

На правах рукописи

УДК 621.9.048.7

**ЛИ СЮЕЯНЬ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НОЖЕЙ РОТОРНЫХ  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальности:

05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Ли Сюеянь*

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный  
руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович**

Официальные  
оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**МОРОЗОВ Валентин Васильевич**  
ФГОУ ВО «Владимирский политехнический институт имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
Заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»

кандидат технических наук, доцент  
**ФЕДОРОВ Сергей Вольдемарович**  
ФГОУ ВО Московский государственный технологический университет СТАНКИН.  
Доцент

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева**

Защита состоится «\_\_» 2020 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5, стр.1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.141.06  
кандидат технических наук, доцент



Богданов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность** темы исследований.

В последние годы в таких областях как: авиастроение, ракетостроение и космонавтика, автомобилестроение, двигателестроение и др. все шире применяются полимерные материалы (ПМ). Очевидно, что в ближайшее время придется столкнуться с проблемой необходимости массовой переработки изделий, в которых велика доля ПМ. Одним из перспективных путей решения проблемы утилизации ПМ является их вторичная переработка. В качестве базовой технологии переработки ПМ принята так называемая «совместная утилизация», предполагающая использование измельченных отходов ПМ в качестве сырья для производства новых материалов. Метод «совместной утилизации» и все существующие методы термической и химической переработки ПМ требуют предварительной сегментации изделий и деталей из ПМ вплоть до порошкового состояния.

Таким образом, требуется создание эффективных методов механической обработки и специального инструмента для измельчения отходов деталей из ПМ. На сегодняшний день для этих целей в основном используются механические установки различных конструкций, чаще всего роторные дробилки, характеризующиеся высокой производительностью и эффективностью.

К одному из серьезных недостатков эксплуатации роторных дробилок следует отнести относительно низкую стойкость используемых в них ножей и необходимость их перетачивания каждые 150-170 часов работы. Поэтому создание новых видов режущего инструмента, отличающихся повышенной стойкостью и технологичностью, а также средств их экспресс диагностики, является актуальной и научно значимой задачей.

В настоящее время в роторных установках чаще всего используются ножи, изготавливаемые преимущественно из стали 6ХВ2С. Недостатками которых является их относительно низкая стойкость и высокая стоимость. Устранить данные недостатки возможно путем перехода на изготовление биметаллических ножей, обладающих широким спектром положительных характеристик: малым расходом дорогостоящих легированных инструментальных сталей, возможностью самозатачивания, невысокой себестоимостью изготовления, использованием различных комбинаций материалов и др. Однако широкие возможности для варьирования технологических параметров, потенциально влияющих на технико-экономические и эксплуатационные характеристики, требуют создания информативных экспресс методов диагностики биметаллического инструмента, которые крайне востребованы на этапах технологической подготовки его производства.

В последнее время на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана появилась серия работ, иллюстрирующих принципиальную возможность получения информации о параметрах состояния поверхностного слоя различных материалов и изделий путем воздействия на них высокоскоростной струи жидкости (ультраструи). Тем не менее, исследований, направленных на оценку возможности применения

данного метода для оценки качества и эксплуатационных свойств режущего инструмента не было. Использование метода экспертных оценок, показало, что технология ультраструктурной диагностики (УСД) является перспективной и обладает большим научно-техническим и практическим потенциалом в информационном обеспечении инструментального производства.

В связи с этим, задача по реализации потенциала средств ультраструктурной диагностики с целью получения оперативной информации об эксплуатационно-технологических параметрах режущего инструмента для переработки ПМ является **актуальной**, имеет научное и практическое значение.

В результате УСД и анализа характеристик гидроэрозионного разрушения поверхности отдельных участков режущего инструмента формируется диагностическая информация о его состоянии и эксплуатационно-технологических характеристиках. При этом, основой технологии УСД может являться оборудование, применяемое для гидроабразивной резки материалов с соответствующими технологическими параметрами (рабочее давление от 100 до 400 МПа, скорость струи в пределах от 300 до 1000 м/с, скорость подачи от 1 до 100 мм/с).

**Целью диссертационной работы** является формирование и реализация научно-прикладных подходов по разработке конструкции, технологии и ультраструктурной диагностики режущего инструмента, используемого для переработки полимерных материалов.

### **Основные задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ литературных источников по вопросам переработки ПМ и применяемого для этих целей оборудования и режущего инструмента, рассмотреть различные виды технологического воздействия для получения диагностической информации об эксплуатационно-технологических характеристиках режущего инструмента.

2. Методом экспертных оценок выявить и обосновать потенциально наиболее перспективные методы и средства диагностики режущего инструмента.

3. Осуществить численное моделирование процесса ультраструктурной диагностики режущего инструмента с применением водо-полимерных струй;

4. Осуществить экспериментальную оценку эффективности применения традиционных и ультраструктурного метода диагностики режущего инструмента, построить корреляционные зависимости между их информативными диагностическими показателями.

5. Разработать инженерную методику ускоренного определения эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристик биметаллического режущего инструмента путем анализа результатов имитационного воздействия на него ультраструктурной водо-полимерной супензии;

6. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований рассмотреть возможность создания модернизированного режущего инструмента, обеспечивающего более высокие потребительские свойства;

7. Разработать рекомендации по практическому применению результатов

исследований, осуществить их промышленную апробацию и внедрение.

**Научной новизной исследования является** теоретически обоснованное и экспериментально подтвержденное положение о наличии однозначной связи эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристик режущего инструмента, применяемого для переработки ПМ, с результатами диагностического воздействия на него водо-полимерной ультраструи.

Признаками научной новизны обладают:

1. Обоснование применения водо-полимерной ультраструи как средства имитационного воздействия на режущий инструмент с целью получения диагностической информации о его параметрах качества методом экспертных оценок.

2. Разработанная конечно-элементная модель процесса взаимодействия водо-полимерной ультраструи с режущей поверхностью инструмента для переработки ПМ, позволяющая устанавливать соответствие параметров образовавшейся гидрокаверны с физико-механическими и эксплуатационно-технологическими характеристиками режущего инструмента.

3. Доказательство физико-технологического подобия механизма воздействия водо-полимерной ультраструи на режущий инструмент процессам изменения его поврежденности при эксплуатации в условиях резания (переработки) ПМ на роторных установках.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. Разработан и изготовлен режущий инструмент для переработки ПМ со сменными режущими пластинками, обладающий повышенным ресурсом и обеспечивающий возможность сокращения времени при проведении планового обслуживания и ремонта оборудования.

2. Разработана и апробирована в производственных условиях инженерная методика ускоренного определения эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристик режущего инструмента путем анализа результатов имитационного воздействия на него водо-полимерной ультраструйной супензии.

3. Сформулированы практические рекомендации по применению результатов исследований для ультраструйной водо-полимерной диагностике режущего инструмента для переработки ПМ.

4. Разработанная конечно-элементная модель процесса взаимодействия водо-полимерной ультраструйной супензии с режущей поверхностью инструмента для переработки ПМ позволяет сократить время на этапе технологической подготовки производства, в том числе при подборе инструментальных материалов.

5. Результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке специалистов по специальности «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» (дисциплина: «Технология ракетно-космической техники», «Специальные методы структуро- и формообразования»).

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические положения гидроэрозионного разрушения, метод экспертного оценивания, метод конечных элементов. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием

методов математической статистики. Подготовка к проведению экспериментальных исследований осуществлялась с использованием положений теории планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартного и специального оборудования, в частности машины для фрикционных испытаний, установки для гидроабразивной резки материалов (MultiCam WaterJet Systems, США), твердомер и др. При решении задач численного моделирования использовался программный комплекс ANSYS. Для металлографических исследований использовался микроскоп МИМ-1600Б.

**На защиту выносится:**

1. Обоснование методом экспертного оценивания перспективности ультраструктурного физико-технологического воздействия с позиций получения требуемой диагностической информации об эксплуатационных свойствах режущего инструмента.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование возможности определения физико-механических и эксплуатационно-технологических характеристик материалов режущего инструмента путем ультраструктурного воздействия на них.

4. Результаты сопоставительного анализа количественных критериев оценки эксплуатационных характеристик различных традиционных методов контроля, натурных испытаний режущего инструмента, и установленные высокие значения их корреляции с методом водо-полимерной ультраструктурной диагностики.

5. Разработанная инженерная методика оценки физико-механических и эксплуатационно-технологических характеристик режущего инструмента путем кратковременного воздействия на него водо-полимерными ультраструктурами.

6. Конструкторско-технологические решения по созданию режущего инструмента со сменными перетачиваемыми режущими пластинами для переработки ПМ.

**Апробация результатов работы.**

Вошедшие в диссертационную работу результаты докладывались на Второй и Третьей Международных молодежных конференциях «Новые подходы и технологии системного проектирования, производства, эксплуатации и промышленного дизайна изделий аэрокосмической техники» 2018 г, 2019 г; на десятой Всероссийской конференции Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), 2018г; на Международной конференции «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии», 2019 г; на международной конференции «Королевские чтения», 2019 г; на Второй Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста», г. Севастополь, 2019 г; на сорок пятой Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» за 2019 г.

**Реализация и внедрение результатов** работы осуществлялось на предприятиях: ООО «Астрелати», г. Москва, РФ и ОХП «НИИ ИП с ОП», г. Минск, Беларусь. Данное исследование проводилось в рамках гранта Президента

Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081.

**Личный вклад** автора состоит в анализе и систематизации данных, известных из литературных источников и полученных в результате выполнении экспериментов и теоретических исследований, проведении численного моделирования взаимодействия водо-полимерной ультраструи с материалами режущего инструмента, расчёте и анализе корреляции значений информативных параметров различных методов контроля, натурных испытаний с диагностическими данными ультраструктурной диагностики, создании и апробации инженерной методики оценки физико-механических и эксплуатационно-технологических характеристик режущего инструмента, применяемого для переработки ПМ, подготовке публикаций к изданию.

### **Публикации.**

Основное содержание работы отражено в одном патенте и девяти публикациях, в том числе, в двух изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержит 145 страниц, в том числе 85 иллюстраций, 31 таблица.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** раскрывает сущность исследуемой проблемы, ее актуальность и возможные пути решения, используемые понятия, основные положения, выносимые на защиту, определяющие научную новизну и практическую ценность работы.

**В первой главе** приведены результаты статистического анализа объемов производства полимерных материалов в мире, рассмотрена проблема их утилизации, требующая создания новых перерабатывающих технологий, более эффективного оборудования и инструмента. Установлено, что все традиционные методы утилизации требуют предварительно измельченного сырья, для получения которого широко применяются роторные перерабатывающие установки (дробилки) со специальным режущим инструментом – ножами. Показано, что традиционный инструмент не отвечает предъявляемым к нему требованиям в частности к малому межремонтному интервалу регламентных работах, необходимому, прежде всего, для перетачивания ножей. Предлагается рассмотреть возможность изготовления ножей биметаллической конструкции, применение которых позволит устраниить имеющиеся недостатки. Отмечается также отсутствие эффективных методов оценки качества и эксплуатационных характеристик ножей для утилизации ПМ.

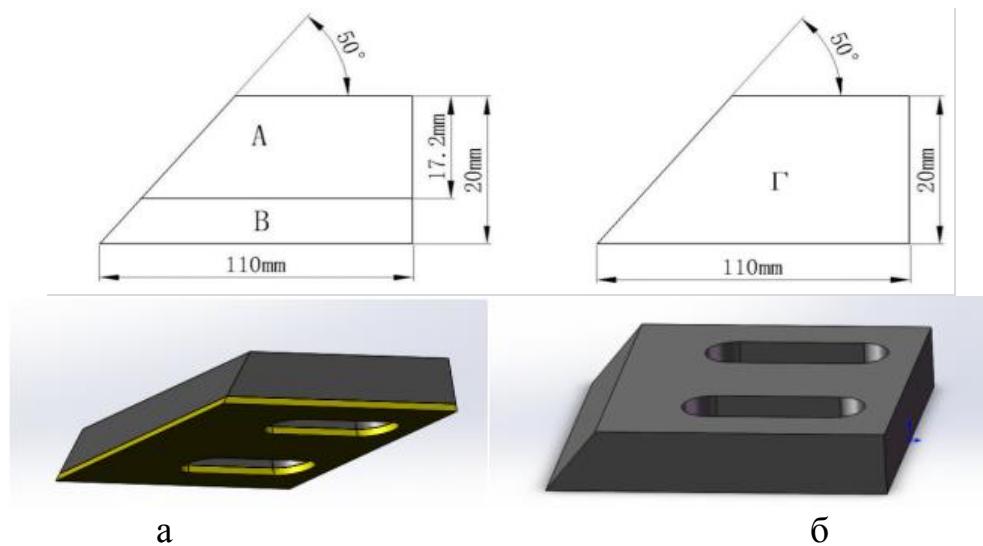
Производство ПМ во всем мире растет средними темпами на 5-7% в год. Производство ПМ в России отстает от общемирового, но его объем все равно измеряется десятками тысяч тонн. Значительное увеличение объемов применения ПМ отмечено в аэрокосмической промышленности. Из ПМ изготавливаются

детали и узлы спутников, космических аппаратов, ракет-носителей и объем их внедрения постоянно увеличивается. Аналогично ситуация складывается и в самолетостроении. А это значит, что уже в ближайшее время проблема утилизации ПМ поднимется с новой остротой. Это требует принятия опережающих мер по разработке, как новых технологий переработки, так и модернизации старых методов. В данном исследовании рассматривается актуальная задача повышения эксплуатационных свойств режущего инструмента, применяемого в роторных дробилках (измельчителях) для переработки ПМ. Создание нового инструмента помимо прочего требует и опережающей разработки соответствующих методов диагностирования и контроля качества.

Анализ литературных источников, в частности диссертационных работ, опубликованных за последние десять лет, показал, что новых методов контроля и диагностики появилось крайне мало, а развитие производственных технологий и внедрение инноваций в машиностроении идет ударными темпами. Новая технология ультраструктурной диагностики, имея широкий спектр своих преимуществ, прежде всего, как средство создания имитационных диагностических воздействий, не рассматривалась ранее в качестве инструмента оценки эксплуатационных характеристик режущего инструмента. Вместе с тем область применения данной технологии имеет более широкие возможности и научно-технический потенциал. Уже сегодня потенциальным направлениям внедрения этой технологии посвящено ряд диссертаций. Так, в частности, в работах М.А. Бурнашов и др., рассматриваются многофазные ультраструктуры для резания неметаллических материалов. В диссертациях и работах Н.Н. Сысоева, В.С. Пузакова, Чжо Мью Хтет и др. отмечается возможность использования ультраструктур для стерилизации жидкостей, получения суспензий, диспергирования наносодержащих жидкофазных продуктов и др.

Другое научное противоречие состоит в том, что перспективные и потенциальные возможности применения биметаллических материалов в производстве режущего инструмента исследованы недостаточно. Данные вопросы рассмотрены в работах: Савинова Ю.П., Чернова Н.М., Медведева К.А. (создание биметаллических инструментов), Лаврентьева А.Ю., Дожделева А.М. (технология наплавки при изготовлении биметаллического инструмента), Palanikumar K., Davim J.P., Davim J.P., Mata F. (биметаллический инструмент для обработки стеклопластиков).

Эти обстоятельства стали предпосылками для проведения исследований по созданию новых видов инструмента для утилизации ПМ и средств его диагностики. На первом этапе, по разработанному техническому заданию, в НИИ ИП с ОП (г. Минск, Беларусь) были изготовлены биметаллические ножи, применяемые в роторных дробилках для утилизации ПМ (Рис. 1). Кроме того, была предложена усовершенствованная схема ультраструктурной диагностики, использующая водополимерную струю в качестве диагностического инструмента (см. Рис. 2).



а — биметаллическая конструкция (А — Сталь 3; В — сплав 9ХФ; Г — сплав 6ХВ2С), б — традиционная конструкция

Рис. 1. Принципиальные схемы исследуемых ножей

В качестве примера на Рис. 2. представлена принципиальная схема диагностики ножей с использованием водополимерной ультраструи.

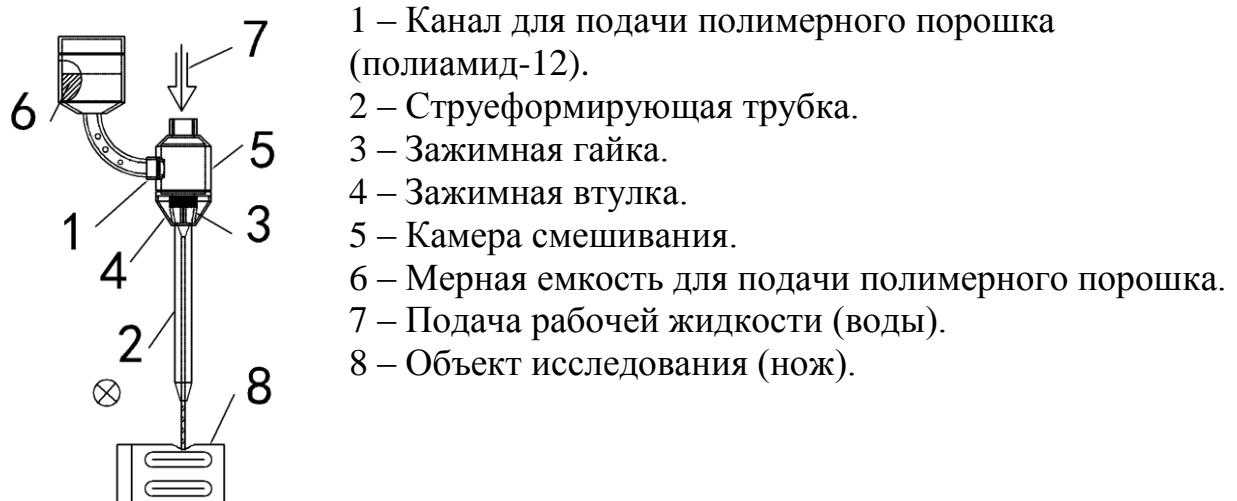


Рис. 2. Принципиальная схема водополимерной ультраструктурной диагностики

В заключении главы сформулирована цель и задачи исследования, представлен методический план проведения работ.

**Во второй главе** рассматриваются вопросы методического обеспечения проводимых исследований. Методом экспертного оценивания, в соответствии с выбранными критериями, сравниваются традиционные и предлагаемые инновационные методы контрольно-диагностического воздействия на поверхностный слой материала. Приводятся данные о предлагаемых методах технологического воздействия с целью получения диагностической информации о контролируемом объекте, обсуждается гипотеза о возможности использования водополимерной ультраструи как средства диагностирования физико-

механических и эксплуатационно-технологических характеристик режущего инструмента.

Предлагается обзор используемого в исследовании технологического оборудования, аппаратуры и приборов с описанием их технических характеристик, а также методические особенности проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Экспериментальные исследования по водополимерной диагностике ножей проводились в соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве в Центре гидрофизических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова на промышленной установке для гидроабразивной резки Flow System (США). Установка оснащена системой ЧПУ, имеет точность позиционирования режущей головки до 0,023 мм. Насосная станция мощностью 37 кВт позволяет создавать гидравление до 410 МПа. Измерения геометрических характеристик гидрокаверны производилось на Физическом факультете Московского университета на цифровом оптическом микроскопе-профилометре KEYENCE VHX6000 с установленным объективом высокого разрешения KEYENCE VH-Z500R увеличением  $\times 500$  (Япония). Измерения твердости производились при помощи портативного твердомера МЕТ-УД (г. Зеленоград) с динамическим датчиком. План экспериментальных исследований был ориентирован на установление и выбор информативных параметров водополимерной ультраструктурной диагностики и обработку полученных данных гидроскрайбирования.

В теоретической части работы для построения математических моделей и выполнения численных расчетов использовалось лицензионное программное обеспечение Ansys AutoDyn. Металлографические исследования проводились на основе международного меморандума о сотрудничестве в НИИ ИП с ОП (г. Минск, Беларусь) на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 500$ . Размер зерна определялся по ГОСТ 5939-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 500 г. по ГОСТ 9450-76.

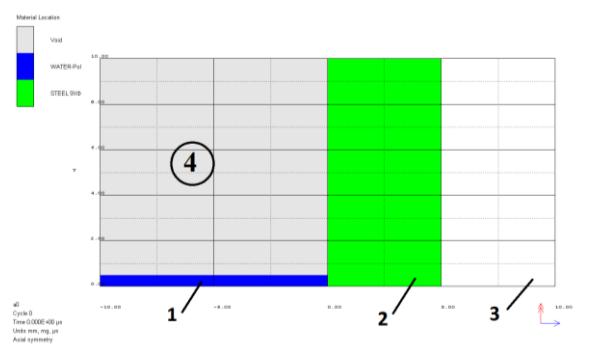
Фрикционные испытания проводились на установке, спроектированной и изготовленной на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Натурные испытания партии стандартных и биметаллических ножей проводились на роторной дробилке марки HSS-180, производство КНР в ООО «Астrelати».

С целью обоснования возможности и перспективности применения водополимерных ультраструктур как средства диагностики режущего инструмента для утилизации ПМ применялся метод экспертных оценок. Выполнено сравнение различных видов технологического воздействия с целью получения диагностической информации о физико-механических и эксплуатационно-технологических параметрах поверхностного слоя ножей. В ходе процедуры реализации МЭО был определен минимальный состав членов экспертной группы, по критерию обеспечения достоверности проведения экспертизы, разработаны

анкеты экспертов. Обработка результатов анкетирования проводилась с использованием метода взвешенной суммы, оценка полученных данных осуществлялась на основе расчета коэффициентов конкордации. Для расчетов использовалось, разработанное на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения программное обеспечение.

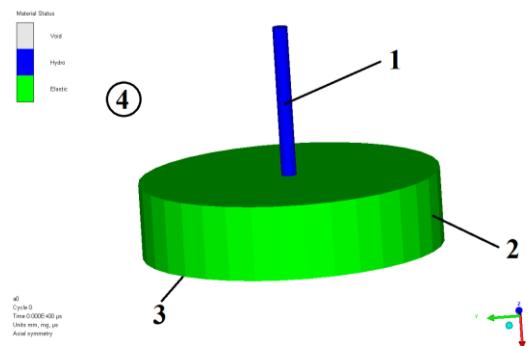
**В третьей главе** рассмотрены вопросы численного моделирования процесса взаимодействия водополимерной ультраструи жидкости с материалами, используемыми в изготовлении ножей. Теоретически описан процесс гидроэрозии поверхности инструмента. Определены численные показатели гидроэрозии – площадь гидрокаверны. Предложена и обоснована математическая модель гидроэрозии в процессе воздействия высокоскоростной водополимерной ультраструи. Численное моделирование осуществлено при различных входных технологических параметрах гидроустановки. Расчетная схема и постановка задачи моделирования представлена на Рис. 3.



Расчетная схема для взаимодействия ультраструи и преграды в двумерной постановке задачи (фрагмент).

1 - ультраструя, 2 - образец, 3 - основание, 4 - окружающая среда.

Рис. 3. Расчетная схема и постановка задачи моделирования



Расчетная схема для взаимодействия ультраструи и преграды в 3Д постановке задачи (фрагмент).

Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе ANSYS /Autodyn со следующими заданными начальными параметрами водополимерной ультраструи: скорость 400 м/с; диаметр 1 мм; плотность 0,997 г/см<sup>3</sup>.

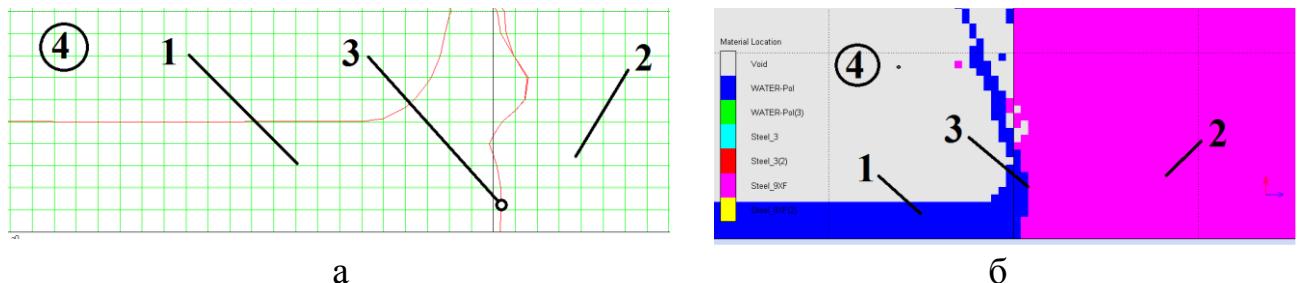
Поставленная задача решалась численно в двумерной осесимметричной постановке в неподвижной системе координат с использованием идеальной упругопластичной модели взаимодействующих между собой материалов в среде программного комплекса.

В качестве граничных условий использовались следующие. В области контактного взаимодействия струи с преградой накладывались ограничения на скорость индивидуальных точек в направлении оси OZ в соответствии с условиями непроницаемости материала, а также на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона.

Численное моделирование удара струи о преграду и расчет гидроэрозии проводился для материалов, используемых в традиционном и предлагаемом

инструментах: Сталь 3, 6ХВ2С, 9ХФ, HSS при задании соответствующих значений заранее определенной твердости материала (см. Рис. 4).

В результате реализации метода экспертных оценок (МЭО), обработки и анализа результатов анкетирования установлено, что наиболее перспективными для изучения и внедрения являются следующие виды воздействия: натурные испытания, имитационная водополимерная диагностика, фрикционные испытания. Коэффициент согласованности экспертов  $W=0,64832$  исходя из вербально-числовой шкалы Харрингтона показал, что полученные результаты соответствует средней степени согласованности мнений экспертов, что говорит о достоверности полученных результатов анкетирования.



1-ультраструя; 2-образец; 3-гидрокаверна; 4-окружающая среда.

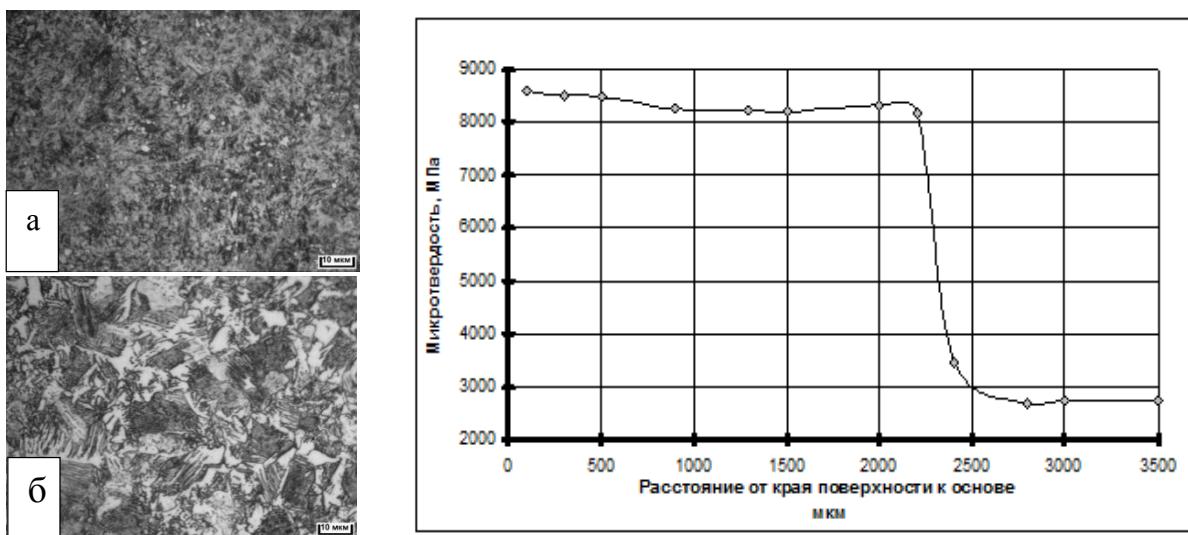
Рис. 4. Результаты численного моделирования на примере материала ножа Сталь 3 (а – фрагмент увеличенного изображения участка взаимодействия ультраструи и образца с сеткой, б – без сетки)

**В четвертой главе** обсуждаются результаты выполненных экспериментальных исследований. Проводится сравнительно-сопоставительный анализ информативных критериев, полученных для различных методов испытаний. Делаются выводы о высоком соответствии параметров гидроэрозии, в результате действия водополимерной ультраструи на поверхность ножа и экспериментальными данными натурных испытаний.

В главе представлен результат исследования микроструктуры ножей, показавший схожесть микроструктуры края (мелкоигольчатый мартенсит с карбидами) - режущей части ножа. Основа - феррито-перлит с размером зерна 10 - 20 мкм (Рис. 5).

Эффективность предложенного метода водополимерной диагностики оценена по результатам сравнительно-сопоставительных исследований различных методов испытаний: фрикционные на машине трения, натурные на промышленном оборудовании, истирание поверхности ножей полимерными роликами. Натурные испытания проводились по переработке (измельчению) полипропиленовых конструкций. Исследуемые биметаллические ножи устанавливались в роторную дробилку совместно со стандартными ножами из сплава 6ХВ2С. Время работы режущего инструмента составило 160 часов.

В качестве информативных параметров износа режущей кромки ножей были выбраны: изменение (увеличение) радиуса округления, изменение переднего угла, а также количество и площадь (унос материала) сколов к длине режущей кромки инструмента.



а-край (9ХФ), б- основа (Сталь 30), увеличение x500

Рис. 5. Микроструктура образца ножа с маркировкой «3+В» и график изменения микротвердости от края к основе в образце с маркировкой «3+В»

Расчет площади сколов по длине режущей кромки инструмента проводился с использованием модульной лицензионной программы анализа данных Gwiddion. Пример результата обработки фотоизображений режущей кромки биметаллического ножа с маркировкой ЗМО представлен на Рис. 6.

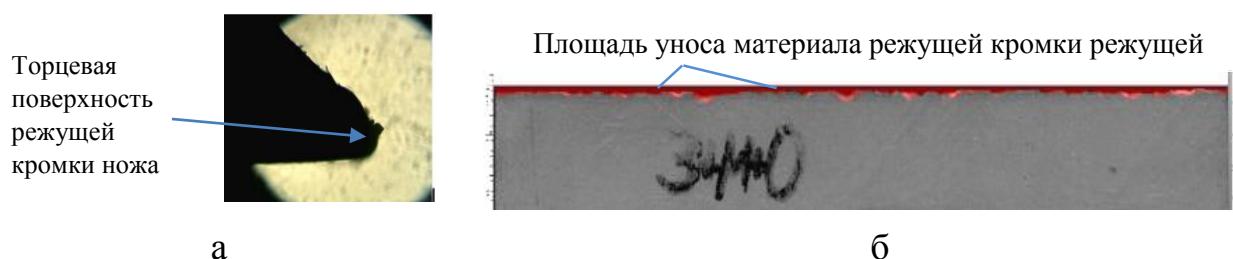


Рис. 6. Изображение режущей кромки биметаллического ножа с маркировкой ЗМО после производственных испытаний (160 ч), а – изображение торцевой поверхности (расчет радиуса округления), б - результат обработки изображения режущей кромки ножа.

В ходе фрикционных испытаний воздействие на поверхность материала ножа осуществлялось с использованием твердосплавного шарика, закрепленного на цилиндрическом валу. Контактная нагрузка составляла 0,2 кг и определялась массой стержня (см. Рис. 7, а). Отсутствие дополнительной массы связано с необходимостью обеспечения достаточно свободного относительного движения индентора (шарика) и инструмента. В результате эксперимента были определены профили и глубины каверны. В качестве иллюстрации на Рис. 8 представлено изображение каверны на поверхности режущего инструмента в результате фрикционных испытаний.

Испытания с применением полимерного ролика (см. Рис. 7, б) показали свою низкую эффективность, связанную с высокими затратами времени, сложностью проведения сопоставительного анализа и низкой информативностью.

Ультраструктурная диагностика проводилась согласно схеме, представленной на Рис. 2. Для эксперимента были выбраны следующие технологические параметры: давление в гидросистеме 400 МПа, скорость подачи сопловой головки 150 мм/мин, расстояние от среза фокусирующей до поверхности детали 3 мм. Информативным параметром являлась глубина гидрокаверны (Рис. 9).

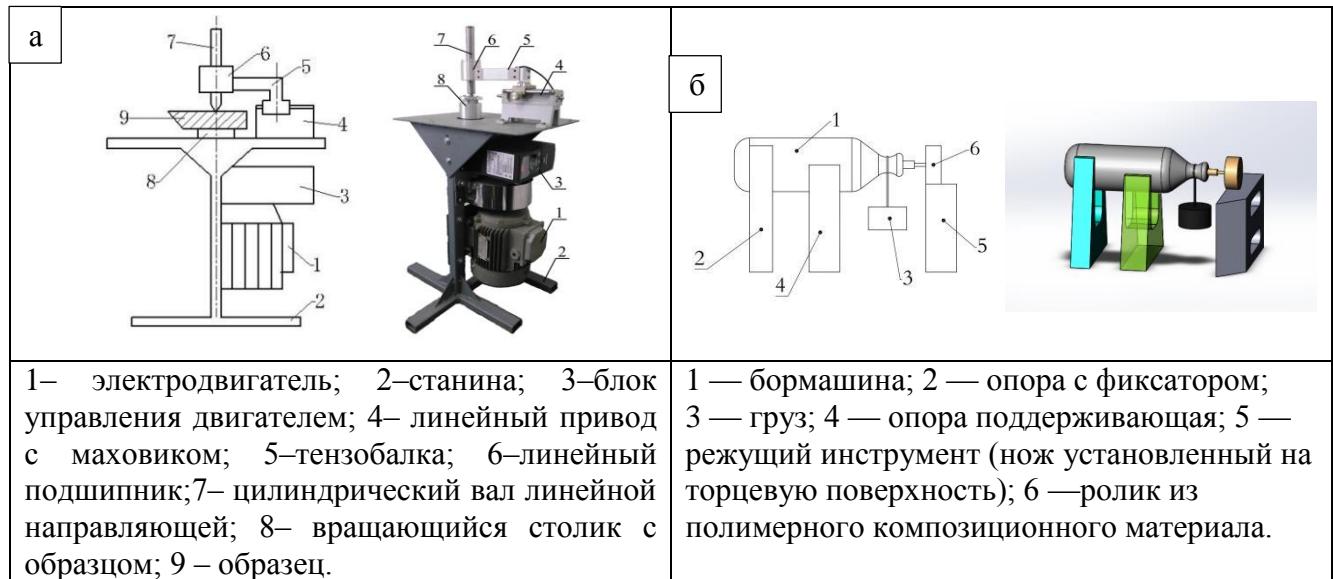


Рис. 7. Принципиальная схема установки для фрикционных и роликовых испытаний (а- установка для фрикционных испытаний, б- установка для испытаний с применением полимерного ролика).

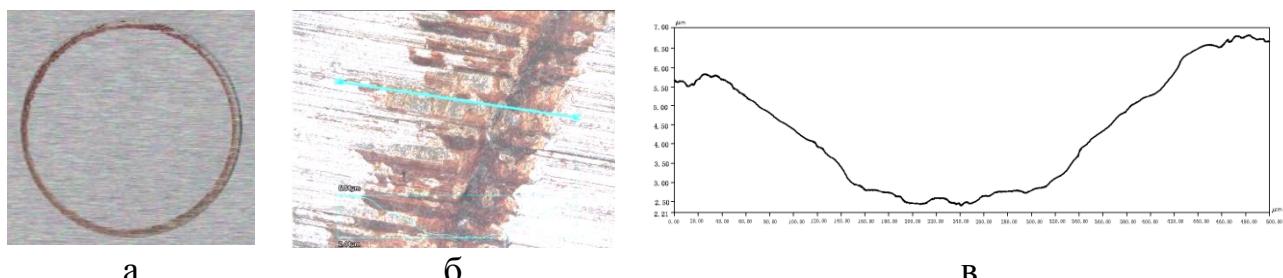


Рис. 8. Результаты исследования каверн ножа, образовавшаяся в результате фрикционных испытаний (а – каверна, б- участок (линия) трассирования, в- профилограмма каверны).

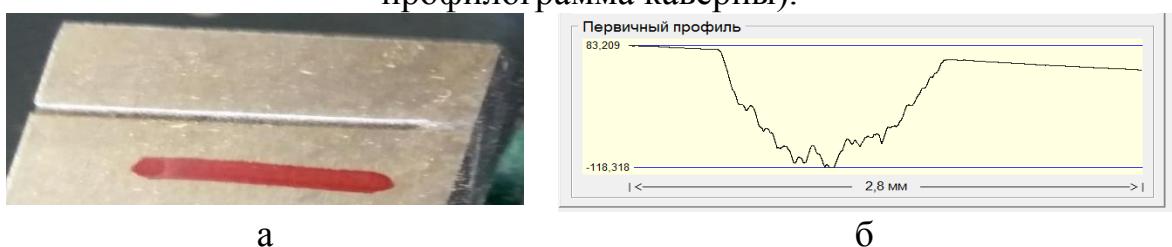


Рис. 9. Результаты ультраструктурной диагностики (а - гидрокаверна на торцевой поверхности ножа, б - профилограмма).

На основе полученных информативных данных экспериментальных исследований и натурных испытаний были рассчитаны попарные коэффициенты корреляции, представленные в Таблице 1.

Таблица 1.

Данные сравнительного корреляционного анализа методов диагностики режущего инструмента

Корреляции	Радиус округления режущей кромки, мм	Изменение переднего угла, градус	Количество сколов к единице длины режущей кромки	Отношение площади уноса режущей кромки к длине, мм	Глубина гидрокаверны, мм	Глубина каверны фрикционного испытания, мкм	Микротвердость, МПа
Радиус округления режущей кромки, мм	-	0,93	0,88	0,87	0,91	0,97	-0,74
Изменение переднего угла, градус	0,93	-	0,91	0,94	0,92	0,81	-0,79
Количество сколов к единице длины режущей кромки	0,88	0,91	-	0,99	0,99	0,81	-0,95
Отношение площади уноса режущей кромки к длине, мм	0,87	0,94	0,99	-	0,99	0,77	-0,95
Глубина гидрокаверны, мм	0,91	0,92	0,99	0,99	-	0,85	-0,95
Глубина каверны фрикционного испытания, мкм	0,97	0,81	0,81	0,77	0,85	-	-0,68
Микротвердость, МПа	-0,74	-0,79	-0,95	-0,95	-0,95	-0,68	-

На основе полученных данных сделаны выводы, что метод УСД с применением водополимерной ультраструи жидкости обладает достаточно высокой информативностью. Эффективность метода доказана соответствием результатов натурных испытаний и информативных параметров УСД. В сравнении с методом фрикционных испытаний УСД обладает рядом преимуществ, таких как: экспрессность процесса, формирование в зоне контакта водополимерной ультраструи с поверхностью ножа мощного волнового возмущения, имитирующего условия работы инструмента на протяжении длительного времени эксплуатации, создание ударных переменных нагрузок при соударении частиц полимера с поверхностью ножа и др. Таким образом, были сделаны выводы, что УСД может быть эффективно использована для оценки эксплуатационных свойств режущего инструмента для утилизации ПМ, что крайне важно на этапе технологической подготовки производства.

**В пятой главе** представлена разработанная инженерная методика УСД с использованием водополимерной ультраструи жидкости для диагностики режущего инструмента, применяемого для утилизации ПМ, а также сформулированы практические рекомендации по реализации методики. Рассмотрена перспективная конструкция сборного режущего инструмента, достоинством которого является повышенный ресурс, высокая ремонтопригодность, увеличенный межремонтный интервал, сокращенные сроки обсаживания. Выполнены расчеты на прочность резьбовых соединений, применяемых в конструкции ножа.

На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований, апробации их результатов на предприятиях, непосредственно занимающихся вопросами утилизации ПМ, разработана инженерная методика ускоренной оценки

эксплуатационных параметров поверхностного слоя режущего инструмента на основе имитационного воздействия на него водополимерной ультраструктури жидкости (см. Рис. 10). В основе инженерной методики лежат: блок выбора режимов диагностирования, экспериментальный блок, призванный обеспечить формирование базы данных об информативных диагностических параметрах режущего инструмента и блок оценки эксплуатационных показателей качества ножей. Процедура диагностирования состоит в следующих этапах:

1. Подобрать эффективный режим воздействия водополимерной ультраструктури на боковую или хвостовую поверхность исследуемого ножа, шероховатость которой близка режущей части инструмента. Под эффективностью в данном случае понимаются такие параметры образовавшейся в результате действия водополимерной ультраструктури гидрокаверны, которые наиболее информативны и могут быть измерены техническими средствами. В качестве входных варьируемых технологических параметров выступает: давление водополимерной ультраструктури, концентрация полимерного порошка, диаметр ультраструктури, скорость подачи и расстояние от фокусирующей трубки до поверхности ножа.

2. На определенном режиме ультраструктурной диагностики осуществить гидроскрайбирование поверхности инструмента (торцевой или хвостовой части) с целью получения диагностической информации о его физико-механических и эксплуатационно-технологических характеристиках.

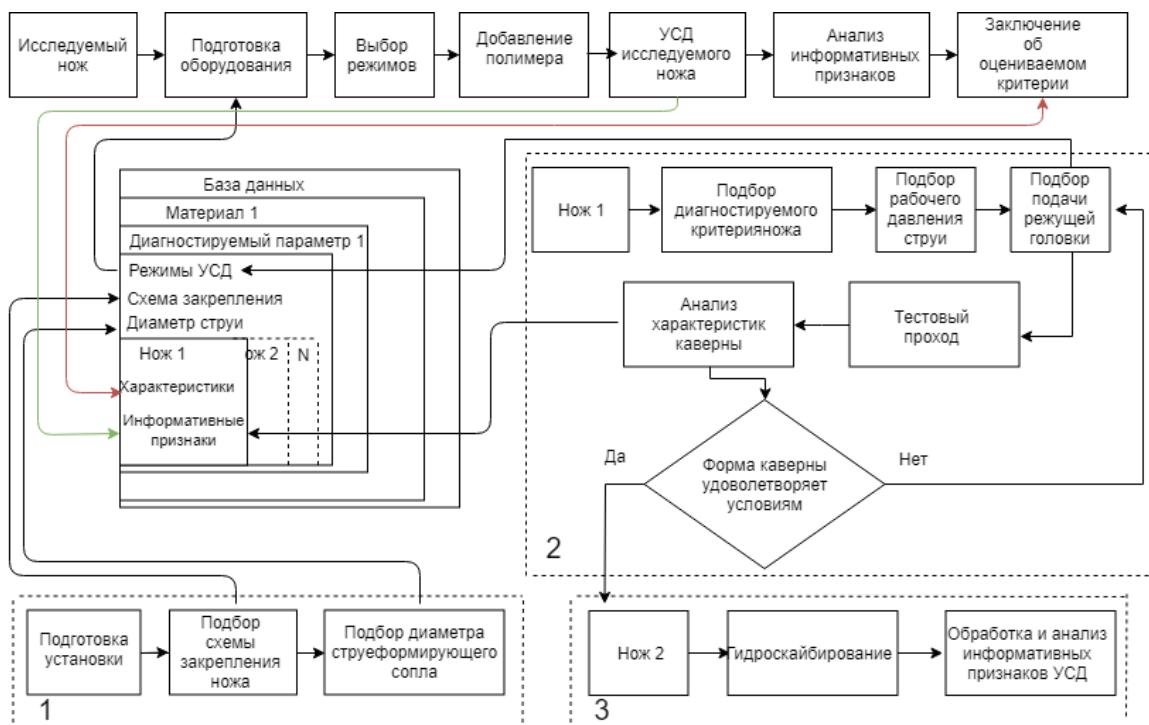
3. С использованием технических средств измерения провести численную оценку информативных геометрических параметров гидрокаверны, систематизировать полученные данные, зафиксировать их в базе данных.

4. Выполнить анализ информативных диагностических признаков, полученных в результате гидроскрайбирования водополимерной ультраструктурой.

5. Сопоставить полученные в результате выполнения пунктов 3 и 4 данные с данными содержащимися в базе данных для эталонных образцов материала ножей или с их ближайшими аналогами.

6. Сделать заключение о состоянии исследуемого объекта контроля.

Выполненный анализ показал, что разработанная инженерная методика обладает общностью, и может быть использована для решения смежных задач.



1 — Подготовка к проведению эксперимента; 2 — Выбор режимов модельного эксперимента; 3 — Заполнение базы данных характеристиками образцов, продиагностированных на подобранном ранее режиме (повторяется для каждого образца); УСД — ультраструктурная диагностика

Рис. 10. Инженерная экспресс-методика оценки эксплуатационных свойств режущего инструмента для утилизации ПМ

В главе представлены результаты исследований по проектированию, расчету и созданию режущего инструмента для утилизации ПМ со сменными пластинами из быстрорежущую стали HSS. Показано, что предложенная конструкция позволит решить проблему повышения производительности, увеличения межремонтного интервала, сокращения времени на проведение работ по замене ножей в роторе установки. Предлагаемая конструкция ножа и иллюстрация результатов расчетов на прочность резьбового соединения представлены на Рис. 11, а.

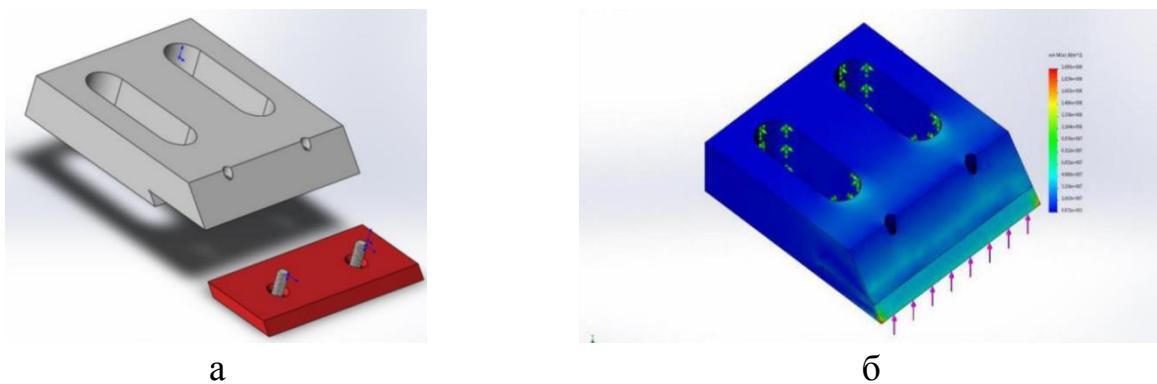


Рис.11. Принципиальные схемы перспективного ножа со сменными режущими пластинами HSS (а-3Д модель сборного ножа, б- результаты расчетов на прочность режущей пластины)

Отличительной особенностью данного инструмента является возможность реверсивной перестановки пластины ввиду наличия режущей части с обеих сторон. Для оценки возможности использования сменной режущей пластинки были проведены прочностные расчеты, показывающие возможность ее механического крепления к корпусу (см. Рис. 11, б).

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Анализ информационных источников показал, что объем применения ПМ в авиа- и ракетостроение постоянно растет, все существующие методы утилизации ПМ требуют их предварительного измельчения, однако вопросы повышения эффективности переработки данных материалов, создания новых видов инструмента для этих целей в научной литературе рассмотрены недостаточно.

2. Методом экспертного оценивания показано, что имитационное ультраструктурное технологическое воздействие является перспективным методом ускоренного получения диагностической информации об эксплуатационно-технологических характеристиках режущего инструмента, применяемого для утилизации ПМ, однако, в настоящее время он не развит вследствие отсутствия необходимого методического и экспериментального обеспечения.

3. В результате численного моделирования процесса ультраструктурной диагностики режущего инструмента с применением водо-полимерных струй при двумерной осесимметричной постановке задачи, было теоретически установлено и экспериментально подтверждено наличие связи между производительностью процесса гидроэрозии поверхности ножей и их физико-механических характеристиках, в частности микротвердостью.

4. В результате сопоставительного анализа информативных диагностических показателей различных методов диагностики режущего инструмента, данных его натурных испытаний и метода ультраструктурной диагностики были установлены корреляционные зависимости между ними в диапазоне от 0,85 до 0,99, что позволит производить достоверную оценку состояния инструмента на этапе технологической отработки и заводских испытаний.

5. Установлены корреляционные зависимости между глубиной, образовавшейся в результате ультраструктурного воздействия гидрокаверны, и микротвердостью испытуемого материала, что также подтверждается результатами математического моделирования методом конечных элементов.

6. Предложена, спроектирована, рассчитана и изготовлена новая конструкция режущего инструмента для утилизации ПМ со сменными реверсивными режущими пластинками, обеспечивающая повышение межремонтного интервала, сокращение времени ремонтно-восстановительных работ, в том числе благодаря отсутствию необходимости демонтажа корпуса инструмента и балансировки ротора.

7. Сформулированы рекомендации и создана инженерная методика использования аппарата ультраструктурной диагностики для определения эксплуатационных параметров режущего инструмента для утилизации ПМ.

**Приложение** включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

**Основные результаты** диссертационной работы отражены в 8 научных работах, среди которых, 3 из Перечня, рекомендуемого ВАК РФ. Тема диссертации полностью отражена в следующих основных научных работах:

1. Ли Сюеянь, Семашко В.В. Разработка способа ультраструктурной диагностики биметаллического режущего инструмента для утилизации композиционных материалов аэрокосмической техники // Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Москва. 2018. С. 242–244 (0,18 п. л.)
2. Ультраструктурный метод оценки эксплуатационных свойств биметаллического инструмента / Ли Сюеянь[и др.]. Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 11. С. 14–20 (0,42 п. л.)
3. Анализ перспектив применения метода ультраструктурной диагностики для оценки износостойкости биметаллического инструмента / Ли Сюеянь [и др.]. Технология металлов. 2019. № 5. С. 41 - 47 (0,42 п. л.)
4. Влияние конструктивного исполнения и режимов термического модифицирования на процесс самозатачивания лезвийной части биметаллического изделия / В.В. Семашко[и др.]. В сборнике: Порошковая металлургия республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск. 2019. С. 187–192 (0,36 п. л.)
5. Способ гибридной ультраструктурно-эмиссионной диагностики качества конструкционных материалов: Патент России № 2698485 / Бочкарев С.В., Казанцев В.П., Галиновский А.Л., Барзов А.А., Абашин М.И., Коберник Н.В., Белов В.А., Мунин Е.Н., Ли Сюеянь; заявл. 21.12.2018; опубл. 28.08.2019. Бюл. № 25 (0,54 п. л.)
6. Li Xueyan, Galinovsky A.L., Sudnik L.V. Comparison of diagnostic tools for cutting tools for the utilization of aerospace composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. Issue 3. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044109 (0,36 п. л.)
7. Analysis of the Prospects of Ultrajet Diagnostics for Estimating the Wear Resistance of Bimetallic Tool / Li Syueyan [и др.]. Russian Metallurgy (Metally) 2020 Vol. 2019. Issue 13 . P. 1389–1394 (0,36 п. л.)
8. Перспективная конструкция и технология диагностики инструмента для утилизации В качестве информативных параметров износа режущей кромки ножей были выбраны: изменение (увеличение) радиуса округления, изменение переднего угла, а также количество и площадь (унос материала) сколов к длине режущей кромки инструмента. тов / Ли Сюеянь [и др.]. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 2020 С.23-33 (0,72 п. л.)