемещения дислокаций в напряженном состоянии.

Установлено, что при АДУ быстрорежущей стали Р6М5 повышается ударная вязкость на 37–43 %, достигая 65,6 кДж/м<sup>2</sup>, на оптимальных режимах АДУ: нагрев до температуры 280 °С перед каждым упрочнением и двукратное упрочнение в течение 3 мин сначала на частоте 154 Гц, а затем на частоте 168 Гц. Чем ниже исходная (до упрочнения) ударная вязкость быстрорежущей стали, тем больше рост повышения ударной вязкости после АДУ.

**В пятой главе** представлены методики измерения и определения износа с использованием полнофакторного планирования экспериментов, а также результаты экспериментальных исследований износа концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 с АДУ, при процессах прерывистого резания.

Разработанная методика измерения износа зуба фрезы позволила устранить погрешности измерения по криволинейной режущей кромке зуба (рисунок 9).

Величина износа по задней поверхности  $h_3$  (рисунок 9, б) равна разнице расстояний между длиной режущей кромки до износа  $L_{II}$  и после износа  $L_I$ :

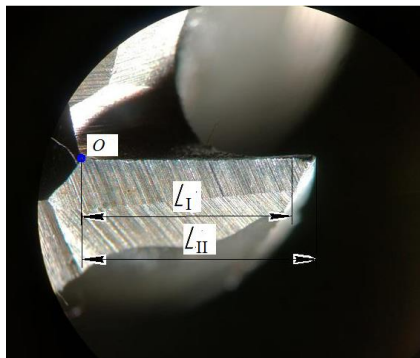
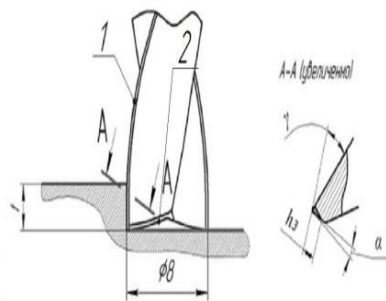
$$h_3 = L_{II} - L_I. \quad (5)$$

В качестве количественной оценки износа выбиралась величина фаски износа по задней поверхности режущего лезвия  $h_3$  от пути резания  $L$  в виде степенной функции:

$$h_3 = a \cdot L^n, \quad (6)$$

где  $a$  – величина износа от пути резания;

$n$  – показатель интенсивности величины износа.



**а** **б**  
**1** – криволинейная режущая кромка,  $L_I$  – длины режущей кромки  
**2** – вспомогательная режущая кромка фрезы после износа,  $L_{II}$  – до износа  
**Рисунок 9** – Схема резания (**а**) и вид лезвия концевой фрезы (**б**) со стороны вспомогательной режущей кромки

Путем логарифмирования (**б**)  $a$  и  $n$  определялись выражениями:

$$a = \frac{h_{3i}}{2L_i^n} + \frac{h_{31}}{2L_1^n}; \quad n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3i} - h_{31}}{L_i - L_1}, \quad (7)$$

где  $h_{3i}$  и  $h_{31}$  – значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно;

$L_i$  и  $L_1$  – значения пути в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно.

Проведенные полнофакторные исследования износа  $h_3$  концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 с АДУ, позволили смоделировать зависимости  $h_3$  от пути резания  $L$  и режимов резания ( $v$  – скорость резания,  $s_z$  – подача на зуб,  $t$  – глубина резания) для концевых фрез из стали Р6М5 (таблица 3).

**Таблица 3** – Зависимости износа  $h_3$  от пути резания  $L$  для концевых фрез из Р6М5 при фрезеровании заготовок из стали 45

№	Режимы резания			Зависимости износа $h_3$ от пути резания $L$	
	$v$ , м/мин	$s_z$ , мм/зуб	$t$ , мм	Р6М5 без АДУ	Р6М5 с АДУ
1	15,83	0,0334	1,3	$h_3 = 0,01L^{0,46}$	$h_3 = 0,013L^{0,41}$
2	12,56	0,033	1,3	$h_3 = 0,005L^{0,56}$	$h_3 = 0,006L^{0,51}$
3	15,83	0,0334	2,1	$h_3 = 0,009L^{0,5}$	$h_3 = 0,014L^{0,42}$
4	15,83	0,0334	0,5	$h_3 = 0,014L^{0,42}$	$h_3 = 0,014L^{0,4}$
5	15,83	0,02	1,3	$h_3 = 0,01L^{0,53}$	$h_3 = 0,015L^{0,44}$
6	15,83	0,051	1,3	$h_3 = 0,009L^{0,47}$	$h_3 = 0,009L^{0,44}$
7	20,10	0,033	1,3	$h_3 = 0,027L^{0,36}$	$h_3 = 0,032L^{0,32}$

Зависимостями (таблица 3) рекомендовано пользоваться при определении прогнозируемой величины износа концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ.

Установлено, что при режимах резания: скорость 12,56–20,1 м/мин, подача на зуб 0,02–0,051 мм/зуб, глубина резания 0,5–2,1 мм, при фрезеровании заготовок из стали 45 концевые фрезы из стали Р6М5 с АДУ обеспечивают относительно неупрочненных фрез снижение износа по задней поверхности на 19–40 %.

**Шестая глава** посвящена технологическому обеспечению ресурса концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 путем упрочнения АДУ и оптимизации режимов резания, внедрения результатов исследований в производство и в образовательный процесс.

Методом математического моделирования определены зависимости ресурса концевых фрез Ø8 Р6М5, не упрочненных  $T_{\text{рн}}$  и упрочненных  $T_{\text{ру}}$  АДУ, при обработке стали 45:

$$T_{\text{рн}} = 10^{-3} v s_z (-166,1v^2 + 5451,2v - 10463786,7s_z^2 + 932315,7s_z - 2530,8t^2 + 4896t - 58886); \quad (8)$$

$$T_{\text{ру}} = 10^{-3} v s_z (-194,9v^2 + 6483,1v - 9680439s_z^2 + 1032595,4s_z - 2763,2t^2 + 3905,6t - 66435). \quad (9)$$

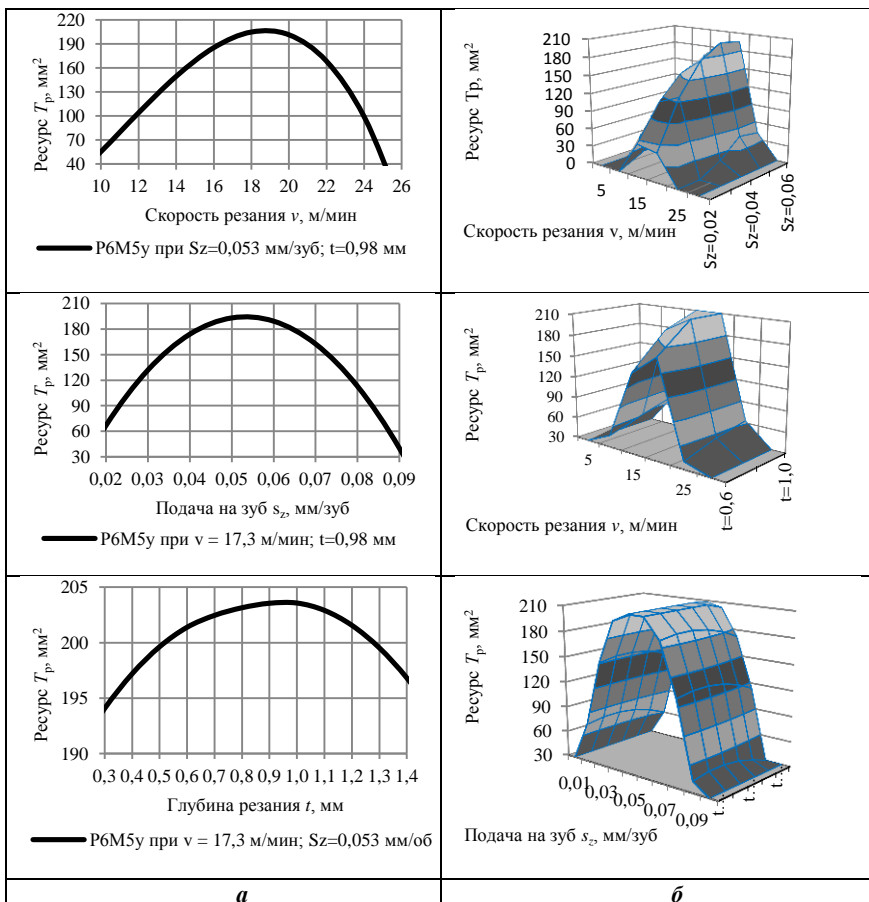
Оптимизация зависимостей (8) и (9), изображенных в графическом виде на рисунке 10, от режимов резания показала, что наибольшее влияние на ресурс инструмента с АДУ оказывает скорость резания (87 %), затем подача на зуб (12 %), глубина резания оказывает незначительное влияние (1 %). В отличие от инструмента без АДУ, для которого влияние скорости резания 19,6 %, подачи на зуб 78,0 %, глубины резания 2,4 %. Что надо учитывать при назначении режимом резания. Установлено, что определенная комбинация режимов резания для концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ, оказывает существенное влияние на величину износа по сравнению с неупрочненным инструментом.

Предложены принципы оптимизационного управления при назначении режимов обработки концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым воздействием – необходимо работать на повышенных скоростях резания и подачах на зуб.

Определены оптимальные значения скорости резания 17,3 м/мин, подачи на зуб 0,053 мм/зуб и глубины резания 0,98 мм, при которых обеспечивается максимальный ресурс концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 с АДУ, равный 16 400 мм<sup>2</sup>. В то время как, оптимальные значения скорости резания 16,4 м/мин, подачи на зуб 0,045 мм/зуб и глубины резания 0,97 мм, при которых обеспечивается максимальный ресурс концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения, равный 8972 мм<sup>2</sup>.

Установлено, что при фрезеровании стали 45 концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных АДУ, на оптимальных режимах резания одновременно с увеличением ресурса инструмента в 1,8 раза, за счет увеличения оптимальной скорости резания на 6 % и подачи на зуб на 18 %, обеспечивается одновременно и повышение производительности обработки на 5,5–8 %.

Результаты исследований внедрены в производство УП «Локомотивное депо Барановичи» с годовым экономическим эффектом в размере 3,8 тыс. руб. и в образовательный процесс УО «Барановичский государственный университет».



**Рисунок 10 – Зависимости ресурса  $T_{py}$  фрез  $\varnothing 8$  P6M5, упроченных методом АДУ, при фрезеровании стали 45 от двух (*a*) и трех (*б*) режимов резания**

Рекомендовано осуществлять механическую обработку заготовок концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали P6M5, упроченным аэродинамическим звуковым воздействием, на повышенных оптимальных технологических режимах резания, определенных путем оптимизации, что позволит обеспечить не только повышение ресурса самого режущего инструмента, но и производительности обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате теоретических исследований влияния кинематики и технологических параметров, таких как радиус и подача на зуб, угол подъема и контакта ре-

жущего лезвия зуба инструмента, процесса резания концевым фрезерным инструментом на изменения толщины и ширины срезаемого слоя, ударов на режущем зубе, касательной составляющей силы резания установлено, из-за того, что зуб фрезы перемещается по циклоиде и имеет прерывистость при контакте с металлом, то происходят изменения толщины срезаемого слоя от 5 и до 13 %, ширины срезаемого слоя пропорционально радиусу фрезы, возникают значительные ударные нагрузки (8,1–8,5 ударов на единице площади срезаемого слоя металла) и изменяются силы резания (касательная составляющая сила резания на зубе инструмента в пределах одного реза изменяется до 30 раз, от 1,4 до 42,1 Н/град), что явилось теоретическим обоснованием возможности и правомерность применения метода АДУ, наиболее эффективного при процессах прерывистого резания со значительными ударными нагрузками, для повышения ресурса такого рода инструмента, и основанием выбора объекта и предмета исследований [7; 8; 11; 17].

2. В результате расчета параметров АДУ установлено, что воздействие генерируемой волновой энергии  $(5,4-2,7) \cdot 10^{-19}$  Дж в диапазоне частот 150–170 Гц и амплитуд 130–140 мкм, генерируемые при давлении воздуха 0,16 Мпа, на атомы углерода и легирующих элементов быстрорежущей стали Р6М5 вызывает в материале диффузионные процессы, приводящие к выходу атомов углерода и легирующих элементов из перенапряженных кристаллических решеток  $\alpha$ -Fe, что приводит к устранению искажений решеток, снижению внутренних напряжений, при этом в разработанной установке АДУ атомы с наименьшими расстояниями в кристаллической решетке, смещаются на частоте 154 Гц (режим 1), а атомы, связанные наибольшими расстояниями в кристаллической решетке на частоте 168 Гц (режим 2), и таким образом применение двух последовательных режимов 1 и 2 обеспечивает устранение дефектов в кристаллических решетках, формы и количества карбидных включений, снижение внутренних напряжений [6; 14; 15].

3. На базе результатов экспериментальных исследований влияния технологических режимов упрочнения инструмента из быстрорежущих сталей аэродинамического звукового воздействия (резонансная частота, время ее воздействия, температура предварительного нагрева и выдержки инструмента) на дефект структуры в виде строчечности и ориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз, балл карбидной неоднородности, размеры первичных карбидов и их количество, макро- и микронапряжения, плотность дислокаций, твердость и ударную вязкость разработана двухстадийная технология упрочнения методом АДУ концевой фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей: обработка в течение 3 минут на режиме 1 с частотой 154 Гц, а затем на режиме 2 с частотой 168 Гц, перед которыми предварительно нагревается инструмент до температуры 280 °С с выдержкой в течение 30 минут, после чего производится двухкратный нагрев до температуры 160 °С с последующим остыванием до комнатной температуры, которая обеспечивает устранение погрешностей структуры в виде строчечности и ориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз, снижение балла карбидной неоднородности на 1 балл, уменьшение размеров карбидной фазы до 1,8 раз (с 10 мкм до 5,5–6 мкм), при этом после упрочнения доля карбидных включений размерного класса № 1 (до 1 мкм) увеличивается в 1,17–1,43 раза и уменьшается наименьший размерный класс с 0–1 мкм до 0–0,5 мкм, изменения исходных растягивающих микронапряжений на напряжения сжатия в 4,9–6,6 раз, уменьшения микронапряжений в 1,3–2,0 раза и плотности дислокаций в

1,8–3,4 раза, что обеспечивает повышение ударной вязкости на 37–43 % [1–6; 10–15; 18; 19].

4. В результате исследований износа концевых фрезерных инструментов из быстрорежущей стали Р6М5 после АДУ на различных режимах обработки (скорости и глубины резания, подачи на зуб) получены зависимости величины износа от пути резания, на основании которых определены рациональные диапазоны режимов резания: скорость резания 12,56–20,1 м/мин, подача на зуб 0,02–0,051 мм/зуб, глубина резания 0,5–2,1 мм, обеспечивающие снижение износа по задней поверхности инструмента на 19–40 %, при этом установлено, что комбинация режимов резания для инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым воздействием, оказывает на 15 % большее влияние на величину износа по сравнению с неупрочненным инструментом [1; 3; 9; 10; 11; 13–17; 20].

5. В результате экспериментальных и теоретических исследований влияния технологических режимов резания при обработке стали 45 концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 на ресурс инструмента, установлено, что при обработке инструментом с АДУ со скоростью резания 17,3 м/мин; подача на зуб 0,053 мм/зуб; глубина резания 0,98 мм, обеспечивается увеличение ресурса инструмента до 1,8 раза в сравнении с инструментом без упрочнения, для которого оптимальные значения скорости резания 16,4 м/мин, подачи на зуб 0,045 мм/зуб и глубины резания 0,97 мм, наряду с одновременным повышением производительности обработки на 7,5 % [1; 3; 9–11; 14–17; 20].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана и изготовлена установка аэродинамического звукового упрочнения и создана технология упрочнения концевых фрезерных инструментов из быстрорежущих сталей аэродинамическим звуковым воздействием, а также технология механической обработки таким инструментом [3; 5; 6; 11; 14; 15]. Результаты выполненной работы внедрены в производство УП «Локомотивное депо Барановичи» (Республика Беларусь) при обработке различных по номенклатуре стальных деталей концевым фрезерным инструментом из быстрорежущих сталей, упрочненным аэродинамическим звуковым методом, что позволило повысить стойкость инструмента в 1,6 раза и получить годовой экономический эффект 3,8 тыс. руб.

Результаты работы внедрены в образовательный процесс учреждения образования «Барановичский государственный университет» при проведении лекций, практических и лабораторных занятий по дисциплинам: «Режущий инструмент», «Теория резания», «Технология машиностроения», «Основы технологии машиностроения» специальности 1-36 01 01 Технология машиностроения и «Эффективные методы упрочнения деталей машин» специальности 1-36 80 02 Инновационные технологии в машиностроении для студентов 1–4 курсов, при выполнении курсовых и дипломных проектов, магистерских диссертационных работ, НИРС.

Область рационального использования теоретических и опытно-экспериментальных исследований не ограничивается применением метода АДУ для упрочнения концевых фрезерных инструментов из быстрорежущих сталей. Перспективным является использование полученных методик, математических моделей и алгоритмов применительно не только к концевому металлорежущему инструменту из быстрорежущих сталей, но и к любому металлорежущему инструменту, работающему с ударными нагрузками [6].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Жигалов, А. Н. Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В35, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2020. – Вып. № 8. – С. 69–78.

2. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2020. – Вып. № 8. – С. 53–68.

3–А. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2021. – Вып. № 2(10). – С. 24–41.

4. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2022. – Вып. № 1(11). – С. 14–23.

5. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования физико-механических свойств быстрорежущих сталей, упрочненных аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 17–29.

6. Горавский, И. А. Технология и режимы аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, К. С. Винничек // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2022. – Вып. № 2(12) – С. 4–15.

7–А. Жигалов, А. Н. Кинематическое моделирование процесса резания концевым фрезерным инструментом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, С. И. Русан, Д. Г. Шатуров // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 1. – С. 29–38.

8. Жигалов, А. Н. Интенсивность ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Л. Л. Сотник // Вестник БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2023. – Вып. №. 1 (13). – С. 14–22.

9. Жигалов, А. Н. Технологическое обеспечение ресурса концевого фрезерного инструмента из стали Р6М5 / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 4 (81). – С. 5–13.

### Материалы конференций и докладов

10. Горавский, И. А. Методика проведения измерения износа вращающегося режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2020. – С. 37–38.

11. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ пластин из твердого сплава Т5К10 при токарной обработке прерывистых поверхностей / А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина, И. А. Горавский //

Наука-практике: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. / БарГУ. – Барановичи, 2020. – С. 110–111.

12. Горавский, И. А. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на стойкость осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука-практике: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. / БарГУ. – Барановичи, 2020. – С. 102–104.

13. Горавский, И. А. Исследование износа концевых фрез Р6М5, упрочненных аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Новые материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Молодых ученых, Могилев, 29–30 окт. 2020 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2020. – С. 32.

14. Горавский, И. А. Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина / Векторы инновационного развития: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 декабря 2020 г. / БарГУ. – Барановичи, 2020. – С. 64–66.

15. Горавский, И. А. Определение оптимальных параметров аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука-практике: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 13 мая 2021 г. / БарГУ. – Барановичи, 2021. – С. 135–137.

16. Горавский, И. А. Определение оптимальных режимов резания для достижения наибольшей стойкости осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим методом / И. А. Горавский, Д. Д. Богдан, А. Н. Жигалов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Молодых ученых, Могилев, 28–29 окт. 2021 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2021. – С. 38.

17. Богдан, Д. Д. Методика проведения экспериментов по исследованию сил резания при разрушении калийных пород / Д. Д. Богдан, И. А. Горавский, А. Н. Жигалов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Молодых ученых, Могилев, 28–29 окт. 2021 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2021. – С. 31.

18. Горавский, И. А. Исследование структурного состояния карбидных фаз быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 26 апреля 2022 г. / НИЦ МС. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 5–8.

19. Горавский, И. А. Исследование ударной вязкости быстрорежущих сталей, упрочненных аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, М. В. Башаримов // Наука-практике: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 19 мая 2022 г. / БарГУ. – Барановичи, 2022. – С. 16–18.

20. Горавский, И. А. Методология повышения ресурса инструмента из быстрорежущей стали аэродинамическим звуковым воздействием / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Е. А. Дерман // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы V Междунар. науч.-техн. конф., 20–21 октября 2022 г. / БрГТУ. – Брест, 2022. – С. 104–107.

## РЭЗІЮМЭ

Гараўскі Ігар Андрэвіч

**Тэхналагічнае забеспячэнне рэсурсу канцавога фрэзернага інструмента з хуткарэжучай сталі Р6М5, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам**

**Ключавыя словы:** канцавая фрэза, рэсурс, аэрадынамічнае гукавое ўздзеянне, хуткарэжучая сталь, тэхналогія ўмацавання, ударная вязкасць, мікраструктура

**Мэта працы:** тэхналагічнае забеспячэнне рэсурсных характарыстык канцавога фрэзернага інструмента з хуткарэжучай сталі Р6М5, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам.

**Метады даследавання і апаратура:** ужываліся тэрэтычныя метады даследавання, якія базуюцца на законах тэрэтычнай механікі, дыферэнцыяльнага і інтэгральнага вылічэнняў, тэхналогіі машынабудавання і матэрыялазнаўства. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся з выкарыстаннем сучаснай вымяральной і рэгіструючай апаратуры, распрацаваных прылад і інструментаў. Апрацоўку эксперыментальных дадзеных ажыццяўлялі з дапамогай матэматычнага апарата і метадаў статыстыкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** выканана матэматычнае мадэляванне, якое апісвае ўмовы працы канцавога фрэзернага інструмента. Распрацавана і даследавана тэхналогія ўмацавання канцавога фрэзернага інструмента з хуткарэжучай сталі аэрадынамічным гукавым уздзеяннем і ўстаноўлены аптымальныя рэжымы ўмацавання. Даследавана мікраструктура і фізіка-механічныя ўласцівасці хуткарэжучай сталі Р6М5 пасля АДУ. Атрыманы залежнасці для разліку ўстойлівасці і рэсурсу канцавога фрэзернага інструмента, умацаванага метадам АДУ. Вызначаны аптымальныя рэжымы рэзанання, пры якіх забяспечваецца максімальная ўстойлівасць канцавога фрэзернага інструмента з хуткарэжучай сталі Р6М5, умацаванага аэрадынамічным гукавым уздзеяннем.

**Вобласць выкарыстання:** машынабудаўнічыя прадпрыемствы, фрэзерная апрацоўка канцавымі фрэзамі з хуткарэжучай сталі Р6М5.

## РЕЗЮМЕ

Горавский Игорь Андреевич

### **Технологическое обеспечение ресурса концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом**

**Ключевые слова:** концевая фреза, ресурс, аэродинамическое звуковое воздействие, быстрорежущая сталь, технология упрочнения, ударная вязкость, микроструктура

**Цель работы:** технологическое обеспечение ресурсных характеристик концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 упрочненного аэродинамическим звуковым методом.

**Методы исследования и аппарата:** применялись теоретические методы исследования, базирующиеся на законах теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления, технологии машиностроения и материаловедения. Экспериментальные исследования проводились с использованием современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, разработанных устройств и инструментов. Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью математического аппарата и методов статистики.

**Полученные результаты и их новизна:** выполнено математическое моделирование описывающие условия работы концевой фрезерного инструмента. Разработан и исследована технология упрочнения концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали аэродинамическим звуковым воздействием и установлены оптимальные режимы упрочнения. Исследованы микроструктура и физико-механические свойства быстрорежущей стали Р6М5 после АДУ. Получены зависимости для расчета стойкости и ресурса концевой фрезерного инструмента, упрочненного методом АДУ. Определены оптимальные режимы резания, при которых обеспечивается максимальная стойкость концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым воздействием.

**Область применения:** машиностроительные предприятия, фрезерная обработка концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5.

## SUMMARY

Goravsky Igor Andreevich

### **Technological support of the resource of the end milling tool from R6M5 hss steel, hardened by the aerodynamic sound method**

**Key words:** end mill, resource, aerodynamic sound effect, high speed steel, hardening technology, impact strength, microstructure

**The purpose of the work:** technological support of the resource characteristics of the end milling tool made of high-speed steel R6M5 hardened by the aerodynamic sound method.

**Research methods and equipment:** theoretical research methods based on the laws of theoretical mechanics, differential and integral calculus, mechanical engineering technology and materials science were used. Experimental studies were carried out using modern measuring and recording equipment, developed devices and tools. Processing of experimental data was carried out with the help of mathematical apparatus and statistical methods.

**The results obtained and their novelty:** a mathematical modeling was performed describing the operating conditions of the end milling tool. The technology of hardening the end milling tool made of high-speed steel by aerodynamic sound impact has been developed and researched, and the optimal hardening modes have been established. The microstructure and physico-mechanical properties of R6M5 high-speed steel after ADU have been studied. The dependences for calculating the durability and resource of the end milling tool hardened by the ADU method are obtained. The optimal cutting conditions are determined, which ensure the maximum durability of the end milling tool made of R6M5 high-speed steel, hardened by aerodynamic sound impact.

**Scope:** machine-building enterprises, milling with end mills made of R6M5 high-speed steel.

Научное издание

**ГОРАВСКИЙ**  
Игорь Андреевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА КОНЦЕВОГО  
ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5,  
УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки