

УО «БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.789: 621.91

**ЖИГАЛОВ**  
Анатолий Николаевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ  
ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ**

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

Минск, 2021

Работа выполнена в учреждении образования «Барановичский государственный университет» и Межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет».

Научный консультант

**ШЕЛЕГ Валерий Константинович,**

член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии БССР, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**МАРУКОВИЧ Евгений Игнатьевич,**

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией кинетики кристаллизации ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси»;

**ДЕВОЙНО Олег Георгиевич,**

доктор технических наук, профессор, заведующий ОНИЛ плазменных и лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»;

**МИХАЙЛОВ Михаил Иванович,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехнические системы» УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»

Оппонирующая организация

ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита диссертации состоится 17 декабря 2021 г. в 14<sup>00</sup> 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; телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 10 ноября 2021 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.05.03,  
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Жигалов А. Н., 2021

© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время твердосплавный металлорежущий инструмент широко применяется в современном машиностроении для обработки различных поверхностей деталей машин. Мировой рынок металлообрабатывающего твердосплавного инструмента в 2020 году составил более 22 млрд долларов США. В Республике Беларусь твердосплавный инструмент практически не производится, а ежегодно приобретает по импорту на сумму более 20,0 млн долларов США. Известно, что при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов стоимость затрат на инструмент достигает 30–70 % от себестоимости изготовления изделия. При этом, около 60 % механической обработки деталей машин связано с процессами прерывистого резания (фрезерование, в том числе фрезерно-карусельное резание, строгание, долбление, токарная обработка при наличии на деталях выступов, каналов, сверление, резьбонарезание и ряд других процессов), которые обусловлены частыми циклическими изменениями силового и температурного полей на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятным расположением режущего клина при резании, наличием ударных нагрузок и других явлений. Наряду с высокой твердостью ( $HRA\ 84-92$ ) такие недостатки твердых сплавов, как их повышенная хрупкость, относительно невысокие значения предела прочности при изгибе (980–2000 МПа) и ударной вязкости (25–35 кДж/м<sup>2</sup>) значительно снижают эффективность обработки деталей машин в условиях процессов прерывистого резания, при этом стойкость твердосплавного металлорежущего инструмента является невысокой, в несколько раз ниже, чем при непрерывном резании. В связи с чем для процессов прерывистого резания требуется наиболее совершенный твердосплавный металлорежущий инструмент, обладающий одновременно высокими показателями по твердости, ударной вязкости и пределу прочности при изгибе.

Мировые производители твердосплавного инструмента не в состоянии, по причине больших затрат, решить проблему повышения стойкости инструмента, предназначенного для процессов прерывистого резания, из-за образования при изготовлении в твердых сплавах дефектов в кристаллических решетках и большой плотности дислокаций ( $0,3-1,1 \cdot 10^6\ м^{-2}$ ), являющихся основными источниками снижения прочностных характеристик твердых сплавов.

Известные методы упрочнения (электронно-лучевые, плазменные, электровзрывное легирование, лазерные, электрофизические, термогидрохимические, термические, высокоэнергетическими ионными пучками, алмазные, абразивная обработка, поверхностно-пластическое деформирование, ионная имплантация, тлеющим разрядом, плазменно-детонационные, магнитно-импульсные, криогенная обработка, радиационное облучение гамма-лучами, рентгеновское излучение, ультразвуковое и другие) не позволяют повышать вязкопрочностные характеристики твердых сплавов при сохранении высоких свойств по твердости, эффективно достигать повышения стойкости твердосплавных инструментов, работающих на удар.

В этой связи эффективным направлением является создание новых методов упрочнения, основанных на высокоэнергетических и низкотемпературных воздействиях, к которым и относится метод аэродинамического звукового упрочнения. Ре-

курс твердосплавного металлорежущего инструмента после аэродинамического звукового упрочнения при небольшой добавленной стоимости (до 5 % от себестоимости изготовления) в условиях прерывистого резания увеличивается до 4,2 раза, что происходит благодаря повышению предела прочности при изгибе до 2230 МПа и ударной вязкости до 42 кДж/м<sup>2</sup> при сохранении высокой твердости до *HRA* 92. Тем самым решается важная народнохозяйственная проблема, связанная с уменьшением закупаемого по импорту твердосплавного инструмента.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Работа выполнена на основе исследований, проведенных в ходе реализации государственной программы научных исследований НАН Беларуси на 2016–2020 годы «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», утвержденной Постановлением Совета Министров от 10.06.2015 г. № 483, по заданию «Разработка теоретических и технологических основ механизма аэродинамического упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания» (№ ГР 20190043), выполнения темы научно-исследовательских, инновационных проектов кафедры технологии и оборудования машиностроения УО БарГУ «Разработка теоретических и технологических основ применения метода аэродинамического звукового упрочнения для различных видов инструмента». Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы в части создания новых многофункциональных материалов и специальных материалов с заданными свойствами (пункт 3 Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка теоретических и технологических основ аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного металлорежущего инструмента для повышения его эффективности при процессах прерывистого резания.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1) установить математические зависимости, описывающие возникающие энергии при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов от температурного нагрева и резонансных волн в звуковом спектре частот, способные уменьшать искажения кристаллических решеток и плотность дислокаций в твердых сплавах;

2) разработать механизм создания энергий за счет аэродинамического звукового воздействия на твердосплавный инструмент, образующихся от генерации резонансных частот и амплитуд и способных обеспечить смещение различных по массам атомов кристаллических решеток компонентов, входящих в твердые сплавы, определить оптимальные параметры процесса;

3) разработать математические модели и методику параметрической оптимизации износа и ресурса твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, позволяющие устанавливать оптимальные технологические режимы упрочнения и резания, с помощью которых обеспечивается повышенный ресурс инструмента;

4) разработать реологическую модель износа режущего лезвия инструмента, учитывающую упругие и деформационные свойства обрабатываемого материала и инструмента, технологические параметры процесса резания (подачу и глубину резания, углы главной и вспомогательной режущей кромки, жесткость технологической системы), а также условия протекания процесса резания (ширина и толщина срезаемого слоя, время обработки), с использованием которой произвести имитационное исследование процессов возникающих в зоне резания инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом.

5) исследовать влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на структуру, свойства, износ, стойкость и ресурс твердосплавного инструмента;

6) установить основные закономерности износа твердосплавного инструмента от параметров аэродинамического звукового упрочнения, условий протекания процесса прерывистого резания;

7) разработать и внедрить новые технологические процессы упрочнения аэродинамическим звуковым методом металлорежущего инструмента, предназначенного для процессов прерывистого резания.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель образования внешней энергии, воздействующей на атомы компонентов твердого сплава, при аэродинамическом звуковым упрочнении, позволившая установить взаимосвязи возникающих энергий от параметров кристаллической решетки, температуры нагрева твердого сплава, величин резонансных частот и амплитуд, на основании которых предложен механизм аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента.

2. Разработаны научные основы теории аэродинамического звукового упрочнения твердых сплавов, устанавливающие взаимосвязи между колебательными процессами в кристаллической решетке и характером энергетического воздействия от температуры нагрева и резонансных волн в звуковом спектре частот для достижения и сохранения эффекта уменьшения дефектности кристаллической структуры и плотности дислокаций в твердых сплавах.

3. Разработаны математические модели и методика параметрической оптимизации износа и ресурса инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, учитывающие взаимосвязи между износом и ресурсом в виде степенных зависимостей от однофакторного и многофакторного влияния режимов резания, позволяющие осуществлять прогнозирование режимов упрочнения, оптимальных величин ресурса инструмента и режимов резания.

4. Разработана реологическая модель износа режущего лезвия инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, учитывающая упругие и деформационные свойства обрабатываемого материала и инструмента, технологические параметры процесса резания (подачу и глубину резания, углы главной и вспомогательной режущей кромки, жесткость технологической системы), а также условия обработки (ширина и толщина срезаемого слоя, время обработки), позволяющая при имитационном моделировании процесса резания устанавливать эффекты снижения контактных давлений, скорости скольжения, интенсивности изнашивания, температуры и сил резания, за счет которых достигается повышение работоспособности твердых сплавов после аэродинамического звукового упрочнения в условиях прерывистого резания.

5. Установлены эффекты структурно-фазовых изменений в твердых сплавах при аэродинамическом звуковом воздействии, обусловленный энергетическими (температурным и волновым) воздействиями с генерируемыми активационными и диссипативными процессами в возникающей неустойчивой структуре упрочняемого сплава, от резонансных звуковых волн и увеличенной запасенной потенциальной энергии у атомов кристаллических решеток от нагрева до температуры хладноломкости, а также сохранения достигнутых результатов посредством дополнительных стабилизационных температурных процессов, позволившие создать равновесные конфигурации кристаллических решеток с уменьшенной дефектностью и плотностью дислокаций, обеспечивающие повышенные свойства по ударной вязкости и пределу прочности при изгибе при сохранении высокой твердости по сравнению с неупрочненными твердыми сплавами.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель образования внешней энергии, воздействующей на атомы компонентов твердого сплава, при аэродинамическом звуковом упрочнении, основанная на дифференцированном теоретическом анализе колебательных процессов, происходящих в кристаллических решетках твердых сплавов, от температурного нагрева и воздействия резонансных волн в звуковом спектре частот, позволяющая установить уровень внешней энергии, достаточный для релаксации структурных дефектов, уменьшения плотности дислокаций в твердых сплавах за счет смещения атомов кристаллических решеток из существующего неравновесного состояния и обеспечения повышения прочностных свойств твердых сплавов.

2. Результаты теоретических исследований кинетики переноса энергии при аэродинамическом звуковом упрочнении твердого сплава, описанной с помощью термодинамической модели, устанавливающей взаимосвязь между энергетическими (температурным и волновым) воздействиями с генерируемыми активационными и диссипативными процессами в возникающей неустойчивой структуре упрочняемого сплава, которые позволили разработать концептуальную модель, описывающую структурные изменения в твердом сплаве под воздействием энергии от резонансных звуковых волн и увеличенной запасенной потенциальной энергии у атомов кристаллических решеток от нагрева до температуры хладноломкости, а также сохранение достигнутых результатов посредством дополнительных стабилизационных температурных процессов, и тем самым обосновать возможность получения новых равновесных конфигураций кристаллических решеток с уменьшенной дефектностью и плотностью дислокаций.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния режимов аэродинамической звуковой обработки твердых сплавов, зависящих от геометрических размеров резонансной камеры, давления и объема подаваемого воздуха, резонансных частот и амплитуд, образующихся от волн, возникающих от колебаний в изменяющемся воздушном потоке продольных параллельных стенок резонансной камеры, позволившие определить оптимальные резонансные частоты и амплитуды, при которых возникают энергии, достаточные для смещения атомов кристаллических решеток кобальта и компонентов, входящих в карбиды, обеспечивающие упорядочение структуры твердых сплавов.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовое состояние и свойства (ударную вязкость, предел прочности при изгибе, плотность, твердость и глубину упрочнения) различных групп твердых сплавов, позволившие установить в структуре твердых сплавов эффекты залечивания пор, увеличения пластичности кобальтовой связи, уменьшения плотности дислокаций и искажений кристаллических решеток атомов компонентов твердых сплавов, обеспечивающие повышение ударной вязкости и предела прочности при изгибе при сохранении исходной плотности и высокой твердости твердых сплавов по сравнению с неупрочненными твердыми сплавами.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов аэродинамической звуковой обработки и режимов резания на износ твердосплавного инструмента с использованием разработанной методики параметрической оптимизации износа и ресурса режущего инструмента, учитывающей взаимосвязи между износом и ресурсом в виде степенных зависимостей от однофакторного и многофакторного влияния режимов резания, позволившие установить степень влияния режимов упрочнения и резания на износ и ресурс инструмента, обосновать выбор повышенных подач при резании упрочненным инструментом, а также определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие не только максимальное повышение ресурса инструмента, но и производительности обработки по сравнению с неупрочненным твердосплавным инструментом.

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента на процесс резания при фрезерно-карусельной обработке, являющегося наиболее типичным процессом прерывистого резания, характеризующегося изменением сил резания не только при врезании и выходе инструмента из обрабатываемого материала, но и в процессе самого резания из-за непостоянства припуска и переменной величины мгновенной толщины срезаемого слоя металла, позволившие установить связь между структурными изменениями в твердых сплавах, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, и степенью влияния условий протекания процесса прерывистого резания (количество ударов, интенсивность изменения нагрузки), а также определить область режимов фрезерной обработки, в которой наиболее эффективно применение твердосплавных инструментов, упрочненных аэродинамическим звуковым методом.

7. Результаты теоретических исследований процессов, возникающих в зоне резания твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, проведенных имитационным моделированием с использованием разработанной реологической модели износа лезвия инструмента, учитывающей упругие и деформационные свойства обрабатываемого материала и инструмента, технологические параметры процесса резания (подачу и глубину резания, углы главной и вспомогательной режущей кромки, жесткость технологической системы), а также условия обработки (ширина и толщина срезаемого слоя, время обработки), позволившие установить эффекты снижения контактных давлений, скорости скольжения, интенсивности изнашивания, температуры и сил резания, за счет которых достигается повышение работоспособности твердых сплавов после аэродинамического звукового упрочнения в условиях прерывистого резания.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Постановка цели и задач исследования, методологические подходы к их решению, основные научные и практические результаты, формулировка выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, выполнены лично соискателем и являются итогом многолетней деятельности в области создания и упрочнения волновым воздействием твердосплавного металлорежущего инструмента. Соискателем проведен комплекс теоретических и экспериментальных работ, направленных на разработку и исследование метода аэродинамического звукового упрочнения, математических и реологических моделей, методических и алгоритмических обеспечений, посвященных автоматизации расчетов, анализу и обобщению полученных результатов. Концептуальная проработка направлений исследований осуществлялась совместно с научным консультантом чл.-корр. НАН Беларуси, заслуженным деятелем науки Республики Беларусь, доктором техн. наук, проф. Шелегом В. К. Соавторы совместно опубликованных работ оказывали помощь при обсуждении результатов исследований (д-ра техн. наук, проф. Шатуров Г. Ф., Маслов А. Р., Ступницкий В. В., проф. Жолдобов А. А.), написании монографии (чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. В. К. Шелег). Инженеры Головкин В. М., Панков М. В., канд. техн. наук Шатуров Д. Г. оказывали содействие в подготовке и проведении экспериментальных исследований.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты диссертации доложены и обсуждены на 40 международных научно-технических конференциях и семинарах, основными из которых являются: «Современные технологии обработки деталей из титана, легированных сплавов монолитным твердосплавным инструментом с нанопокрытием» (Рыбинск, 2014); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2015); «Новые материалы, оборудование в промышленности и технологии» (Могилев, 2016); «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития» (Могилев, 2016); «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2017); «Прогресивні технології машинобудування» (Львов, 2018); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2018, 2019); «Содружество наук, Барановичи-2018» (Барановичи, 2018); «Современные проблемы машиностроения» (Гомель, 2018); «Технология-Оборудование-Инструмент-Качество» (Минск, 2018); «Техника и технологии: инновации и качество» (Барановичи, 2019); «Перспективные направления развития технологий машиностроения и металлообработки» (Минск, 2019); «Содружество наук, Барановичи-2019» (Барановичи, 2019); «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (Брест, 2019); «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2019); «Инновации в машиностроении, ИнМаш-2019» (Кемерово, 2019); «Техника и технологии: инновации и качество» (Барановичи, 2019); «Машиностроение и металлообработка» (Могилев, 2019); «Наука-практике» (Барановичи, 2020), «Инновации в машиностроении – 2020» (Минск, 2020), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2020); «Наука-практике» (Минск, 2020), «Инновации в машиностроении, ИнМаш-2020» (Бийск, 2020) и др.

Технологии и устройства для аэродинамического звукового упрочнения демонстрировались на международных, республиканских и областных выставках: V



научно-практической конференции представителей инструментальных производств в рамках Центра компетенций по технологической подготовке производства Объединенной двигателестроительной корпорации, г. Рыбинск, 18–19 сентября 2014 г.; «Металлообработка-2018» 14–18 мая 2018 г., г. Москва; «Металлообработка-2018» 10–13 апреля 2018 г., г. Минск; «Металлообработка-2019» 26–29 марта 2019 г., г. Минск; «Металлообработка-2019» 27–31 мая 2019 г., г. Москва; «Машиностроение и металлообработка» 10 октября 2019 г.; Международная научно-практическая конференция 10–11 октября 2019 г., г. Бобруйск.

По результатам исследований разработаны оборудование и технологические процессы по упрочнению твердосплавных инструментов аэродинамическим звуковым методом, которые использовались при процессах прерывистого резания на 11 предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных технологий АДУ составил 803 670,71 долларов США. Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс УО «Барановичский государственный университет» в лекционных материалах и практическом практикуме по дисциплине «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей», «Технология машиностроения», МОУВО «Белорусско-Российский университет» в курсе лекций «Технология машиностроения», при выполнении курсовых и дипломных проектов, магистерских диссертационных работ.

**Опубликование результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 67 научных работах, в том числе в двух монографиях (27,2 авторских листов), 21 статье, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (21,03 авторских листов), 40 статьях в сборниках научных трудов и докладов на конференциях, 4 патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав с краткими выводами, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 382 страницы. Работа содержит 190 страниц текста, 97 рисунков на 53 страницах, 66 таблиц на 35 страницах, библиографический список в количестве 240 наименований на 15 страницах, список публикаций соискателя из 67 наименований на 7 страницах, 7 приложений на 82 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Введение** содержит оценку современного состояния решаемой проблемы и обоснование актуальности разработки метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента, предназначенного для процессов прерывистого резания.

**Первая глава** посвящена комплексному анализу проблем повышения стойкости твердосплавного инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, путем их решения.

Эффективность процесса резания зависит от условий обработки, подразделяющихся на стабильные, нестабильные и тяжелые (таблица 1).

Таблица 1. – Факторы, влияющие на условия обработки при резании

Стабильные	Нестабильные	Тяжелые
Постоянная глубина и скорость резания, чистовая и полушпательная обработка без ударов	Переменная глубина и скорость резания, черновая обработка, прерывистое резание (до 3 ударов на оборот)	Большая переменная глубина и скорость резания, черновая обработка, прерывистое резание (более 3 ударов на оборот)

Нестабильные и тяжелые факторы свойственны процессам прерывистого резания, к которым относятся методы, связанные со снятием стружки, такие как фрезерование, строгание, долбление, сверление, резьбонарезание, токарная обработка прерывистых поверхностей и другие. Для процессов резания широко используются металлорежущие инструменты, основанные на твердых сплавах, состоящие из зерен тугоплавкого соединения (карбида, нитрида) таких металлов, как вольфрам, титан, тантал, хром, цементированных кобальтом и/или никелем.

Твердосплавные инструменты показывают наибольшую эффективность при стабильных условиях резания и имеют стойкость при процессах прерывистого резания с нестабильными и тяжелыми условиями обработки приблизительно в два раза ниже, чем при непрерывном резании. Причинами повышенного износа твердосплавного инструмента при процессах прерывистого резания являются микросколы режущей кромки, возникающие из-за явлений удара при врезании режущего клина инструмента в материал, и при его выходе из заготовки, частых циклических изменениях силового и температурного полей на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятного расположения режущего клина в процессе резания и других явлений.

Производство твердых сплавов связано с большими температурными, силовыми, деформационными явлениями, в результате чего получаемые твердые сплавы имеют искаженные кристаллические решетки структурных элементов, большую плотность дислокаций. В твердом сплаве плотность дислокаций составляет  $(0,3-1,1) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$ , которая оказывает существенное влияние на механические и физические свойства твердых сплавов. Сформулированы требования, предъявляемые к твердосплавному инструменту, применяемому при процессах прерывистого резания: структура твердого сплава должна быть крупнозернистой (более 2,0 мкм) и однородной (коэффициент однородности менее 3,0), с минимальным количеством пор (не более 0,05 %), с повышенной пластичностью кобальтовой связки и обеспечивать повышенные свойства по ударной вязкости (более 42 кДж/м<sup>2</sup>), пределу прочности при изгибе (свыше 2100 МПа) и высокую твердость (не менее 88 HRA).

Эффективным направлением совершенствования твердосплавного инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, является изменение его структуры упрочняющими технологиями. Предложено классифицировать методы упрочнения твердосплавного инструмента исходя из плотности потока энергии и времени воздействия. Показано, что методы упрочнения, обладающие плотностями потока энергии свыше 1000 Вт/м<sup>2</sup> и временами воздействия до 100 мкс (электронно-лучевые, плазменные, электровзрывное легирование, лазерное непрерывное, лазерное импульсное, текстурирование лазером, лазерная аморфизация, лазерное шоковое, электрофизические (электроэрозионное, электронскровое, электроконтактное, анодно-механическое, электромеханическое, термогидрохимическое), способны увеличивать в твердых сплавах плотность дислокаций, что приводит к формированию в поверхностных слоях

повышенной твердости и прочности структуры, при этом структура приобретает низкую ударную вязкость и склонна к трещинообразованию. Методы упрочнения с плотностью потока энергии 1–1000 Вт/м<sup>2</sup> и временем воздействия от 100 мкс до 5 с (ионная имплантация, импульсное облучение ионным компонентом, тлеющим разрядом, плазменно-детонационная (импульсная), магнитно-импульсная, криогенная обработки, радиационное облучение гамма-лучами, рентгеновское излучение, ультразвуковое, аэродинамическое звуковое упрочнение) способны повышать свойства твердых сплавов практически по всем параметрам в поверхностных слоях. Методы упрочнения с плотностью потока энергии до 1 Вт/м<sup>2</sup> и временем воздействия свыше 10 с (термообработка, объемная закалка, термомеханическое упрочнение, высокоэнергетическими ионными пучками, алмазное шлифование, полирование, выглаживание, магнитно-алмазное полирование, абразивная обработка, виброабразивное, магнитно-абразивное полирование, металлическими щетками, поверхностно-пластическое деформирование) снижают структурные напряжения и плотности дислокаций, повышают пластичность и устойчивость структуры при повышенных температурах и силовых воздействиях с тенденцией понижения или сохранения твердости.

Практически все известные методы производства и упрочнения твердых сплавов не позволяют эффективно достигать повышения стойкости твердосплавных инструментов, работающих на удар, и увеличения их ресурса. В связи с чем, для решения такой сложной технологической задачи, связанной с повышением ресурса твердосплавных инструментов, работающих при процессах прерывистого резания, необходимо разрабатывать новые методы упрочнения твердых сплавов.

Исходя из разработанной классификации предложено осуществлять создание физико-механических свойств твердых сплавов, способных выдерживать повышенные ударные нагрузки, за счет релаксации структуры при воздействии волновой энергии с плотностью потока энергии 0,25–0,42 Вт/м<sup>2</sup> и временем воздействия 60–240 с, что позволило установить научно обоснованные подходы к разработке метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) твердосплавного инструмента. На основе сделанных выводов сформулирована цель работы и определены необходимые для ее достижения задачи.

**Вторая глава** посвящена теоретическому обоснованию механизма аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента, для разработки которого проанализированы явления, происходящие в структуре кристаллических решеток твердых сплавов.

Свойства твердых сплавов изменяются при релаксации погрешностей кристаллической решетки и плотности дислокаций, что происходит за счет смещения атомов кристаллической решетки из положения, в котором они находятся после изготовления сплавов. Анализ закономерностей, происходящих в структуре твердых сплавов на межатомном уровне, показал, что атомы кристаллической решетки совершают гармонические колебания в акустическом диапазоне частот с амплитудами движения атомов, отличающимися между собой в зависимости от их масс, ом колебания атомов представляют собой произвольную сумму от плоских волн, изменяющуюся по гармоническому закону:

$$\omega^2 \frac{\mu}{m} (2 - e^{i_0 k a_1} - e^{-i_0 k a_1}) = 4 \frac{\mu}{m} \sin^2 \frac{k a_1}{2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота гармонических колебаний;  $\mu$  – упругая константа взаимодействия в законе Гука;  $m$  – масса атома;  $i_0$  – волновое число;  $ka_1$  – начальная фаза колебаний,  $a_1$  – межатомное расстояние;  $k$  – коэффициент квазиупругой силы.

Исходя из (1), максимальная частота колебаний атомов  $\omega_{\max}$  в зависимости от параметров кристаллической решетки будет равна:

$$\omega_{\max} = \frac{2,53 \cdot 10^{-9}}{a_1 \sqrt{m}}. \quad (2)$$

Энергия свободных колебаний атомов  $E_{\text{св}}$  может быть представлена в виде кинетической и потенциальной энергий, действующих на атомы:

$$E_{\text{св}} = 0,5m\omega_{\text{св}}^2 A_{\text{св}}^2, \quad (3)$$

где  $A_{\text{св}}$  и  $\omega_{\text{св}}$  – величины амплитуды и частоты свободных колебаний атомов.

С другой стороны, при взаимодействии колебаний атомов друг с другом, эти колебания при квантовомеханическом описании ведут себя как фононы с энергией  $E_{\text{св}}$ , зависящей от частоты свободных колебаний  $\omega_{\text{св}}$  атома:

$$E_{\text{св}} = 0,5\hbar\omega_{\text{св}}, \quad (4)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

С учетом равенства (3) и (4) максимальную амплитуду свободных колебаний атомов кристаллической решетки можно описать в виде:

$$A_{\omega_{\max}} = 5,12 \cdot 10^{-13} \sqrt{\frac{a_1}{\sqrt{m}}}. \quad (5)$$

Энергия, способная обеспечить смещение атомов кристаллической решетки, может быть представлена как сумма энергий нормальных колебаний, ведущих себя подобно линейным гармоническим осцилляторам с соответствующими максимальными частотами и амплитудами колебаний атомов. Тогда максимальную энергию, достаточную для смещения атомов Ti, W, Ta и Co кристаллических решеток основных компонентов твердых сплавов, можно определить из выражения:

$$E_{\text{св}_{\max}} = \frac{0,839 \cdot 10^{-42} k_{\text{св}}}{k_y a_1 \sqrt{m}}. \quad (6)$$

где  $k_{\text{св}}$  – коэффициент, учитывающий количество межатомных связей;

$k_y$  – коэффициент плотности упаковки кристаллической решетки.

В результате численного моделирования зависимостей (2)–(6) установлено, что для смещения атомов W, Ti, Ta, Co необходима энергия  $(0,3–1,7) \cdot 10^{-18}$  Дж.

Выдвинуто предположение, что энергию, достаточную для смещения атомов кристаллических решеток, возможно создать за счет воздействия на сплав энергий от температуры нагрева  $E_T$  и резонансных волн  $E_{\text{вн}}$ . Известно, что с повышением температуры тела увеличивается и его внутренняя энергия. Кроме того, при повышении температуры твердого сплава до допустимой температуры  $T_{\text{доп}}$  (°С) (температуры хладноломкости 300–320 °С) не произойдет снижение его твердости и пластичности. На основании чего была получена зависимость энергии  $E_T$  колебаний атомов массой  $m$  от  $T_{\text{доп}}$  (°С) в виде:

$$E_T = 24,94 \cdot m \cdot (T_{\text{доп}} + 273,15). \quad (7)$$

Установлено, что нагрев твердых сплавов до температуры хладноломкости (300–320 °С) увеличивает энергию свободных колебаний атомов кристаллической решетки до  $(1,2\text{--}4,5) \cdot 10^{-21}$  Дж.

При расчете генерируемой энергии от резонансных волн применялся подход, связанный с тем, что количество переданной механической энергии от волн в упругой среде, состоящей из кинетической энергии совершающих колебания частиц вещества и потенциальной энергии упругой деформационной среды, осуществляется в виде потока энергии с плотностью, представляющей собой количество энергии, которая проходит в единицу времени через некоторую площадку в один квадратный метр, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. В результате получена зависимость генерируемой на атом внешней энергии  $E_{\text{вн}}$  от созданных резонансных амплитуд  $A_{\text{рез}}$  и частот  $\omega_{\text{рез}}$ , плотности упрочняемого твердого сплава  $\rho$ , площади атома  $S$ , времени упрочнения  $\tau_y$  и коэффициента затухания  $\delta$  резонатора в виде:

$$E_{\text{вн}} = \frac{0,5\rho S\omega_{\text{рез}}^2 A_{\text{рез}}^2}{\ln\left(\frac{\delta}{k_{\delta}}\right)}. \quad (8)$$

Полученные энергии от температуры нагрева  $E_T$  и резонансных волн  $E_{\text{вн}}$  должны превышать энергию, необходимую для смещения атомов кристаллической решетки, а именно:

$$E_{\text{вн}} + E_m \geq E_{\text{св,макс}}. \quad (9)$$

Тогда, с учетом (7)–(9), математическая модель суммарной внешней энергии  $E$ , воздействующей на атомы компонентов твердого сплава, при АДУ:

$$E_{\text{вн}} = \frac{0,5\rho S\omega_{\text{рез}}^2 A_{\text{рез}}^2}{\ln\left(\frac{\delta}{k_{\delta}}\right)} + 24,94m(T_{\text{доп}} + 273,15). \quad (10)$$

Расчеты показали, что энергию  $(0,3-1,7) \cdot 10^{-18}$  Дж, достаточную для смещения атомов кристаллических решеток компонентов твердых сплавов, возможно создать на резонансных частотах 130–180 Гц и амплитудах  $(1,0-1,3) \cdot 10^{-4}$  м.

Для выяснения процессов, происходящих в структуре твердых сплавов при АДУ, разработана термодинамическая модель. При энергетических воздействиях, температурном и волновом, на исходную структуру начинают действовать активационные процессы, связанные с возбуждением атомов структурных компонентов твердых сплавов и переходом их из неактивного состояния в состояние с энергией, достаточной для осуществления смещения их в равновесное состояние. При этом исходная структура, поглощая часть энергии, модифицируется в более высокое структурно-энергетическое состояние, обладающее максимальной свободной энергией, являющейся неустойчивой. При воздействии активационных процессов в неравновесной структуре начинают включаться диссипативные процессы, связанные с рассеиванием накопленной энергии и приведением структуры твердых сплавов в новое более устойчивое состояние, которое обладает меньшей свободной энергией, которые под действием не полностью рассеянной внутренней энергии способны возвращать структуру в близкое к исходному состоянию. Для стабилизации достигнутых свойств осуществляется дополнительное температурное воздействие, в результате чего происходит более глубокое рассеяние внутренней энергии, накопленной при активационных процессах, и сохранение полученной структуры.

Условия образования диссипативных структур при АДУ определяются кинетикой энергетических потоков системы упрочнения, связывающей между собой структурно-энергетическое состояние и время активации, происходящие при АДУ. Согласно первому началу термодинамики метод АДУ можно описать в виде следующих энергетических воздействий:

$$E_{ТВ1} + E_{ТВ2} + E_{ВВ} = E_{АП} + E_{ДП} + E_{СП}, \quad (11)$$

где  $E_{ТВ1}$ ,  $E_{ТВ2}$ ,  $E_{ВВ}$ ,  $E_{АП}$ ,  $E_{ДП}$ ,  $E_{СП}$  – энергии от температуры  $ТВ1$ ; температуры  $ТВ2$ ; волнового воздействия; активационных; диссипативных и стабилизационных процессов соответственно.

Путем преобразований (11) диссипативная составляющая  $E_{ДВ}^*$  энергоданса, направленная на осуществление релаксации упругих внутренних напряжений и микроструктурных превращений, будет равна:

$$E_{ДВ}^* = E_{ТВ1} + E_{ВВ} - S_3 \cdot T_{ДП}, \quad (12)$$

где  $S_3$  – энтропия при АДУ, связанная с количеством произведенной волновой энергии за время воздействия.

Предложена концептуальная модель структурных изменений в твердом сплаве под воздействием энергии от резонансных звуковых волн и увеличенной запасенной потенциальной энергии у атомов кристаллических решеток от нагрева до температуры хладноломкости, а также сохранение достигнутых результатов дополнительной температурной стабилизацией, и тем самым обосновывающая получение новых равновесных конфигураций кристаллических решеток с уменьшенной дефектностью и плотностью дислокаций.

На основании разработанных математических моделей образования внешней энергии от температурного и волнового резонансного, в звуковом спектре частот, воздействий, достаточной для смещения атомов кристаллической решетки, с учетом концептуальной модели процессов, происходящих в структуре твердых сплавов под действием волновых резонансных воздействий, предложен механизм реализации метода АДУ, согласно которому твердый сплав нагревается до температуры хладноломкости, с целью увеличения энергии свободных колебаний атомов элементов сплава, и упрочняется в устройстве для АДУ резонансными волнами звуковой частоты в течение установленного времени воздействия, в результате происходит релаксация кристаллической решетки и аннигиляция дислокаций, после чего осуществляется низкий отпуск, необходимый для сохранения достигнутых структурных изменений и свойств.

Новизна метода АДУ защищена патентами RU 2557175, BY 21049.

**Третья глава** посвящена обоснованию применения методик и математических моделей для исследования метода аэродинамического звукового упрочнения, свойств твердых сплавов и параметров прерывистых процессов резания.

Из большой номенклатуры твердых сплавов объектами для исследования выбраны наиболее широко применяемые сплавы при процессах прерывистого резания (BK8, BK6, B35, T5K10, T15K6, MC111, MC131, H30, H10) производства ОАО «КЗТС» и ОАО «Победит» (Россия), металлокерамика трехкарбидная марки VH5912 фирмы «Вириал» (Россия), твердые сплавы с покрытием CVD (ВП3115, ВП3225) и PVD, нанесенным ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», (T5K10ж, T5K10ч). Использовались сплавы форм PNUA-110408 по ГОСТ19064-80 и Г65 по ГОСТ 880-75. Выбор марок сплавов основывался на наибольшей их применимости для процессов прерывистого резания.

Исследование акустических характеристик установки, реализующей метод АДУ, проводилось при помощи цифрового виброанализатора сигналов СД-21, адаптеров вибропреобразований канального ICP АВП-16иср-2 и интерфейса RS232-USB фирмы «Ассоциация ВАСТ» (Россия).

Исследование морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава твердых сплавов проводилось на оптическом микроскопе «МИКРО-200» фирмы «Оптоэлектронные системы» (Беларусь), оснащенном камерой и программой «Image SP», сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия), растровых электронных микроскопах «CamScan 4» с энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализатором (МРСА) «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Англия), LEO1455VP фирмы «Carl Zeiss» (Германия) с рентгеноспектральным микроанализатором (РСМА) фирмы «Röntec» (Германия), световом микроскопе «MeF-3» (Reichert, Австрия), рентгеновских дифрактометрах ДРОН-3 (Россия) и «Ultima IV» фирмы «RIGAKU» (Япония).

Исследования на ударную вязкость производились согласно ГОСТ 9454-78 по методу Шарпи на маятниковом копре модели TIME JB-300В фирмы «TIME Grop Inc.» (Швейцария). Определение предела прочности при изгибе проводилось согласно ГОСТ 20019-74 на универсальной испытательной машине на 20 тс «МУП-20» (Россия). Определение плотности твердосплавных образцов осуществлялось методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74 с помощью весов лабора-

торных аналитических «RADWAG XA60/220/X» фирмы «Radwag» (Польша). Микротвердость образцов измерялась по методу Роквелла по ГОСТ 9013-59 на микротвердомере «Micromet-II» фирмы «Buenler» (США). Измерение параметров шероховатости и запись профилограмм производились на профилометре-профилографе «Surftest SJ-210» фирмы «Mitutoyo» (Япония). Степень пористости определялась по методике ГОСТ 9391-80 на нетравленных поверхностях шлифов. Измерения приведенного ударного шума осуществлялось прибором «Экофизика-110А» фирмы «ОКТАВА-ЭлектронДизайн» (Россия).

Твердосплавные пластины устанавливались с углами: главным  $\varphi = 64^\circ$ ; вспомогательным в плане  $\varphi_1 = 8^\circ$ ; передним и задним  $\gamma_3 = \alpha_3 = 10^\circ$ . Обработка производилась на карусельно-фрезерном станке модели ГФ2211 фрезами диаметром 63 и 200 мм. Обработке подвергались заготовки из чугуных отливок материала СЧ25 ГОСТ 1412-85 с твердостью *HB* 156...170, стали 45 ГОСТ 1050-88 с твердостью *HB* 178...198. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Замеры износа производились по задней поверхности пластин на инструментальном стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000-C» фирмы «Carl Zeiss» (Германия).

Для исследования износа и ресурса твердосплавного инструмента были разработаны новые методики, устанавливающие закономерности влияния режимов резания на износ и ресурс инструмента, упрочненного АДУ, с использованием алгометрической параметрической оптимизации с помощью математических моделей. Математическое описание количественной оценки величины износа режущего лезвия по задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $\tau$  осуществлялось в виде степенной функции:

$$h_3 = a \cdot \tau^n, \quad (13)$$

где  $a$  – показатель абсолютной величины износа от времени;

$n$  – постоянная величина, представляющая собой показатель интенсивности величины износа.

Показатели  $n$  и  $a$  можно определить из выражений:

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i}}{\tau_i} + \frac{h_{3_1}}{\tau_1}, \quad a = \frac{h_{3_i}}{\tau_i^n} + \frac{h_{3_1}}{\tau_1^n}, \quad (14)$$

где  $h_{3_i}$  и  $h_{3_1}$  – значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -ой и первой точках соответственно;  $\tau_i$  и  $\tau_1$  – значения времени в логарифмической системе координат в  $i$ -ой и первой точках соответственно.

При вариации максимальных и минимальных значений исследуемых режимов ( $n_p$ ) резания проводилось количество опытов по плану эксперимента  $2n_p+1$ , для которых строились графики изменения износа  $h_3$  от времени резания  $\tau$  в абсолютной и в логарифмической системах. На графиках в логарифмической системе замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии, и соответствующие им значения на графиках в абсолютной



системе. После чего по формулам (14) находились коэффициенты  $n$  и  $a$ , а также по (13) определялись зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $t$  в виде степенных функций. Показатели  $a$  и  $n$  от одного из режимов резания представлялись в виде квадратичных функций, а кривая износа от времени описывалась полиномом второй степени. Исходя из чего, для уровней варьирования скоростей резания (нижний  $v_1$ , основной  $v_2$ , верхний  $v_3$ ) системы уравнений, описывающих показатели износа по задней поверхности  $a_{v1}$ ,  $a_{v2}$ ,  $a_{v1}$ ,  $n_{v1}$ ,  $n_{v2}$ ,  $n_{v3}$  соответственно при  $v_1$ ,  $v_2$  и  $v_3$ , имеют вид:

$$\begin{cases} a_{v_1} = a_{av}v_1^2 + b_{av}v_1 + c_{av_1}; \\ a_{v_2} = a_{av}v_2^2 + b_{av}v_2 + c_{av_2}; \\ a_{v_3} = a_{av}v_3^2 + b_{av}v_3 + c_{av_3}; \end{cases} \quad \begin{cases} n_{v_1} = a_{nv}v_1^2 + b_{nv}v_1 + c_{nv}; \\ n_{v_2} = a_{nv}v_2^2 + b_{nv}v_2 + c_{nv}; \\ n_{v_3} = a_{nv}v_3^2 + b_{nv}v_3 + c_{nv}. \end{cases} \quad (15)$$

где  $a_{av}$ ,  $b_{av}$ ,  $c_{av}$ ,  $a_{nv}$ ,  $b_{nv}$ ,  $c_{nv}$  – коэффициенты, описывающие влияние  $v^2$ ,  $v$  и совместное влияние факторов  $v^2$  и  $v$ , соответственно при  $a$  и  $n$ .

Решение систем уравнений (15) осуществлялось через представление зависимостей износа от однофакторных параметров резания ( $v$ ,  $s$ ,  $t$ ) в виде квадратичных функций  $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$  и  $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$ , определения для них коэффициентов  $a_{av}$ ,  $b_{av}$ ,  $c_{av}$ ,  $a_{nv}$ ,  $b_{nv}$ ,  $c_{nv}$ , а также представление показателей износа  $a_0$  и  $n_0$  от многофакторных параметров резания ( $v$ ,  $s$ ,  $t$ ) в виде квадратичной функции  $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + a_{av}s^2 + b_{av}s + a_{av}t^2 + b_{av}t + c_1$ ,  $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + a_{nv}s^2 + b_{nv}s + a_{nv}t^2 + b_{nv}t + c_2$  и определения для них коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  в центре плана, с учетом того, что величина стойкости равна  $T = \left( \frac{h_{3\text{доп}}}{a_c} \right)^{1/n_c}$  (где  $h_{3\text{доп}}$  – допустимая величина износа,

$a_c$  и  $n_c$  – показатели абсолютной величины износа и интенсивности износа от факторов  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ). Получена математическая модель ресурса режущего инструмента  $T_p$  от режимов резания  $v$ ,  $s$ ,  $t$ :

$$T_p = 10^{-3} v s \left[ \begin{aligned} & \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} (v^2 + v_2^2) + \\ & + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v + v_2) + \\ & + \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} (s^2 + s_2^2) + \\ & + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s + s_2) + \\ & + \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} (t^2 + t_2^2) + \\ & + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t + t_2) - T_{v_2} \end{aligned} \right], \quad (16)$$

где  $T_{v1}$ ,  $T_{v2}$ ,  $T_{v3}$  – стойкости при  $v_1$ ,  $v_2$  и  $v_3$ ;  $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_{s3}$  – стойкости при  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$ ;  $T_{t1}$ ,  $T_{t2}$ ,  $T_{t3}$  – стойкости при  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ ;  $a_{T_v}$ ,  $a_{T_s}$ ,  $a_{T_t}$  – коэффициенты, учитывающие влияние режимов резания на стойкость.

При исследовании влияния структуры режущего инструмента и обрабатываемого материала, параметров процесса обработки (скорость, подача, глубина, путь резания и др.) на связи и закономерности протекания деформационных, сдвиговых, термодинамических явлений, происходящих в зоне резания твердосплавного инструмента с АДУ, использовалась методика имитационного моделирования процессов резания в программном продукте Deform, в котором на хорошем теоретическом и экспериментальном уровнях прописаны лишь известные процессы резания. Так как обработка прерывистых поверхностей твердосплавным металлорежущим инструментом, упрочненным АДУ, является новым и не изученным, а возникающие при резании особенности не исследованы, то произведено усовершенствование программного продукта Deform аналитической зависимостью и обобщающими критериями, учитывающими возникшие особенности процесса резания инструментом, упрочненным АДУ. Результаты получены на основе решения контактной реологической задачи теории упругости в зоне резания с учетом того, что процессы резания сопровождаются протекающими последовательно деформированием и разрушением обрабатываемых материалов, проявляющих при этом одновременно пластичные (вязкостные) и упругие свойства. Реологическая модель износа режущего инструмента от времени  $\tau$  связывает между собой глубину резания  $t$ , ширину срезаемого слоя  $l_{ш}$ , подачу на зуб  $s_z$ , угол вспомогательной режущей кромки инструмента  $\phi_1$ , жесткость обородования  $j$ , свойства обрабатываемого материала, в виде:

$$h_{3(\tau)} = \frac{t - \frac{P_{\tau}}{s_z P} \int_0^{\tau} \frac{EH}{2(1-\nu^2)} \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} (l_{ш} a)^{0,5} \tau^{0,5n} + (l_{ш} a)^{0,23} \tau^{0,36n} \right) dt}{j \sin \phi_1}, \quad (17)$$

где  $E = \frac{\mu \cdot (3\lambda_{л} + 2\lambda_{л})}{\lambda_{л} + \mu}$  – модуль упругости обрабатываемого материала;

$\nu = \frac{\lambda_{п}}{2(\lambda_{л} + \mu)}$  – коэффициент Пуассона для обрабатываемого материала;

$\lambda_{л} = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ;  $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – коэффициенты Ламе;

$H = r(1 - \cos \eta) = r \left[ 1 - (1 + \mu) / \sqrt{2(1 + \mu^2)} \right]$ ;

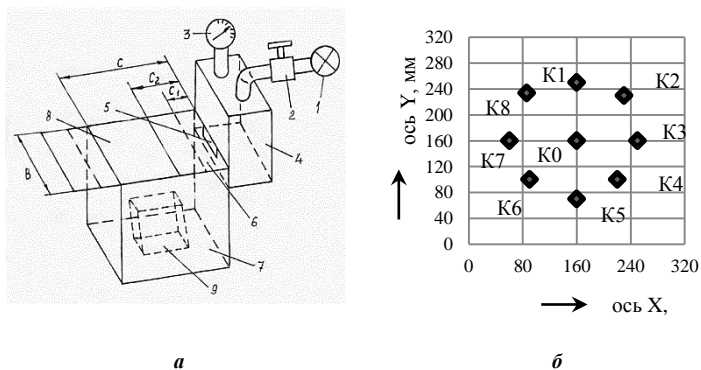
$\eta$  – угол контакта зуба с деталью.

Предложенные и разработанные методики позволили произвести всесторонние исследования влияния разработанного метода АДУ на свойства твердых сплавов, параметры процессов прерывистого резания, на связи и закономерности протекания

деформационных, сдвиговых, термодинамических явлений, происходящих в зоне резания.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям процесса АДУ и его влиянию на структуру и свойства твердых сплавов.

Конструктивное решение установок для АДУ (рисунок 1, а) реализует принцип создания энергии от резонансных волн в звуковом спектре частот, возникающих под действием пульсирующих воздушных потоков.



**Рисунок 1. – Схема установки для АДУ (а) и точки К0-К8 в координатах X, Y, в которых измерялись амплитудно-частотные характеристики, на стенке устройства для АДУ (б)**

Установка для АДУ представляет собой волновой резонатор, включающий: 1 – источник генерации воздуха, 2 – регулирующий вентиль, 3 – манометр, 4 – камеру сглаживания пульсаций воздуха, 5 – щелевое сопло, 6 – канал выхода воздуха, 7 – резонансную камеру, 8 – регулируемую заслонку, 9 – упрочняемое изделие.

Резонанс в установке для АДУ возникает следующим образом. Через щелевое сопло 5 часть воздуха уходит наружу, а часть воздуха нагнетается в полость резонансной камеры 7, что происходит за счет рассекания воздушного потока клиновидной частью регулирующей заслонки 8. Когда величина повышенного давления в камере превысит давление потока воздуха, поступающего из щелевого сопла, то повышенное давление заставит воздух вытекать обратно из резонансной камеры. При выравнивании давлений внутри и снаружи, воздух всё равно продолжит выходить наружу, поскольку поток воздуха, выходящий из резонансной камеры, обладает массой и скоростью, а значит, и кинетической энергией. Через промежуток времени воздух выйдет из резонансной камеры и при этом давление внутри резонансной камеры станет меньше, чем давление от воздушного потока, выходящего из щелевого сопла. Воздух снова устремится в резонансную камеру. Такие циклы будут повторяться неоднократно. При этом возникает явление резонанса – стенки резонансной камеры под действием цикличности давления при совпадении частот колебаний воздуха в резонансной камере и снаружи камеры также начинают вибрировать с резонансной частотой. Если внешняя сила воздушного потока, идущего от щелевого сопла наружу, будет возникать и исчезать с частотой, равной собственной частоте

воздушного потока в полости резонансной камере, то явление резонанса будет постоянно.

Для устройств АДУ резонансная частота  $\omega_{\text{рез}}$  зависит от размеров щелевого сопла ( $B_{\text{щ}}$ ,  $H_{\text{щ}}$ ,  $L_{\text{щ}}$  – высота, толщина, длина), резонансной камеры ( $L_p$ ,  $B_p$ ,  $H_p$  – длина, ширина, высота), окна для выхода воздуха ( $L_3$  – длина) и скорости звука  $c$ :

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{\text{щ}} \cdot H_{\text{щ}}}{(L_p - L_3) B_p \cdot H_p \cdot L_{\text{щ}}}}. \quad (18)$$

Установлены требования, предъявляемые к давлению и объему подаваемого воздуха, связанных между собой через площадь сечения щелевого сопла, а также резонансным частотам и амплитудам, зависящих от размеров резонансной камеры и площади щелевого сопла. В установках для АДУ, имеющих размеры резонансной камеры: длина 0,315–0,355 м; высота 0,09–0,16 м; ширина 0,29–0,305 м, с площадью сечения щелевого сопла, изменяющегося в диапазоне  $(1,17\text{--}2,08) \cdot 10^{-4}$  м, при давлении от 0,16–0,2 МПа и расходе воздуха 2,0–3,9 м<sup>3</sup>/мин, возникают резонансные частоты 140–170 Гц и амплитуды  $(1,04\text{--}1,31) \cdot 10^{-4}$  м, создающие энергии  $(2,5\text{--}11,1) \cdot 10^{-18}$  Дж, достаточные для смещения атомов кристаллических решеток компонентов твердых сплавов.

Исследования проводили на разработанных и изготовленных по КД ИЖАН.443249.001, КД ИЖАН.443249.002 установках для АДУ.

Проведенные экспериментальные исследования параметров и режимов при АДУ, результаты которых регистрировались от датчика вибраций, устанавливаемого на вибрирующих сторонах установок (рисунок 1, б) в точках К0–К8 и внутри установок, показали, что существуют два эффективных режима упрочнения твердосплавного инструмента: режим 1 – на частотах с модами 159, 318, 477, 636, 794 Гц; режим 2 – на резонансных частотах с модами 148, 269, 444, 593, 740 Гц. С увеличением частоты резонансные амплитуды уменьшаются. На рисунке 2 показаны зависимости амплитудных виброускорений от частоты на режиме 2.

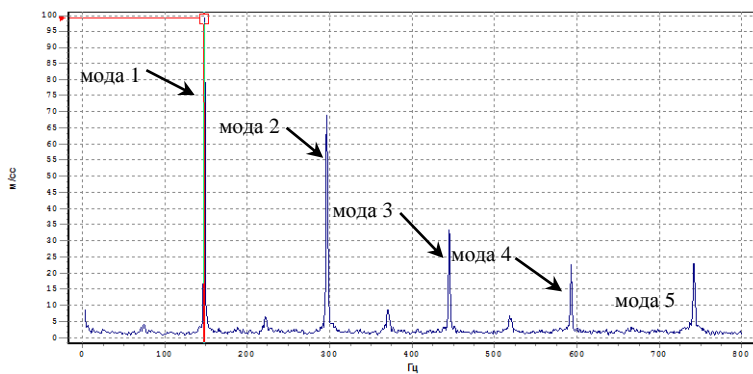
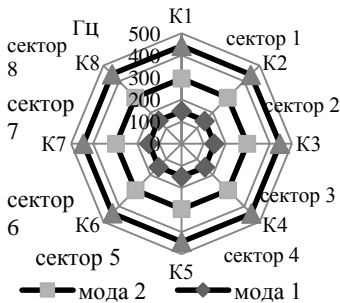


Рисунок 2. – Зависимости амплитудных виброускорений от частоты на режиме 2

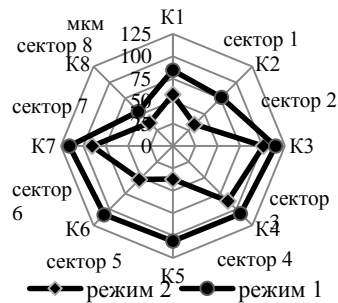
Параметр виброускорение наглядно характеризует силовое динамическое взаимодействие при АДУ, которое вызвало данную вибрацию, так как акселерометр измеряет без преобразования именно ускорение. Установлено, что режим 1 по сравнению с режимом 2 является более высокочастотным и энергоемким. Так на режиме 1 увеличение по сравнению с режимом 2 составляет: частоты на 7,4 %, амплитуды на 98 %, добротности на 24 %, энергоемкость повышается в 4,5 раза. В связи с чем, генерируемые энергии на режиме 1 превышают величины энергий на режиме 2 в 1,0–6,3 раза и распределены равномерно по секторам установки для АДУ в отличие от режима 2.

На рисунках 3 и 4 представлены значения частот и амплитуд на корпусе установки для АДУ. Из экспериментальных графиков видно, что на режиме 1 и режиме 2 частоты по секторам установки для АДУ распределяются равномерно, а амплитуды распределены равномерно лишь на режиме 1 в секторах 3–6 установки для АДУ, на режиме 2 равномерность распределения амплитуд отсутствует. Рекомендуется размещать изделия в установке для АДУ ближе к центру.

Рекомендованные параметры и режимы обработки при АДУ позволяют осуществлять упрочнение твердых сплавов, состоящих из компонентов, атомные веса которых меньше  $3 \cdot 10^{-25}$  кг (Ti, Co) – на режиме 1 и на режиме 2 при наличии атомов с атомными весами свыше  $3 \cdot 10^{-25}$  кг (W, Ta).

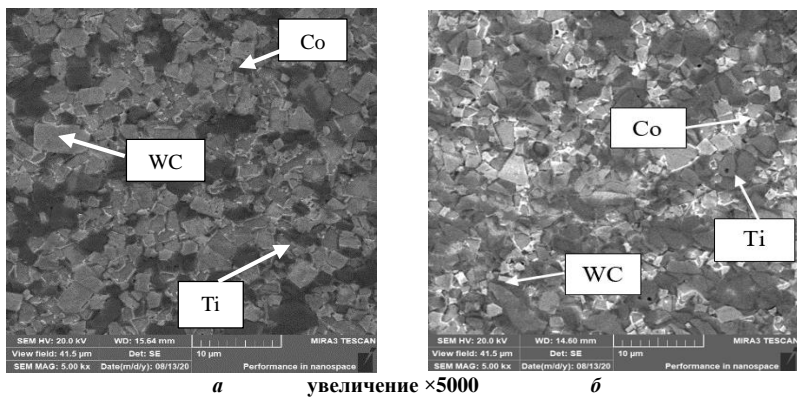


**Рисунок 3. – Распределение частот на корпусе установки для АДУ на первых трех модах на режиме 2**



**Рисунок 4. – Распределение амплитуд на корпусе установки для АДУ**

Снимки микроструктуры поверхностных слоев образцов до и после АДУ для сплавов Т5К10 представлены на рисунке 5.

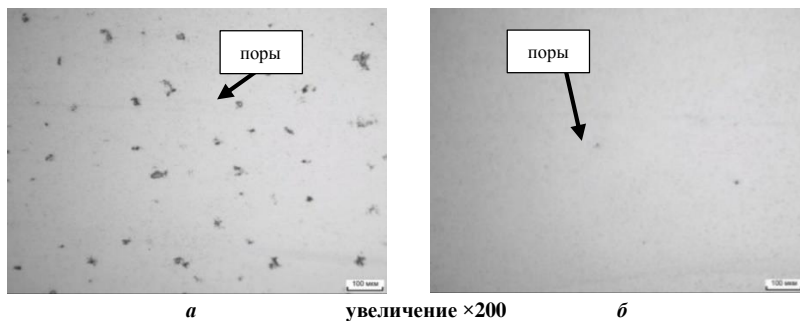


*a* – без АДУ; *б* – с АДУ

**Рисунок 5. – Микроструктура образцов твердого сплава Т5К10**

У образцов после АДУ контуры межзерновых границ четче выделены и имеют более явные очертания, в микроструктуре эффект экстинкции – ослабление пучка света при его распространении в сплаве за счет поглощения и рассеивания света, присутствует в значительно меньшей степени, что указывает на уменьшение внутренних напряжений и снижение искажений в кристаллических решетках, на наличие меньшей плотности дислокаций.

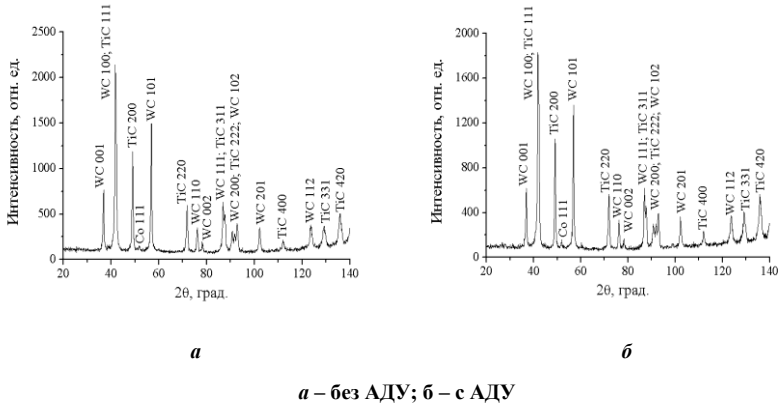
На рисунке 6 представлены микроструктуры нетравленных поверхностей сплава Т5К10 с указанием процентного содержания пор, определенного по шкале А (в %) по ГОСТ 9391-80. Установлено, что у твердых сплавов после АДУ уменьшается количество поверхностных пор: для сплава Т5К10 с 0,4 до 0,02 %; Т15К6 с 0,7 до 0,04 %; ВК8 с 0,4 до 0,05 %, а, следовательно, и уменьшается количество концентраторов для зарождения трещин.



*a* – без АДУ А5 0,4 %; *б* – с АДУ А1 0,02 %

**Рисунок 6. – Микроструктура нетравленной поверхности твердого сплава Т5К10**

На рисунке 7 приведены рентгеновские дифрактограммы сплава Т5К10.



**Рисунок 7. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм твердого сплава Т5К10**

Установлено, что после АДУ фазовый состав сплавов не изменяется, увеличивается пластичность кобальтовой связи, уменьшается плотность дислокаций в твердых сплавах на 15,8–20,7 %, с 2,0–4,2 до  $(1,7–3,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$ . Метод АДУ оказывает влияние на состояние кристаллических решеток компонентов, входящих в твердые сплавы, повышая их структурное совершенство, тем самым уменьшая реальную искаженность, возникшую при изготовлении. Повышается упорядоченность кристаллических решеток  $\alpha$ -WC и  $\beta$ -Co (искажения уменьшаются для сплавов группы: ТК без АДУ с 0,07–0,08 % до 0,02 % – после АДУ; ВК без АДУ с 0,17–0,68 % до 0,08 % – после АДУ) по сравнению с неупрочненными твердыми сплавами.

Метод АДУ позволяет обеспечивать у твердых сплавов физико-механические свойства более высокие, чем у стандартных твердых сплавов. Экспериментальные исследования показали, что при АДУ твердосплавных пластин Т15К6, Т5К10, ВК6, ВК8 ударная вязкость и предел прочности при изгибе увеличиваются на 19–24 % по сравнению с неупрочненными сплавами, плотность структуры и твердость не изменяются.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям износа и ресурса режущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, при процессах прерывистого резания.

Получены зависимости износа по задней поверхности упрочненных АДУ пятигранных пластин Т5К10, Т15К6 и ВК8 от режимов резания (рисунок 8).

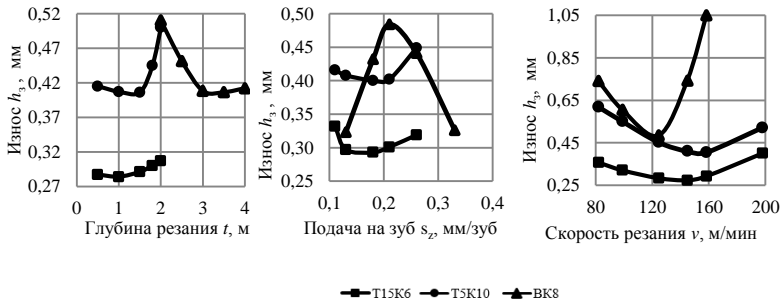
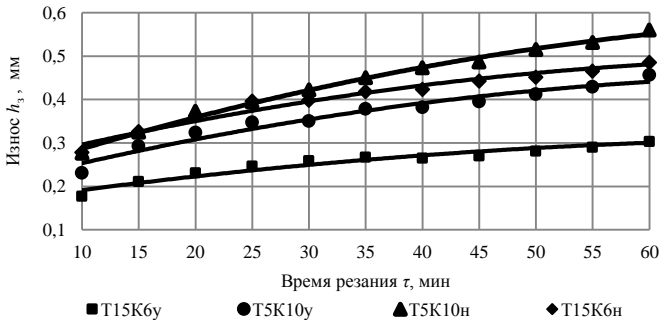


Рисунок 8. – Зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  при фрезеровании пластинами Т5К10, Т15К6 (стали 45), ВК8 (чугуна СЧ25) с АДУ от  $v$ ,  $s_z$ ,  $t$

При фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20 и стали 45 в зоне устоявшегося резания в диапазоне скоростей 99–198 м/мин, глубин резания 0,5–4,0 мм и подач 0,13–0,33 мм/зуб зависимости износа по задней поверхности твердосплавных пластин ВК8, Т5К10 и Т15К6 с АДУ: от скорости резания имеют изменяющийся экстремально вогнутый характер с минимальным экстремумом износа 0,48 мм при скорости резания 105–125 м/мин для сплава ВК8, 0,4 мм при скорости резания 150–160 м/мин для сплава Т5К10, 0,29 мм при скорости 150–160 м/мин для сплава Т15К6; от глубины резания носят увеличивающийся характер, не имея экстремумов, причем для пластин из сплава ВК8 с увеличением глубины резания с 2,0 до 4,0 мм износ уменьшается, для пластин Т5К10 и Т15К6 износ, при увеличении глубины резания с 0,5 до 1,5 мм, увеличивается, имея для Т5К10 вогнутый, а для Т15К6 – выпуклый характер, при этом минимальные значения износа равны 0,4 мм для сплава ВК8 при глубине резания 4,0 мм, 0,28 мм для сплава Т5К10 и 0,39 мм для сплава Т15К6 при глубине резания 0,5 мм; от подачи на зуб имеет экстремально выраженный характер, причем для сплава ВК8 с увеличением подачи с 0,13 до 0,23 мм/зуб величина износа увеличивается от 0,32 мм при подаче 0,13 мм/зуб до максимальной величины 0,49 мм при подаче 0,23 мм/зуб, затем снижается, для сплавов Т5К10 и Т15К6, при увеличении подачи с 0,11 до 0,19–0,22 мм/зуб, величина износа уменьшается до 0,4 мм для Т5К10 и до 0,29 мм для Т15К6, а при дальнейшем увеличении подачи на зуб – увеличивается.

Сравнительные испытания пластин Т5К10 и Т15К6 на износ (рисунок 9) свидетельствуют о том, что при фрезеровании в течение 60 мин стали 45 на режимах:  $v = 124,3$  м/мин,  $s_z = 0,13$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм пластинами с АДУ происходит снижение износа по задней поверхности режущего лезвия на 19–38 % по сравнению с неупрочненными пластинами.





**Рисунок 9.** – Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  для пластин из сплавов Т5К10 и Т15К6, без (н) и с АДУ (у), при фрезеровании стали 45

При процессах прерывистого резания с ударными нагрузками твердосплавные пластины с АДУ показывают повышенную стойкость на 14–43 % по сравнению с пластинами с износостойкими покрытиями.

АДУ обеспечивает повышение не только ресурса инструмента, но и производительности обработки. Установлено, что при фрезеровании чугуна СЧ20 инструментом из сплава В35 с АДУ на режимах резания ( $v = 46,5$  м/мин и  $s_z = 0,15$  мм/зуб) повышается производительность обработки на 26 % при повышенном в 2,3 раза ресурсе инструмента за счет повышения подачи на зуб с 0,09 до 0,15 мм/зуб. При фрезеровании стали 45 сплавом МС 131 с АДУ на режимах резания  $v = 146$  м/мин и  $s_z = 0,28$  мм/зуб, наряду с увеличением ресурса инструмента на 170 %, обеспечивается повышение производительности обработки на 20 % за счет повышения подачи на 27 % (относительно оптимальной  $s_z = 0,22$  мм/зуб). При фрезеровании стали 45 сплавом МС 111, упрочненным АДУ, на оптимальных режимах резания  $v = 160$  м/мин и  $s_z = 0,19$  мм/зуб, наряду с увеличением ресурса инструмента в 3,7 раза повышается производительность обработки на 11 % за счет увеличения скорости резания на 3 % и подачи на 6 % относительно обработки неупрочненным инструментом.

Также установлено, что для твердых сплавов группы ВК степень повышения стойкости значительно выше, чем для группы ТК. Для твердосплавного инструмента с АДУ, при работе с наличием двух ударов за время одного реза (при врезании и выходе инструмента), достигается повышение стойкости: на 38–51 % – для Т5К10, Н30, Т15К6 и на 285 % – для В35, а при десяти ударах за один рез (на пути резания присутствуют дополнительно четыре канавки) для указанных сплавов на 30–31 % и 233 %.

С увеличением исходной (до упрочнения) ударной вязкости твердого сплава увеличивается величина повышения стойкости инструмента с АДУ, работающего при процессах прерывистого резания, по сравнению с неупрочненным инструментом. Так, для твердосплавных пластин без упрочнения, имеющих исходную ударную вязкость: Т15К6 – 32,0 кДж/м<sup>2</sup>; Т5К10 – 33,7 кДж/м<sup>2</sup>; ВК8 – 35,0 кДж/м<sup>2</sup>, стойкость после АДУ повышается: для Т15К6 на 38 %, Т5К10 на 50 %, ВК8 на 285 %.

Результаты моделирования зависимостей износа по задней поверхности  $h_3$  от времени  $\tau$  и режимов резания ( $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ ) для твердых сплавов MC131 и MC111, без и с АДУ, при фрезеровании стали 45 представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Зависимости износа  $h_3$  от времени  $\tau$  и режимов резания  $v$ ,  $s_z$ ,  $t$  для сплава MC131 и MC111 при фрезеровании заготовок из стали 45

Режимы резания			Зависимости износа по задней поверхности от времени и режимов резания для твердосплавных пластин			
$v$ , м/мин	$s_z$ , мм/об	$t$ , мм	MC13 без АДУ	MC131 с АДУ	MC111 без АДУ	MC111 с АДУ
158,3	0,13	1,0	$h_3 = 0,104 \tau^{0,400}$	$h_3 = 0,093 \tau^{0,355}$	$h_3 = 0,127 \tau^{0,247}$	$h_3 = 0,113 \tau^{0,234}$
124,6	0,13	1,0	$h_3 = 0,128 \tau^{0,349}$	$h_3 = 0,156 \tau^{0,254}$	$h_3 = 0,103 \tau^{0,325}$	$h_3 = 0,078 \tau^{0,302}$
158,3	0,13	1,5	$h_3 = 0,115 \tau^{0,383}$	$h_3 = 0,119 \tau^{0,321}$	$h_3 = 0,165 \tau^{0,261}$	$h_3 = 0,106 \tau^{0,255}$
158,3	0,13	0,5	$h_3 = 0,093 \tau^{0,419}$	$h_3 = 0,091 \tau^{0,352}$	$h_3 = 0,126 \tau^{0,279}$	$h_3 = 0,095 \tau^{0,267}$
158,3	0,11	1,0	$h_3 = 0,099 \tau^{0,410}$	$h_3 = 0,102 \tau^{0,339}$	$h_3 = 0,077 \tau^{0,413}$	$h_3 = 0,067 \tau^{0,387}$
158,3	0,26	1,0	$h_3 = 0,110 \tau^{0,424}$	$h_3 = 0,099 \tau^{0,366}$	$h_3 = 0,096 \tau^{0,391}$	$h_3 = 0,088 \tau^{0,311}$
197,8	0,13	1,0	$h_3 = 0,072 \tau^{0,598}$	$h_3 = 0,081 \tau^{0,447}$	$h_3 = 0,087 \tau^{0,454}$	$h_3 = 0,080 \tau^{0,388}$

Режимы резания оказывают существенное влияние на ресурс твердосплавных пластин, упрочненных АДУ. Для металлорежущих твердосплавных пластин группы ТК, упрочненных АДУ, при изменении режимов резания на 25–80 %, ресурс инструмента изменяется на 36–275 %. Для пластин группы ВК, упрочненных АДУ, при изменении режимов резания на 25–50 %, ресурс инструмента изменяется на 32–54 %.

С помощью разработанной математической модели, учитывающей влияние режимов резания на износ инструмента, получены степенные зависимости износа и ресурса для сплавов MC111, MC131, В35, без и с АДУ (таблица 3), с помощью которых количественно оценивается ресурс инструмента, назначаются и оптимизируются режимы резания твердосплавного инструмента, упрочненного АДУ. Обработку твердосплавным инструментом с АДУ необходимо осуществлять на оптимальных режимах резания  $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ , которые определены путем дифференцирования зависимостей (таблица 3), способных обеспечивать максимальный ресурс  $T_p$  инструмента: для сплава MC111 –  $v_{\text{опт}} = 160,0$  м/мин,  $s_{\text{опт}} = 0,19$  мм/зуб,  $t_{\text{оп}} = 1,0$  мм; MC131 –  $v_{\text{опт}} = 146,0$  м/мин,  $s_{\text{опт}} = 0,22$  мм/зуб,  $t_{\text{оп}} = 1,5$  мм; В35 –  $v_{\text{опт}} = 147$  м/мин,  $s_{\text{опт}} = 0,09$  мм/зуб,  $t_{\text{оп}} = 3,1$  мм. При обработке на оптимальных режимах резания твердосплавные пластины после АДУ превышают по стойкости неупрочненные пластины: MC131 в 2,4–3,3 раза; MC111 в 2,2–4,2 раза; В35 в 1,7–3,5 раза.

Таблица 3. – Зависимости износа  $h_3$  и ресурса  $T_p$  для сплава MC111, MC131, В35, без (н) и с АДУ (у), от комплексного влияния режимов резания

Сплав	Зависимости износа по задней поверхности $h_3$ и ресурса $T_p$ инструмента от времени $t$ и режимов резания $v, s_z, t$
MC111у	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = -0,000026v^2 + 0,008509v - 16,4871795s_z^2 + 6,2069s_z - 0,096t^2 + 0,194t - 1,17$ ; $n_0 = -0,0000915v^2 - 0,02837v + 58,1795s_z^2 - 21,913s_z + 0,214t^2 - 0,431t + 4,49$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-0,28v^2 + 86v - 166392s_z^2 + 61861s_z - 1007t^2 + 2017t - 12466)$ .
MC111н	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = -0,00000768v^2 + 0,00238v - 14,0s_z^2 + 5,36s_z + 0,134t^2 - 0,217t - 0,391$ ; $n_0 = -0,0001017v^2 - 0,031029v + 63,38462s_z^2 - 23,6123s_z + 0,108t^2 - 0,232t + 4,73$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-0,09v^2 + 30v - 48079s_z^2 + 17730s_z - 431t^2 + 824t - 4064)$ .
MC131у	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = -0,00001054v^2 - 0,0038v + 4,61539s_z^2 - 1,70769s_z + 0,064t^2 - 0,092t + 0,656$ ; $n_0 = -0,00000695v^2 - 0,000147v - 4,76923s_z^2 + 1,9446s_z - 0,074t^2 + 0,117t - 0,011$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-0,007v^2 + 2v - 1571s_z^2 + 495s_z - 14t^2 + 13t - 83)$ .
MC131н	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = -0,0000005v^2 - 0,000315v - 1,5128s_z^2 + 0,7131s_z + 0,00000001t^2 + 0,3t + 0,138$ ; $n_0 = -0,0000412v^2 - 0,009658v + 4,5641s_z^2 - 1,59539s_z + 0,0004t^2 + 0,044t + 1,067$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-0,003v^2 + 0,8v - 176s_z^2 + 15s_z + 0,1t^2 - 3,6t - 16)$ .
В35у	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = 0,000018517v^2 - 0,0040217v - 1,125s_z^2 + 0,5075s_z - 0,0195t^2 + 0,1165t + 0,008$ ; $n_0 = 0,000023907v^2 - 0,00795v + 1,5625s_z^2 - 0,5438s_z + 0,2195t^2 - 1,3205t + 3,11$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-3,87v^2 + 977v + 852839s_z^2 - 417195s_z - 2012t^2 + 12601t - 26322)$ .
В35н	$h_3 = a \cdot t^n$ , где $a = 0,00003141v^2 - 0,007253v - 0,8333s_z^2 + 0,3583s_z - 0,0135t^2 + 0,0775t + 0,292$ ; $n_0 = 0,0000066867v^2 - 0,003168v + 2,6667s_z^2 - 0,9567s_z + 0,143t^2 - 0,83t + 2,043$ ;
	$T_{py} = 10^{-3} v s_z (-2,97v^2 + 754v + 174274s_z^2 - 87684s_z - 1463t^2 + 9031t - 47534)$ .

**Шестая глава** посвящена исследованиям эффективности упрочненного АДУ твердосплавного металлорежущего инструмента при процессах прерывистого резания, апробации и внедрению метода АДУ.

Исследования показали, что твердосплавные пластины с АДУ обеспечивают минимальную шероховатость при времени резания, увеличенном на 20 % по сравнению со временем резания неупрочненными пластинами.

С помощью разработанной математической зависимости (20) мгновенной толщины срезаемого слоя металла при фрезерно-карусельной обработке, являющейся наиболее типичным процессом прерывистого резания, доказано, что в пределах одного реза мгновенная толщина срезаемого слоя металла изменяется до 5 раз, из-за чего такой процесс резания является весьма нестабильным и требует наличия специального инструмента, способного воспринимать значительные переменные нагрузки.

$$\begin{aligned}
a_i = & \frac{\sqrt{2R_\phi B - B^2}}{R_\phi} (R_c (1 - \cos(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) - \sqrt{2R_\phi B - B^2} - \\
& - \frac{\operatorname{tg}^2(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)})}{\sin(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)})} + R_\phi - B) \sin(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) + \\
& + R_c (\sin^2(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) + \operatorname{tg}^2(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)})) + \\
& + \sqrt{R_\phi^2 - ((R_c (1 - \cos(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) - \frac{\operatorname{tg}^2(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)})}{\sin(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)})} + R_\phi - B) \cdot \\
& \cdot \cos(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}))^2} + \\
& + R_c \operatorname{tg}(\frac{360s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) + (R_c + R_\phi - B) \cos(\frac{360s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) - R_c + \\
& + \sqrt{R_\phi^2 - ((R_c + R_\phi - B) \cos(\frac{360s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) - R_c)^2} - \\
& - R_c \sin(\frac{180s_z}{\pi(R_c + R_\phi - B)}) - s_z - \sqrt{2R_\phi B - B^2}), \tag{20}
\end{aligned}$$

где  $B$  – ширина заготовки;  $R_\phi$  и  $R_c$  – радиусы фрезы и стола;  $s_z$  – подача на зуб.

Установлено, что стойкость твердосплавного инструмента с АДУ при фрезерно-карусельной обработке образцов из стали 45 превышает стойкость неупрочненного инструмента на 48–62 %.

Имитационным моделированием с помощью разработанной реологической модели износа режущего лезвия инструмента установлено, что в зоне резания металлорежущих твердосплавных пластин с АДУ уменьшаются: интенсивность изнашивания в 1,6 раза, контактные давления, скорость скользящего и температура в 1,3–1,9 раза, силы резания по оси  $X$  в 1,2 раза, по оси  $Y$  – в 1,5 раза, при этом, что установлено экспериментально, происходит снижение коэффициентов трения по задней поверхности при 60-минутной стойкости инструмента на 19–22 % и усадки стружки на 3,7–4,8 %, за счет чего достигается снижение износа твердосплавных пластин на 19–38 % по сравнению с неупрочненными пластинами при фрезеровании в течение 60 мин.

На основании проведенных исследований разработаны и изготовлены четыре установки для АДУ: КДИЖАН.443249.001 (002, 005, 007). Разработаны четыре технологических процесса (ТДИЖАН.440328.001 (002, 003, 004) упрочнения АДУ, заключающиеся в следующем: выдержанные в термопечи твердосплавные изделия в течение времени, равном не менее 1,6 минуты на один миллиметр наибольшего размера изделия, упрочняются в установке для АДУ в течение времени равном 30–40 % от времени выдержки, на одном или на двух циклах упрочнения, циклы упрочнения

аналогичны между собой, но отличаются режимами и временем упрочнения, после чего производят низкий отпуск при 160 °С.

Результаты промышленных испытаний, проведенных на одиннадцати предприятиях Беларуси и России, показали высокую стойкость твердосплавного инструмента с АДУ при работе в условиях прерывистого резания: из сплава Т5К10 повышается стойкость в 1,8–3,8 раза; из Т15К6 – в 2,2–3,4 раза; из ВК8 – в 1,85–3,2 раза по сравнению с неупрочненным.

Метод АДУ внедрен для упрочнения пластин твердосплавных, фрез, ножей для торцовых фрез на ООО ТД «ИТО-Туламаш», г. Москва, Россия с годовым экономическим эффектом 36 734 200,00 российских рублей и на ООО «Станкоинструмент» г. Смоленск, Россия с годовым экономическим эффектом в размере 14 747 040,00 российских рублей. Результаты работы внедрены на ЗАО «Промлизинг», г. Могилев при упрочнении металлорежущего твердосплавного инструмента с годовым экономическим эффектом в размере 27 715,96 белорусских рублей. Годовой экономический эффект на ОАО «Мозырский машиностроительный завод» от внедрения упроченных методом АДУ ножей 2021-0015 ВК8 составил 8 619,34 белорусских рублей. Общий объем внедрений научно-технической продукции с использованием результатов диссертационной работы в ценах на 10.03.2020 г. составил 803 670,71 долларов США.

Материалы работы внедрены в учебный процесс УО «Барановичский государственный университет» в курсе лекций и практикумах по дисциплинам «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей», «Машиностроение и машиноведение», «Технология машиностроения», МОУВО «Белорусско-Российский университет» в курсе лекций «Технология машиностроения» для студентов специальностей 1–36.01.01 «Технология машиностроения», 1–36.01.03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», при выполнении курсовых и дипломных проектов, магистерских диссертационных работ. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований метода АДУ, полученные в ходе выполнения работы, защищены 4 патентами Беларуси и России.

Перспективным является направление применения метода АДУ инструмента для горнодобывающей и строительной-дорожной отраслей. В условиях ОАО «Беларускалий» использование резцов ЛКМЯ 34.359.00-02 с АДУ позволило повысить их ресурс в 2,49 раза, при закупке в год таких и аналогичных резцов на сумму 3,0 млн долларов США. Применение метода АДУ для упрочнения такого инструмента, как пластины твердосплавные и резцы ВК и ТК для токарной обработки с ударами, фрезы концевые цельные твердосплавные, сверла цельные твердосплавные, сверла по бетону показало высокую эффективность метода АДУ, способного обеспечить повышение стойкости такого инструмента в 1,35–2,6 раза. Метод АДУ способен обеспечить повышение стойкости в 1,4–1,8 раза для металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей, что является довольно высоким результатом для такого рода инструмента.

**В приложении** представлены результаты экспериментальных исследований, акты экономической эффективности и внедрений метода АДУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основании численных расчетов с использованием литературных данных и собственных исследований предложен системный подход к классификации методов упрочнения твердосплавных металлорежущих инструментов, направленных на повышение их работоспособности, заключающийся в установлении связи между плотностью потока энергии и временем воздействия на создаваемые в твердых сплавах физико-механические свойства. Методы упрочнения с плотностями потока энергии свыше  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и временем воздействия до  $100 \text{ мкс}$  способны увеличивать в твердых сплавах плотность дислокаций, что приводит к формированию в поверхностных слоях повышенной твердости и прочности структуры, при этом структура имеет низкую ударную вязкость и склонна к трещинообразованию. Методы упрочнения с плотностью потока энергии  $1\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$  и временем воздействия от  $100 \text{ мкс}$  до  $5 \text{ с}$  способны повышать свойства твердых сплавов практически по всем параметрам в поверхностных слоях. Методы упрочнения с плотностью потока энергии до  $1 \text{ Вт/м}^2$  и временем воздействия свыше  $10 \text{ с}$  обеспечивают снижение на большую глубину структурных напряжений и плотности дислокаций, повышение пластичности и устойчивости структуры при повышенных температурах и силовых воздействиях с тенденцией понижения или сохранения твердости. На основании предложенной классификации выдвинуто предположение, что создать физико-механические свойства твердых сплавов, способные выдерживать повышенные ударные нагрузки, возможно за счет релаксации структуры при воздействии волновой энергии с плотностью потока энергии в диапазоне  $0,25\text{--}0,42 \text{ Вт/м}^2$  и временем воздействия  $60\text{--}240 \text{ с}$ , что позволило установить научно обоснованные подходы к разработке метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) твердосплавного инструмента [2, 10, 11, 17, 19, 23, 26–28, 31–32, 39, 42, 44, 45, 48, 49, 54, 57, 58, 65, 67].

2. На основании результатов теоретических исследований колебательных процессов, происходящих в кристаллических решетках компонентов твердых сплавов от температурного нагрева и воздействия резонансных волн в звуковом спектре частот, разработаны научные основы теории аэродинамического звукового упрочнения твердых сплавов, заключающиеся в создании внешней волновой резонансной энергии, обеспечивающей смещение атомов кристаллических решеток из существующего неравновесного состояния с целью релаксации структурных дефектов и уменьшения плотности дислокаций, обеспечения повышенных прочностных свойств твердых сплавов. Установлено, что нагрев твердых сплавов до температуры хладноломкости ( $300\text{--}320 \text{ }^\circ\text{C}$ ) увеличивает энергию свободных колебаний атомов кристаллической решетки до  $(1,2\text{--}4,5) \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ , энергия свободных колебаний атомов компонентов твердых сплавов, приводящая к их смещению, равна  $(0,3\text{--}1,7) \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$  [1–6, 8–12, 16, 17, 23–32, 36–39, 42, 44, 45, 48, 49, 50–51, 53, 54, 57, 65, 67].

3. На основе разработанных математических зависимостей, устанавливающих взаимосвязи возникающих энергий от внешней температуры нагрева твердого сплава и воздействия резонансных волн звуковой частоты, генерируемых установкой для АДУ, установлены требования, предъявляемые к давлению и объему подаваемого воздуха, связанных между собой через площадь сечения щелевого сопла, а также резонансных частот и амплитуд, зависящих от размеров резонансной камеры

и площади щелевого сопла, способных генерировать энергии, воздействующие на атомы компонентов твердых сплавов. В частности, установлено, что в установках для АДУ, имеющих размеры резонансных камер: длина 0,315–0,355 м; высота 0,09–0,16 м; ширина 0,29–0,305 м, с площадью сечения щелевого сопла, изменяющегося в диапазоне  $(1,17\text{--}2,08)10^{-4}$  м, при давлении от 0,16–0,2 МПа и расходе подающегося воздуха 2,0–3,9 м<sup>3</sup>/мин, возникают резонансные частоты 140–170 Гц и амплитуды  $(1,04\text{--}1,31)10^{-4}$  м, создающие энергии, равные  $(2,5\text{--}11,1)10^{-18}$  Дж, достаточные для смещения атомов кристаллических решеток компонентов нагретых твердых сплавов [1, 2, 6, 11, 12, 23, 25–27, 36, 38, 42, 44, 48–50, 57].

4. На основании изучения влияния температуры нагрева твердых сплавов и технологических параметров упрочняющей аэродинамической звуковой обработки на физико-механические свойства твердосплавного инструмента установлено, что наилучший комплекс физико-механических свойств (ударной вязкости, предела прочности при изгибе, плотности, твердости и глубины упрочнения) твердых сплавов достигается при температуре нагрева 300–320 °С перед каждым воздействием, с целью увеличения запасенной потенциальной энергии у атомов кристаллических решеток и сохранения неизменности исходной твердости, двух аэродинамических звуковых воздействиях на режимах: резонансная частота 140–150 Гц в течение 3–4 мин и 150–170 Гц в течение 1,5–3 мин, необходимых для смещения различных по массовым характеристикам атомов кристаллических решеток компонентов карбидов, и последующего низкого отпуска при температуре 160 °С в течение 1 ч, необходимого для сохранения достигнутых структурных изменений, в результате формирования упорядоченной структуры с уменьшенной плотностью дислокаций и увеличенной пластичностью кобальтовой связки, с минимальным количеством пор. При оптимальных режимах обработки методом АДУ твердосплавных пластин Т15К6, Т5К10, ВК6, ВК8 обеспечивается повышение ударной вязкости и предела прочности при изгибе на 19–24 % по сравнению с неупрочненными сплавами и сохранение исходной плотности и твердости структуры [1, 2, 5, 6, 9, 21, 28–30, 36–37, 41, 45–46, 49–51, 60, 61].

5. Результаты экспериментальных исследований влияния аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовое состояние и свойства (ударную вязкость, предел прочности при изгибе, плотность, твердость и глубину упрочнения) различных групп твердых сплавов, а также влияния исходных физико-механических свойств (до упрочнения) твердых сплавов на повышение эффективности АДУ, позволившие установить в структуре твердых сплавов эффекты залечивания пор, увеличения пластичности кобальтовой связки, уменьшения плотности дислокаций и степени искажений кристаллических решеток атомов компонентов твердых сплавов, обеспечивающие повышение ударной вязкости и предела прочности при изгибе при сохранении исходной высокой твердости твердых сплавов по сравнению с неупрочненными, что при увеличении исходной ударной вязкости степень повышения эффекта от АДУ увеличивается. Установлено, что после АДУ твердых сплавов происходит уменьшение пористости структуры с 0,4–0,7 до 0,02–0,05 %, снижается плотность дислокаций на 15,8–20,7 %, увеличивается пластичность кобальтовой связки, повышается упорядоченность кристаллических решеток  $\alpha$ -WC и  $\beta$ -Co (искажения уменьшаются для сплавов группы: ТК без АДУ с 0,07–0,08 % до 0,02 % – после АДУ; ВК без АДУ с 0,17–0,68 % до 0,08 % – после АДУ), по сравнению с

неупрочненными твердыми сплавами. Для твердосплавных пластин без упрочнения, имеющих исходную ударную вязкость: Т15К6 – 32,0 кДж/м<sup>2</sup>; Т5К10 – 33,7 кДж/м<sup>2</sup>; ВК8 – 35,0 кДж/м<sup>2</sup>, стойкость после АДУ повышается: для Т15К6 на 38 %, Т5К10 на 50 %, ВК8 на 285 % [1–6, 8–12, 14, 16, 17, 20, 23–32, 36–39, 42, 44–49, 51–57, 65, 67].

6. На основе разработанных математических моделей и методик параметрической оптимизации износа и ресурса режущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, установлены комбинированные взаимосвязи между режимами резания (скорость, подача, глубина резания), износом и ресурсом инструмента в виде степенных зависимостей как от однофакторного, так и многофакторного влияния режимов резания, позволившие выявить степень влияния режимов упрочнения и резания на стойкость и ресурс инструмента, определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальный ресурс инструмента. Доказано, что для твердосплавного инструмента с АДУ режимы резания оказывают более существенное влияние на ресурс инструмента по сравнению с неупрочненным инструментом. Так, для металлорежущих твердосплавных пластин группы ТК с АДУ при изменении режимов резания на 25–80 %, ресурс инструмента изменяется на 36–275 %. Для металлорежущих твердосплавных пластин группы ВК с АДУ при изменении режимов резания на 25–50 %, ресурс инструмента изменяется на 32–54 %. При работе металлорежущим твердосплавным инструментом с АДУ требуется установление оптимальных режимов резания. Например, максимальный ресурс твердосплавных пластин с АДУ обеспечивается на оптимальных режимах резания: скорость резания 147 м/мин, подача на зуб 0,09 мм/зуб, глубина резания 3,1 мм – при фрезеровании чугуна СЧ20 сплавом В35; соответственно 146,0 м/мин, 0,22 мм/зуб, 1,5 мм и 160,0 м/мин, 0,19 мм/зуб, 1,0 мм – при фрезеровании стали 45 сплавами МС131 и МС111. При обработке на оптимальных режимах резания твердосплавные пластины после АДУ превышают по стойкости неупрочненные пластины: МС131 в 2,4–3,3 раза; МС111 в 2,2–4,2 раза; В35 в 1,7–3,5 раза [1–5, 7, 13–15, 18, 24, 28–33, 46, 55, 56, 58–60].

7. В результате теоретических и экспериментальных исследований методом компьютерного моделирования влияния режимов резания на ресурс инструмента, упрочненного АДУ, установлена при заданном допустимом износе инструмента взаимосвязь между производительностью обработки, зависящей от скорости резания и подачи, и ресурсом инструмента в виде комбинированных аппроксимированных связей по степенным функциям. Использование АДУ обеспечивает повышение не только ресурса инструмента, но и производительности обработки по сравнению с неупрочненным твердосплавным инструментом. Установлено, что при фрезеровании чугуна СЧ20 инструментом из сплава В35 с АДУ на режимах резания ( $v = 146,5$  м/мин и  $s_z = 0,15$  мм/зуб) повышается производительность обработки на 26 % при повышенном в 2,3 раза ресурсе инструмента за счет повышения подачи на зуб с 0,09 до 0,15 мм/зуб. При фрезеровании стали 45 сплавом МС 131, упрочненным АДУ, на режимах резания  $v = 146$  м/мин и  $s_z = 0,28$  мм/зуб, наряду с увеличением ресурса инструмента на 170 % одновременно обеспечивается повышение производительности обработки на 20 % за счет повышения подачи на 27 % (относительно оптимальной  $s_z = 0,22$  мм/зуб). При фрезеровании стали 45 сплавом МС 111, упрочненным АДУ, на оптимальных режимах резания  $v = 160$  м/мин и  $s_z = 0,19$  мм/зуб, наряду с увеличением ресурса инструмента в 3,7 раза одновременно



повышается производительность обработки на 11 % за счет увеличения скорости резания на 3 % и подачи на 6 % относительно обработки неупрочненным инструментом [1–7, 13–15, 18–25, 28–31, 34–38, 41, 43, 46, 47, 54–56, 62, 64, 66].

8. На основании изучения влияния исходных физико-механических свойств твердых сплавов различных групп и условий протекания процесса прерывистого резания на стойкость инструмента, упрочненного АДУ, установлено, что с ухудшением условий обработки, связанных с увеличением количества ударов и непостоянства припуска во время резания, а также переменной толщиной срезаемого слоя металла, возникающей из-за наличия сложных взаимных движений инструмента и заготовки, например, при фрезерно-карусельной обработке, увеличивается эффективность метода АДУ. Также установлено, что для твердых сплавов группы ВК степень повышения стойкости значительно выше, чем для группы ТК. Для твердосплавного инструмента, упрочненного АДУ, при работе с наличием двух ударов за время одного реза (при врезании и выходе инструмента), достигается повышение стойкости: на 38–51 % – для Т5К10, Н30, Т15К6 и на 285 % – для В35, а при десяти ударах за один рез (на пути резания присутствуют дополнительно четыре канавки) для указанных сплавов на 30–31 % и 233 %. Стойкость твердосплавного инструмента, упрочненного АДУ, при фрезерно-карусельной обработке образцов из стали 45 с изменением мгновенной толщины срезаемого слоя металла в пределах обрабатываемой поверхности до 5 раз превышает стойкость неупрочненного инструмента на 48–62 % [1–6, 9, 15–17, 22–23, 24, 29–30, 33, 45, 48–50, 58–59, 63, 66].

9. Теоретические исследования реологических процессов, происходящих в зоне резания твердосплавных инструментов, упрочненных АДУ, при прерывистом резании, позволили установить повышение эксплуатационных характеристик упрочненных инструментов за счет возникновения эффектов, связанных со снижением контактных давлений, скорости скольжения, интенсивности изнашивания, температуры и сил резания, что объясняется снижением в зоне резания коэффициентов трения и усадки стружки из-за уменьшения пористости рабочих поверхностей инструмента. Имитационным моделированием с использованием разработанной реологической модели износа режущего лезвия инструмента установлено, что в зоне резания металлорежущих твердосплавных пластин, упрочненных АДУ, уменьшаются: интенсивность изнашивания в 1,6 раза, контактные давления, скорость скольжения и температура в 1,3–1,9 раза, силы резания по оси X в 1,2 раза, по оси Y – в 1,5 раза, при этом, что установлено экспериментально, происходит снижение коэффициентов трения по задней поверхности при 60-минутной стойкости инструмента на 19–22 % и усадки стружки на 3,7–4,8 %, за счет чего достигается снижение износа твердосплавных пластин на 19–38 % по сравнению с неупрочненными пластинами при фрезеровании в течение 60 мин [2, 16, 30, 35, 40, 47, 52].

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

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны и изготовлены четыре установки для АДУ: КДИЖАН. 443249.001, КДИЖАН.443249.002, КДИЖАН.443249.005 и КДИЖАН. 443249.007. Разработаны четыре технологии (ТДИЖАН.440328.001, ТДИЖАН.440328.002, ТДИЖАН.440328.003, ТДИЖАН.440328.004) упрочнения методом АДУ, созданы технические условия ТУИЖАН. 440327.008, которые использованы на машиностроительных предприятиях Беларуси: ОАО «Могилевский завод Электродвигатель»,

г. Могилев (при упрочнении твердосплавных металлорежущих пластин ZNT-110408 Т5К10); ОАО «Могилевский завод Строммашина» (твердосплавных пластин PNUA-110408 ВК8); ЗАО «Промлизинг», г. Могилев (пластин Т15К6); ОАО «СтакоГомель» (твердосплавные пластины Н10 PNUA-110408); ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит» (ножей твердосплавных 2021-0015 ВК8 ГОСТ 24359-80); ОАО «Могилевлифтмаш» (пластин сменных многогранных твердосплавных PNUA сплава Т5К10, ножей 2020-0003 Т5К10 60° ГОСТ 24359-80, ножей твердосплавных 2020-0004 Т5К10 90° ГОСТ 24359-80, резцов прорезных напайных 2184-4024 ВК8, пластин сменных многогранных твердосплавных WNUM-120612 сплава Т15К6, фрез твердосплавных для Т-образных пазов 2254-4027 из сплава Т15К6). Прошла апробация на предприятиях России: ОАО «Победит», г. Владикавказ (твердосплавных пластинах формы 10114-110408 Т15К6 и ВК8); ЗАО «НИР» г. Рыбинск (фрезы твердосплавные концевые М113-100072W Н24 и М136-120083 Н24 с нанесенным методом PVD покрытием TiAlCrN). В производственных условиях подтверждено, что стойкость упрочненного твердосплавного режущего инструмента увеличивается в зависимости от обрабатываемого материала, вида инструмента и условий обработки в 1,8–3,8 раза по сравнению с неупрочненным инструментом. Высокую эффективность показал метод АДУ применительно к резцам для добычи калийных руд в условиях ОАО «Беларускалий» – происходит снижение потребления резцов в 2,49 раза. При годовом потреблении ОАО «Беларускалий» таких и аналогичных резцов на сумму 3,0 млн долларов США применение метода АДУ способно значительно повысить эффективность добычи калийных руд [50, 51, 53, 56, 62, 64, 66].

Внедрено в производство четыре технологии (ТДИЖАН.440328.001, ТДИЖАН.440328.002, ТДИЖАН.440328.003, ТДИЖАН.440328.004) упрочнения АДУ инструмента, работающего с ударными нагрузками: пластин твердосплавных, фрез, сверл спиральных, метчиков, плашек, ножей для фрез на ООО ТД «ИТО-Туламаш», г. Москва, Россия с годовым экономическим эффектом 36 734 200,00 российских рублей; пластин режущих сменных многогранных твердосплавных на ООО «Станкоинструмент» г. Смоленск, Россия с годовым экономическим эффектом в размере 14 747 040,00 российских рублей; твердосплавных пластин и резцов токарных напайных на ЗАО «Промлизинг», г. Могилев, Беларусь с годовым экономическим эффектом в размере 27 715,96 белорусских рублей; ножей вставных твердосплавных 2021-0015 ВК8 для фрез торцовых на ОАО «Мозырский машиностроительный завод», г. Мозырь, Беларусь с экономическим эффектом от внедрения в сумме 8 619,34 белорусских рублей. Общий объем внедрений научно-технической продукции с использованием результатов диссертационной работы составил 803 670,71 долларов США [21, 51, 54, 56, 62].

Результаты работы внедрены в образовательный процесс УО «Барановичский государственный университет» в лекционных материалах и практикумах по дисциплинам «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей» специальности 1-36 80 03 «Машиностроение и машиноведение», «Технология машиностроения», МОУВО «Белорусско-Российский университет» в курсе лекций «Технология машиностроения» для студентов 4–5 курсов, обучающихся по специальностям 1–36.01.01, 1–36.01.03, 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 твердосплавного режущего инструмента. Перспективным является использование полученных методик, математических моделей и алгоритмов применительно не только к твердосплавному металлорежущему инструменту, но и к любому металлорежущему и горнодобывающему инструменту, работающему с ударными нагрузками [63].

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных в ходе выполнения работы, защищены 4 патентами Республики Беларусь и Российской Федерации [64–67].

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line at the end.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ****Монографии**

1. Жигалов, А. Н. Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А. Н. Жигалов. – Могилев: УО «МГУП», 2013. – 236 с.

2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.

**Статьи в рецензируемых журналах и сборниках**

3. Maslov, A. R. A Method of Increasing Hard-Alloy Wear Resistance via Aerodynamic Impact / A. R. Maslov, A. N. Jigalov // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – No. 5. – P. 421–425.

4. Маслов, А. Р. Повышение сопротивления изнашиванию твердых сплавов методом аэродинамического воздействия / А. Р. Маслов, А. Н. Жигалов // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 35, № 5. – С. 461–466.

5. Жигалов, А. Н. Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры режущих твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. Р. Маслов, Г. Ф. Шатуров // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 8. – С. 20–23.

6. Zhigalov, A. N. Improved Hard Alloys for Efficient Milling / A. N. Zhigalov, A. R. Maslov, G. F. Shaturov // *Rossian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35, No. 11. – P. 818–821.

7. Жигалов, А. Н. Влияние износа твердых сплавов, упрочненных аэродинамическим воздействием, на шероховатость обработанной поверхности при фрезерно-карусельном резании / А. Н. Жигалов // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2017. – № 3 (56). – С. 5–15.

8. Zhigalov, A. N. Investigation of the carbide-tipped tool wear hardened by method of aerodynamic impact / A. N. Zhygalov, V. V. Stupnytskyi // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 11–23.

9. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // *Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр.* – Минск, 2018. – Вып. 31. – С. 37–48.

10. Жигалов, А. Н. К теории аэродинамического упрочнения: колебательные процессы в кристаллической решетке твердых сплавов / А. Н. Жигалов // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2018. – № 3 (60). – С. 77–86.

11. Жигалов, А. Н. Самоорганизация структуры системы TiC-Co при аэродинамическом упрочнении / А. Н. Жигалов, А. Р. Маслов // *Вестн. МГТУ «Станкин»*. – 2018. – № 4 (47). – С. 81–86.

12. Шелег, В. К. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // *Наука и техника*. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 11–20.

13. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента,

упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Технич. науки. – 2019. – Вып. № 7. – С. 49–63.

14. Жигалов, А. Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, В. К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 36–47.

15. Шелег, В. К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 56–65.

16. Жигалов, А. Н. Реологическое моделирование процесса резания твердосплавным инструментом, упрочненным аэродинамическим воздействием, в программе DEFORM / А. Н. Жигалов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 2 (81). – С. 15–24.

17. Жигалов, А. Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовый состав и плотность дислокаций твердого сплава ВК8 / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 71–81.

18. Шелег, В. К. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Наука и техника. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 271–279.

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

20. 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. Технич. науки. – 2020. – Вып. № 8. – С. 69–78.

21. Жигалов, А. Н. Эффективность аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента в условиях ОАО «Мозырский машиностроительный завод / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, В. Г. Телеш // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 2. – С. 33–43.

22. Влияние геометрических параметров микрорельефа на передней поверхности твердосплавного лезвийного инструмента и режимов обработки на процесс наростообразования при низких и средних скоростях резания / А. Н. Жигалов, Д. Г. Шатуров, А. А. Жолобов, А. С. Ранцевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3 (68). – С. 35–47.

23. Жигалов, А. Н. Термодинамическая модель метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег, Д. Д. Богдан // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 4 (53). – С. 65–69.

### **Материалы конференций и тезисов докладов**

24. Жигалов, А. Н. Повышение стойкости и ударной вязкости твердосплавного инструмента аэродинамическим воздействием / А. Н. Жигалов // Современные тех-

нологии обработки деталей из титана, легированных сплавов монолитным твердосплавным инструментом с нанопокрытием : материалы V науч.-практ. конф. инструментальных производств в рамках ЦК ТПП ОДК, Рыбинск, 18–19 сент. 2014 г. / НИР. – Рыбинск, 2014. – С. 28–29.

25. Жигалов, А. Н. Нанотехнологическое направление предприятия ЗАО «Промлизинг» / А. Н. Жигалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 3.

26. Жигалов, А. Н. Дислокационная история создания и производства твердых сплавов / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 106–107.

27. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового воздействия на дислокационную структуру твердых сплавов / А. Н. Жигалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 105.

28. Жигалов, А. Н. Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. Р. Маслов // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых*, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 62.

29. Жигалов, А. Н. Применение инновационных режущих твердых сплавов в современных промышленных производствах / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров // *Образование, наука и производство в XXI веке : современные тенденции развития : материалы юбилейной Междунар. конф.*, Могилев, 3–4 нояб. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 167.

30. Жигалов, А. Н. Оценка точности измерений при исследовании метода аэродинамического упрочнения / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, Д. А. Жигалова // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых*, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 26.

31. Жигалов, А. Н. Прогрессивные технологии для процессов резания с ударами / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // *Прогресивні технології в машинобудуванні : матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф.*, Львів-Карпати, 5–10 лют. 2018 р. / Нац. ун-т. – Львів, 2018. – Р. 47–49.

32. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового упрочнения на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / Белорус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 131–132.

33. Жигалов, А. Н. Актуальность применения аэродинамического звукового упрочнения для повышения ресурсной стойкости твердосплавных зубков / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Содружество наук, Барановичи-2018 : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. молодых исследов., Барановичи, 17 мая 2018 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2018. – С. 83–85.

34. Жигалов, А. Н. Исследование работоспособности зубков Д6-22М, упрочненных методом аэродинамического звукового упрочнения, в шахтных условиях на ОАО «Беларускалий» / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2018 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 44–45.

35. Жигалов, А. Н. Моделирование процесса резания твердосплавным инструментом, упрочненным аэродинамическим воздействием, в программном продукте DEFORM / А. Н. Жигалов // Современные проблемы машиностроения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 94–96.

36. Жигалов, А. Н. Влияние волн звуковой частоты на упрочнение твердых сплавов / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Технология-Оборудование-Инструмент-Качество : тезисы докл. 33-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11 апр. 2018 г. / В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2018. – С. 65–66.

37. Шелег, В. К. Основы создания и исследование метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Перспективные направления развития технологий машиностроения и металлообработки : тезисы докл. 34-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 марта 2019 г. / В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2019. – С. 184–186.

38. Жигалов, А. Н. Методы упрочнения твердосплавного инструмента, их достоинства и недостатки / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, О. Н. Кляус // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2019 г. / Беларус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 39–40.

39. Жолобов, А. А. Особенности производства твердосплавного инструмента основными мировыми производителями / А. А. Жолобов, А. Н. Жигалов, А. В. Богданов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2019 г. / Беларус.-Рос. ун-т. ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 41.

40. Жигалов, А. Н. Исследование процессов фрезерования в программном продукте DEFORM / А. Н. Жигалов, А. Д. Филиппович // Содружество наук, Барановичи-2019 : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. молодых исследов., Барановичи, 16 мая 2019 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 26–27.

41. Кандыбович, И. С. Эффективность упрочнения деревообрабатывающих ножей ионно-плазменным азотированием / И. С. Кандыбович, А. Н. Жигалов // Содружество наук, Барановичи-2019 : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. молодых исследов., Барановичи, 16 мая 2019 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 28–29.

42. Шелег, В. К. Инновации при создании метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жига-лов // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. / Брест : БрГТУ, 2019. – С. 51–54.

43. Шатуров, Д. Г. Методика исследования технологических параметров через полином второго степени / Д. Г. Шатуров, А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. / Брест : БрГТУ, 2019. – С. 117–120.

44. Жигалов, А. Н. Алгоритм энергообмена при температурно-волновом воздействии метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жига-лов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т прикладной физ. проблем им А. Н. Севченко» Беларус. гос. ун-та. ; редкол. : В. И. Попечиц (гл. ред.), Ю. И. Дудчик, Г. А. Сенкевич. – Минск, 2019. – С. 178–180.

45. Шелег, В. К. Инновации при реализации метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2019) : X Междунар. науч.-практ. конф., Кузбасс, 26–29 нояб. 2019 г. : сб. тр. / Кемерово : КПУ, 2019. – С. 577–582.

46. Жигалов, А. Н. Исследование влияния ионно-плазменного азотирования на износ дереворежущих ножей / А. Н. Жигалов, И. С. Кандыбович, Д. В. Калоша // Техника и технологии: инновации и качество, Барановичи-2019 : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2019 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 49–51.

47. Жигалов, А. Н. Исследование износа твердосплавного фрезерного инструмента, упрочненного аэродинамическим методом, в программе Deform / А. Н. Жигалов, Л. Л. Сотник, А. Д. Филипович // Техника и технологии: инновации и качество, Барановичи-2019 : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2019 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 51–53.

48. Жигалов, А. Н. Теория и практика аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Техника и технологии: инновации и качество, Барановичи-2019 : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2019 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2019. – С. 53–54.

49. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы механизма аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов // Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 10–11 окт. 2019 г. / Ин-т технологии металлов Нац. Акад. Наук Беларуси, Администрация своб. экон. зоны «Могилев», Беларус.-Рос. ун-т : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 35–37.

50. Богдан, Д. Д. Аэродинамическое звуковое упрочнение как способ упрочнения горно-режущего инструмента / Д. Д. Богдан, А. Н. Жигалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки



и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 31–32.

51. 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. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 37–38.

52. Степанович, П. В. Методика и результаты исследований кольца стопорного в САД-системе КОМПАС-3D / П. В. Степанович, А. Н. Жигалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 100–101.

53. Богдан, Д. Д. Анализ эксплуатационных свойств твердосплавного горно-режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / Д. Д. Богдан, А. Н. Жигалов // *Наука-практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф.*, Барановичи, 15 мая 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 91–93.

54. Шелег, В. К. Рекомендации по практическому использованию метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // *Наука-практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф.*, 15 мая 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 152–154.

55. 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 : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 110–111.

56. Горавский, И. А. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на стойкость осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // *Наука-практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф.*, 15 мая 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 102–104.

57. Жигалов, А. Н. Термодинамическая модель метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег, Д. Д. Богдан // *Наука-практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф.*, 17 сент. 2020 г. / ОИМ. – Минск, 2020. – С. 38–39.

58. Шелег, В. К. Эффективность аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // *Инновации в машиностроении (ИнМаш-2020) : XI Междунар. науч.-практ. конф.*, Бийск, 19–20 окт. 2020 г. / Алт. Гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 2020. – С. 65–71.

59. Богдан, Д. Д. Основы моделирования процесса резания калийной руды тангенциальными поворотными резцами с твердосплавной режущей вставкой /

Д. Д. Богдан, А. Н. Жигалов, Д. В. Лебёдко // Векторы инновационного развития: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 58–60.

60. Горавский, И. А. Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 64–66.

61. Степанович, П. В. Анализ результатов испытания кольца стопорного на машине разрывной / П. В. Степанович, К. С. Винничек, А. Н. Жигалов // Векторы инновационного развития: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 72–74.

62. Жигалов, А. Н. Особенности разработки методики определения экономического эффекта от применения метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов, Т. А. Саковец // Векторы инновационного развития: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2020. – С. 66–67.

63. 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 // Нау- ка – практике: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 13 мая 2021 г. / БарГУ : редкол. В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2021. – С. 28–29.

### Патенты

64. Резец для обработки поверхностей: пат. ВУ 9139 / А. Н. Жигалов, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, М. В. Панков. – Опубл. 30.04.2013.

65. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. RU 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Опубл. 20.07.2015.

66. Резец для обработки поверхности : пат. ВУ 20818 / А. Н. Жигалов, Д. Г. Шатуров, М. В. Панков, Г. Ф. Шатуров. – Опубл. 28.02.2017.

67. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Опубл. 30.06.2017.

## РЭЗІЮМЭ

Жыгалаў Анатолій Мікалаевіч

**Тэарэтычныя і тэхналагічныя асновы аэрадынамічнага гукавога ўмацавання цвёрдасплаўнага металарэзнага інструмента для перарывістых працэсаў рэзаньня**

**Ключавыя словы:** аэрадынамічнае гукавое ўмацаванне, цвёрдасплаўны металарэзны інструмент, гукавая частата, рэзананс, шчыльнасць дыслакацый, ударная глейкасць, знос, стойкасць, рэсурс.

**Мэта працы** – распрацоўка тэарэтычных і тэхналагічных асноў аэрадынамічнага гукавога ўмацавання цвёрдасплаўнага металарэзнага інструмента для павышэння яго эфектыўнасці пры перарывістых працэсах рэзаньня.

**Метады даследавання і апаратура.** Матэматычныя мадэлі атрыманы з выкарыстаннем палажэнняў тэорыі хвалевага працэсаў, квантавай фізікі, класічнай цеплаёмкасці і тэрмадынамікі, дыслакацый, самаарганізацыі і хаацізацыі, пружкасці і пластычнасці, рэалогіі, а таксама з ужываннем тэхналогіі функцыянальна-арыентаванага праектавання і імітацыйнага мадэлявання. Даследаванні структуры і ўласцівасцяў цвёрдых сплаваў выраблены з ужываннем стандартных метадык.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Створаны навуковыя асновы, матэматычныя мадэлі і алгарытмы сінтэзу з’яў для дасягнення і захавання эфекту зніжэння дэфектнасці крышталічнай структуры і дыслакацыйных утварэнняў у цвёрдых сплавах, на падставе якіх распрацаваны механізм аэрадынамічнага гукавога ўмацавання цвёрдасплаўнага інструмента для працэсаў перарывістага рэзаньня, а таксама яго фізічная мадэль. Устаноўлены аптымальныя параметры ўмацавання пры аэрадынамічнаму гукавым ўмацаванні і рэжымы рэзаньня ўмацаваным інструментам.

Распрацаваны рэалагічная мадэль працэсу зносу цвёрдасплаўнага інструмента і метады імітацыйнага мадэлявання з’яў, якія адбываюцца ў зоне рэзаньня. Выведзеныя матэматычныя залежнасці параметраў рэзаньня пры фрэзерна-карусельнай апрацоўцы, якія дазваляюць ажыццяўляць аптымізацыю схемы базіравання нарыхтоўкі, відаў інструмента і рэжымаў рэзаньня для павелічэння прадукцыйнасці апрацоўкі перарывістых паверхняў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Распрацаваны метадыка і алгарытмы ўмацавання аэрадынамічным гукавым метадам цвёрдасплаўнага інструмента, укаранены на ТАА ГД «ІТО-Туламыш», г. Масква, ААА «Станкоінструмент», ЗАТ «Прамлізінг», г. Магілёў, ААТ «Мазырскі машынабудаўнічы завод». Вынікі тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў метаду АГУ ўкаранены ў адукацыйны працэс УА «БарДУ» і МОУВО «БРУ».

**Галіна выкарыстання.** Машынабудаўнічая і інструментальная вытворчасць, падрыхтоўка спецыялістаў па металаапрацоўцы.

## РЕЗЮМЕ

**Жигалов Анатолий Николаевич**

**Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного металлорежущего инструмента для прерывистых процессов резания**

**Ключевые слова:** аэродинамическое звуковое упрочнение, твердосплавный металлорежущий инструмент, звуковая частота, резонанс, плотность дислокаций, ударная вязкость, износ, стойкость, ресурс.

**Цель работы** – разработка теоретических и технологических основ аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного металлорежущего инструмента для повышения его эффективности при прерывистых процессах резания.

**Методы исследования и аппарата.** Математические модели получены с использованием положений теории волновых процессов, квантовой физики, классической теплоемкости и термодинамики, дислокаций, упругости и пластичности, реологии, а также с применением технологии функционально-ориентированного проектирования и имитационного моделирования. Исследования структуры и свойств твердых сплавов произведено с применением стандартных методик.

**Полученные результаты и их новизна.** Созданы научные основы, математические модели и алгоритмы синтеза явлений для достижения и сохранения эффекта снижения дефектности кристаллической структуры и дислокационных образований в твердых сплавах, на основании которых разработан механизм аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания, а также его физическая модель. Установлены оптимальные параметры упрочнения при аэродинамическом звуковом упрочнении и режимы резания упрочненным инструментом.

Разработана реологическая модель процесса износа твердосплавного инструмента и метод имитационного моделирования явлений, происходящих в зоне резания. Выведены математические зависимости параметров резания при фрезерно-карусельном резании, позволяющие осуществлять оптимизацию схемы базирования заготовки, видов инструмента и режимов резания для увеличения производительности обработки прерывистых поверхностей.

**Рекомендации по использованию:** разработана методика и алгоритмы упрочнения аэродинамическим звуковым методом твердосплавного инструмента, внедренные на ООО ТД «ИТО-Туламаш», г. Москва, ООО «Станкоинструмент», г. Смоленск, ЗАО «Промлизинг», г. Могилев, ОАО «Мозырский машиностроительный завод». Результаты теоретических и экспериментальных исследований метода АДУ внедрены в образовательный процесс УО «БарГУ» и МОУВО «БРУ».

**Область применения.** Машиностроительное и инструментальное производство, подготовка специалистов по металлообработке.

## SUMMARY

Jigalov Anatoli Nikolaevich

### **Theoretical and technological foundations of aerodynamic sound hardening of metal-cutting carbide tools for cutting intermittent processes**

**Key words:** aerodynamic sound hardening, metal-cutting carbide tool, sound frequency, resonance, dislocation density, impact strength, resistance, resource.

**The purpose of the work** is to develop the theoretical and technological foundations of aerodynamic sound hardening of a metal-cutting carbide tool to increase its efficiency in intermittent cutting processes.

**Research methods and equipment.** The mathematical models are obtained using the principles of the theory of wave processes, quantum physics, classical heat capacity and thermodynamics, dislocations, self-organization and chaotization, elasticity and plasticity, rheology, as well as using technology-oriented engineering and imitation modeling. The researches of the structure and properties of hard alloys are carried out using standard techniques.

**The results and their novelty.** The scientific foundations, mathematical models and synthesis algorithms of phenomena have been created to achieve and maintain the effect of reducing the defects in the crystal structure and dislocation formations in hard alloys, on the basis of which the mechanism of aerodynamic sound hardening of a carbide tool for intermittent cutting processes and its physical model have been developed. The optimal hardening parameters for the aerodynamic sound hardening and the cutting modes with the hardened tool have been established.

The rheological model of the process of carbide tool's wear and tear and the method of imitation modeling of phenomena, occurring in the cutting zone, have been developed. The mathematical dependences of the thread parameters during milling, which allow optimizing the basing schemes of workpieces, types of tools and cutting modes to increase the productivity of processing intermittent surfaces, have been received.

**Application recommendations:** the methodology and hardening algorithms of the carbide tool's hardening by the method of aerodynamic sound hardening have been developed, which were implemented at LLC TH «ITO-Tulamash», Moscow, LLC «Stankoinstrument», Smolensk, CJSC «Promlizing», Mogilev, OJSC «Mozyr Machine-Building Plant». The results of theoretical and experimental researches of the ASH method were embedded in the educational process of the educational institution «BarSU» and the educational institution «BRU».

**The application area.** Machine-building and tool manufacturing, training of metal-working specialists.

Научное издание

**ЖИГАЛОВ**  
**Анатолий Николаевич**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ  
ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ**

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

Подписано в печать 04.11.2021. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 70. Заказ 646.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

Лист изменений

в текст автореферата диссертации Жигалова Анатолия Николаевича «Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

№ п/п	Написано	Следует читать
1.	Титульный лист УО «Барановичский государственный университет», «Белорусско-Российский университет»	Титульный лист Белорусский национальный технический университет

Соискатель



А.Н. Жигалов

Ученый секретарь совета Д 02.05.03,  
д.т.н., профессор



О.Г. Девойно