

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный аграрный университет»

На правах рукописи



АГАФОНОВА ЕКАТЕРИНА ВАСИЛЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗЕРНОДРОБИЛОК
КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ МОЛОТКОВ**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор Коноводов Виталий Васильевич

Новосибирск 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Классификация зернодробилок молоткового типа для приготовления кормов.....	10
1.2 Анализ условий работы рабочих органов зернодробилок и факторы, влияющие на их изнашивание.....	15
1.3 Анализ материалов и технологий изготовления и упрочнения молотков.....	20
1.4 Анализ основных способов повышения ресурса молотков зернодробилок	23
1.5 Разработка гипотезы комбинированного упрочнения молотков.....	33
1.6 Выводы по главе, цель и задачи исследования	36
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА МОЛОТКОВ КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ	37
2.1 Методы определения износа молотков зернодробилок	37
2.2. Математическая модель прогнозирования ресурса упрочненных молотков.....	41
2.3. Обоснование технологических свойств FeC-припоя для упрочнения рабочих кромок молотка твердым сплавам.....	46
2.4. Обоснование структурного состава материала паяного шва молотка.....	50
2.5. Условия образования структуры шва, паяного FeC-припоем.....	53
2.6. Обоснование структурно-фазовых превращений в паяном соединении.....	56
2.7 Структурообразование паяного шва и обоснование технологических режимов пайки упрочненного молотка.....	62
2.8. Выводы по главе.....	70

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	71
3.1. Методика пайки молотков зернодробилок FeC-припоем.....	71
3.2. Методика микроструктурных исследований FeC-припоя, твердого сплава и паяного соединения.....	75
3.3. Методика определения физико-механических свойств паяного соединения.....	78
3.4. Методика оценки износа рабочих органов молотковых к зернодробилок.....	80
3.5. Методика производственных испытаний упрочненных молотков.....	82
3.6. Определение необходимого количества наблюдений и оценка точности результатов экспериментов.....	84
3.7. Выводы по главе.....	86
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	87
4.1. Результаты металлографических исследований паяного соединения.....	87
4.2. Результаты исследований зависимости структурообразования от технологических режимов	93
4.3. Результаты исследований зависимости свойств паяного соединения от структуры шва	97
4.4. Результаты экспериментально-производственной испытаний.....	100
4.5. Выводы по главе.....	104
5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Распределения химических элементов в диффузионных зонах	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Измерение микротвердости паяного соединения	

«твердый сплав – FeC-припой – сталь»

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Определение коэффициентов предельного износа S_0 и предельной наработки Q_0

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Построение зависимости величины износа от наработки молотка

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Патент Российской Федерации

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акты внедрения

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Комплект документов по технологическому процессу пайки молотков зернодробилок

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие сельского хозяйства характеризуется возрастанием роли кормопроизводства, как системообразующего звена Агропромышленного комплекса, определяющего состояние животноводства. В структуре себестоимости животноводческой продукции корма составляют около 60 %, поэтому система кормопроизводства должна основываться на оптимальном балансе качества корма и экономических показателей его производства.

Большинство операций технологического процесса кормоприготовления выполняется комплексами комбинированных машин, частью которых являются зернодробилки молоткового типа (типа ДМ, ДБ, ДМП, КД, Molot, ДМА, ДПА и др.). Их длительная эксплуатация показала, что при общих положительных качествах (надёжность, простота обслуживания, высокая производительность) они не лишены недостатков, один из которых – быстрый износ и как следствие низкий ресурс основных рабочих органов – молотков. В процессе эксплуатации молотки, изготовленные из высоколегированных сталей (65Г, 30ХГСА, 18ХГНМФР, ШХ15 и др.), изнашиваются и теряют массу не более 10...15%, это приводит к увеличению энергозатрат и снижению производительности. Все это определяет целесообразность разработки новой технологии упрочнения молотков зернодробилок, с целью повышения их эффективности работы.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ в рамках государственной темы № АААА-А20-120110690008-2 «Исследование неисправностей и причин отказов автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной спецтехники и оборудования животноводческих комплексов в процессе эксплуатации».

Степень разработанности темы. Изучением процесса изнашивания и упрочнения рабочих органов дробильных машин молоткового типа посвящены работы В.Ф. Аулова, А.И. Бойко, В.Д. Власенко, Ю.А. Власова, В.П. Горячкина, Н.И. Денисенко, В.В. Иванайского, А.В. Ишкова, Н.И. Клименко, В.В. Коноводова, Н.Т. Кривочурова, В.П. Лялякина, О.Н. Моисеева, П.А. Патрина,

А.А. Петрова, У.К. Сабиева, А.И. Сидашенко, А.В. Сизиненко, А.А. Ситникова, А.В. Тененбаума, А.В. Тимановского, И.Я. Федоренко, В.В. Широбокова, А.В. Щеголева и др.

Перспективным решением повышения ресурса новых молотков является разработка и внедрение технологии на основе упрочнения рабочих кромок твердым сплавом с применением железоуглеродистого припоя (FeC-припоя), позволяющих решать проблему снижения износа, за счет увеличения твердости рабочих кромок молотка. В данной области известны работы С.У. Глазачева, Ю.Б. Капилевича, А.А. Малышко.

Однако, несмотря на значимость выполненных исследований, некоторые аспекты решения рассматриваемой проблемы изучены недостаточно.

Предполагается, что обеспечить повышение эксплуатационного ресурса молотков зернодробилок возможно за счет их комбинированного упрочнения твердым сплавом с применением FeC-припоя.

Цель исследования – повышение эффективности работы зернодробилок за счет комбинированного упрочнения молотков при их изготовлении.

Задачи исследования:

- разработать технологию комбинированного упрочнения рабочих кромок молотков зернодробилок для управления изменением их геометрических параметров в процессе износа;
- разработать математическую модель прогнозирования и установить закономерности изнашивания молотков зернодробилок и величины износа упрочняющих элементов рабочей кромки молотков от наработки;
- обосновать структурный состав, показатели прочности паяного соединения и рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы пайки твердосплавной пластинки к молотку;
- провести производственные испытания молотков, упрочненных комбинированным способом и оценить экономическую эффективность результатов исследования.

Объект исследования – процесс изнашивания рабочих кромок

упрочненных молотков зернодробилок при эксплуатации.

Предмет исследования – закономерности изнашивания рабочих кромок упрочненных молотков зернодробилок при эксплуатации.

Научную новизну работы составляют:

– математическая модель прогнозирования и закономерности изнашивания молотков зернодробилок, упрочненных твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя от наработки;

– закономерности структурообразования в паяном соединении и зависимость механической прочности паяного соединения от величины диффузионной зоны;

– конструкция молотка с комбинированным упрочнением рабочей кромки, и рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы изготовления молотков зернодробилок с применением твердосплавных пластинок и FeC-припоя.

Новизна технических решений, применяемых при проведении исследований, подтверждена патентом RU 192763 U1.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что теоретически и экспериментально обоснованы конструктивно-технологические мероприятия, обеспечивающие реализацию комбинированного упрочнения рабочих кромок молотков зернодробилок для повышения их эксплуатационного ресурса. Это позволяет повысить производительность зернодробилок в процессе кормоприготовления и снизить удельное энергопотребление.

Методология и методы исследования. Основой для проведения теоретических и экспериментальных являлся подход, обеспечивающий анализ изменений в структуре паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» в процессе изнашивания рабочих кромок молотков зернодробилок. В процессе выполнения исследований использованы положения теории прочности и изнашивания, численные методы математического анализа.

Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторных

установках с использованием поверенных современных приборов и оборудования. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью компьютерных программ для статистической обработки опытных данных.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель прогнозирования и закономерности изнашивания молотков зернодробилок, упрочненных комбинированным способом твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя при измельчении зерна;

– закономерности структурообразования в паяном соединении: «твердый сплав – FeC-припой» и «FeC-припой – сталь молотка»;

– зависимости изменения механической прочности паяного соединения от величины диффузионной зоны;

– обоснованные рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы упрочнения рабочих кромок молотков зернодробилок твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность подтверждается необходимым и достаточным количеством теоретических и экспериментальных исследований; использованием современных нормативных документов, ГОСТов, поверенных приборов и оборудования; сопоставлением результатов, полученных теоретическими и экспериментальными исследованиями; совпадением полученных результатов исследований с данными других ученых по соответствующей тематике; внедрением полученных результатов в производственные сферы; одобрением материалов докладов на международных конференциях и семинарах; публикацией и одобрением полученных материалов в ведущих журналах. Внедрение результатов исследований осуществлялось в период 2018 по 2021 годы. Результаты выполненных исследований внедрены в ООО НПП «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» (г. Новосибирск), в ООО «Агромаштехсервис» (г. Барнаул), а также в учебном и научно-исследовательском процессах при обучении студентов направления подготовки «Агроинженерия» в ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты исследований по теме диссертационной работы обсуждались и докладывались на заседаниях кафедры надежности и ремонта машин и на ученом совете Инженерного института ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ (2017 – 2024гг.), а также получили положительную оценку на международных научно-практических конференциях «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» (Новосибирск, 2017, 2018, 2020, 2023гг.); на VIII научно - практической конференции с международным участием «Чтения И. П. Терских» посвященной проблеме «Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК» (Иркутск, 2020г.); на национальной (всероссийской) научной конференции «Теория и практика современной аграрной науки»(Новосибирск, 2018, 2024гг.); на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России» (Иваново, 2020г.); на IX международной научно-практической конференции «Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых ученых» в СФНЦА РАН (р.п. Краснообск, 2023гг.); на международной научно-практической конференции посвященной 70-летию Радаева Д.Н. «Современные тенденции технологического развития АПК» (Улан-Удэ, 2023 г.); на международной научно-практической конференции посвященной 65-летию образования СибИМЭ СФНЦА РАН «Роль цифровизации в научно-техническом обеспечении АПК Сибири» (р.п. Краснообск, 2024г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в рецензируемых зарубежных изданиях из базы SCOPUS, получен 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 189 наименований, из них 17 на иностранных языках и 6 приложений. Общий объем составляет 156 страниц машинописного текста, который включает 14 таблиц, 40 рисунков.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Классификация зернодробилок молоткового типа для приготовления кормов

Для подготовки зерна к вскармливанию в комбикормовой промышленности, а также в сельскохозяйственных предприятиях широкое распространение получил способ разрушения материала механическим воздействием со стороны рабочих органов [93, 94]. Различают несколько способов разрушения зернового материала: стесненный удар; раздавливание; скалывание; резание; истирание; свободный удар [19]. Наиболее широкое применение на практике кормоприготовления нашли удар и сжатие. Выбор способа измельчения определяется рядом факторов: вид корма, физико-механические свойства измельчаемого зерна, требования технологии подготовки кормов, зоотехнические требования к корму для различных видов животных.



Рисунок 1.1. – Рабочие органы, применяемые для измельчения зерна

Ни в одном из типов измельчителей приведенные способы (рисунок 1.1) не встречаются в «чистом» виде, тем не менее, в каждом из них можно выделить преобладающий [85]. Например, в зернодробилки молоткового типа наряду с измельчением ударом присутствует истирание, в вальцовом рифленом станке к сжатию присоединяют сдвиг и т.д. в одних случаях это явление желательное, в других – нет, поскольку способствует переизмельчению.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ разрушения зерна свободным ударом, где разрушение зерна происходит благодаря воздействию на него быстро движущегося рабочего органа.

Распространенность способа измельчения свободным ударом доказывают исследования многочисленных авторов, в которых говорится о том, что минимальная энергоемкость складывается именно в процессе удара [24, 58, 66, 149, 150, 151]. В своих работах Барабашкин В. П. отмечает, что удельная стоимость машин с ударным принципом действия ниже в 2 раза, а масса меньше в 4 раза по сравнению с вальцовыми машинами [27].

Рассмотрев способы разрушения зерна, а также результаты работ по определению их энергоемкости можно сделать вывод, что выбор зернодробилок молоткового типа для измельчения зерна является обоснованным и актуальным.

Так как в зернодробилках молоткового типа дробление происходит свободным ударом, кроме разрушения от ударов по зерну молотками, продукт дополнительно измельчается при ударах о стенки камеры, которые выполняют рифлеными. Измельченные частицы просеиваются через сменное решето, размер отверстий в котором определяет модуль помола. Зернодробилки молоткового типа позволяют измельчить фуражное зерно влажностью 18...20%. При их использовании для приготовления сенной или травяной муки влажность исходной резки не должна превышать 10...12% [85, 135].

На рисунке 1.2 представлены основные рабочие элементы зернодробилки молоткового типа и их конструктивные особенности. Так, наличие двух отверстий и симметричность формы плоского молотка позволяют увеличить срок их службы. При износе одной стороны можно повернуть молоток другой стороной, а при износе обеих сторон с одного конца повернуть противоположным. Величину измельчения корма можно отрегулировать различными методами, наиболее простой способ - смена решет [103].

В настоящее время зернодробилки молоткового типа широко используются во многих отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Их используют в горнорудной промышленности при измельчении основных компонентов, при производстве цемента и асбеста, а энергетической и деревообрабатывающей промышленности. [27, 62, 100, 123, 141, 181] Такие машины используются в 90%

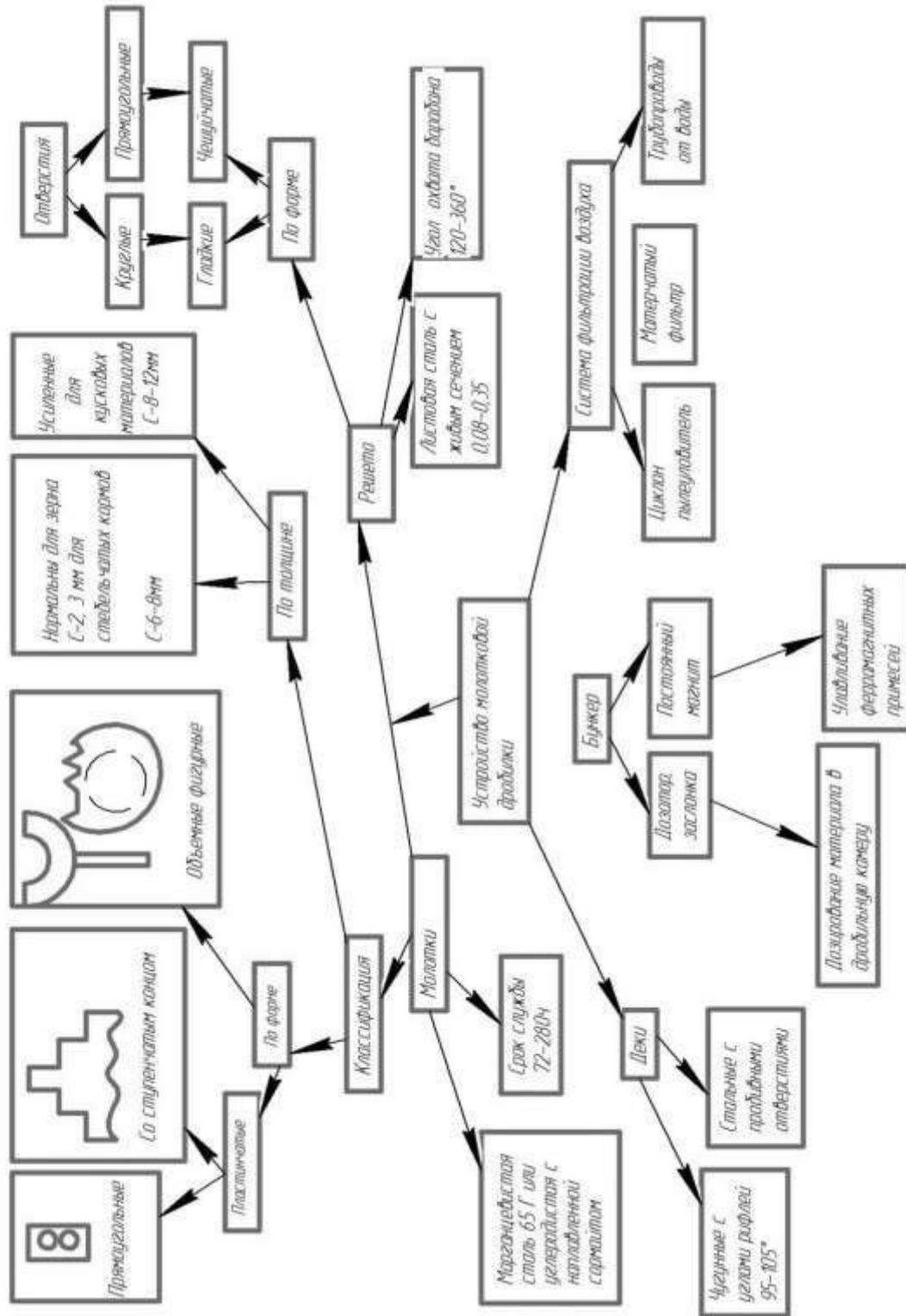


Рисунок 1.2. – Устройство зернодробилки молоткового типа

всех технологических линий по приготовлению концентрированных и комбинированных кормов. Они наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к измельчающим машинам и составляют самостоятельную группу высокоскоростных машин ударного действия.

Как было отмечено, зернодробилки молоткового типа широкое применение нашли в агропромышленном комплексе. Они являются универсальными измельчающими машинами различного типа (рисунок 1.3) [108].

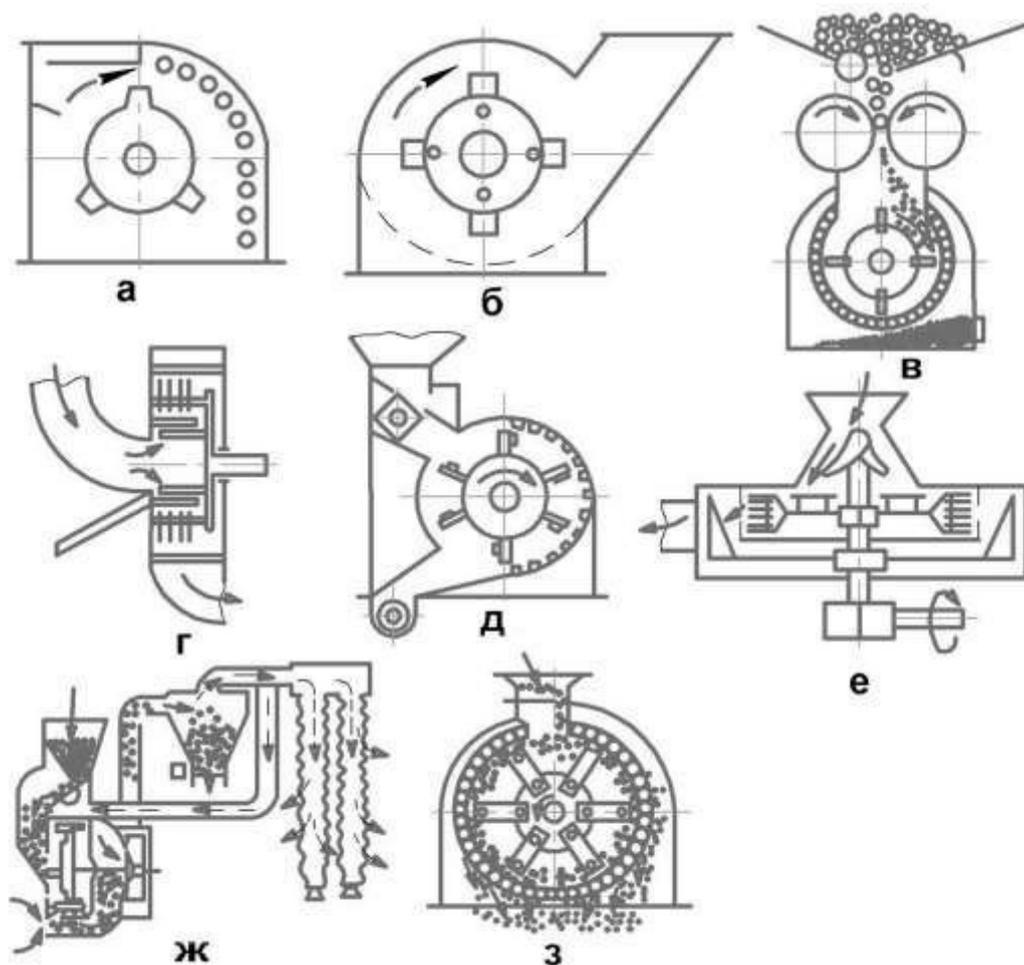


Рисунок 1.3. – Схемы зернодробилок молоткового типа сельскохозяйственного назначения: а - открытого типа; б - закрытого типа; в и г - двухстадийные; д - с жестким креплением рабочих органов; е - горизонтальная; ж - с замкнутым воздушным потоком; з - с шарнирным креплением молотков.

Они обладают рядом преимуществ: простота устройства, высокая надёжность в работе, компактность установки, динамичность рабочих режимов, высокие скорости рабочих органов и возможность непосредственного соединения вала машины с электродвигателем. Но наряду с этим зернодробилки молоткового типа имеют недостатки: неравномерность гранулометрического состава получаемого продукта с повышенным содержанием пылевидных частиц, интенсивный износ рабочих органов.

В настоящее время зернодробилки молоткового типа представлены как отечественными производителями (например, ЗАО Инженерный центр «Агрогрант», ОАО «Слободской машиностроительный завод», ООО «СМС», ООО «А-ИНЖИНИРИНГ», ЗАО «СОВОКРИМ» и др.) [45, 56, 57, 85, 115, 116], так и иностранными (например, «Dinnissen», «Bühler», «VanAarsen», «Gruber», «Muayang», «ANDRITZ» и др.) [175, 176, 177, 178, 179, 184]. Ассортимент представлен как для личных подсобных хозяйств, так и для крупных комбикормовых заводов. Они отличаются мощностью, производительностью, количеством рабочих органов – молотков, могут быть использованы как самостоятельно, так и в составе технологической линии или агрегата. В таблице 1 представлены характеристики некоторых зернодробилок молоткового типа.

Таблица 1.1 – Характеристика зернодробилок молоткового типа.

Модель машины	Производительность, т/ч	Мощность, кВт	Масса, кг	Кол-во молотков, шт	Расход электроэнергии на 1т, кВт	Габариты, мм
ДМ-10	8...10	45 / 55	980	120	7,5...4,5	2070×1040 ×1260
ДМП-4	до 3,5	22	не более 370	24		1045×732×1155
КД-2А	3	21,3	780	90		1750×2800
ДМ-4	до 5	31,1	870	80		5160 ×4110×3720
Molot-3000/5000/10000	До 3/5/10	7,5/11/22	190/210/490	100/165/350		900×500×1200 / 1200×700×1700 / 1200×1100×1700
ДМА-45	до 10	45		120		1960×1040×1300
ДПА-30	5,5	30	350	36	3...4	1110×780×1110
ДМВ30-30	3	30	600	40		1140×900×1500
ММ180В	9,5...40	160	3750	160		2450×140×1950

Из приведенного обзора следует, что производством зернодробилок молоткового типа занимаются предприятия во многих странах мира и их ассортимент очень велик. Данное многообразие можно обосновать тем, что при

измельчении сыпучих продуктов в хозяйствах разного размера используют именно зернодробилки молоткового типа. Основным рабочим органом являются решета и молотки, которые регулируют степень измельчения зерна. При эксплуатации таких машин выявили, что минимальный ресурс из всех рабочих органов имеют молотки. Наибольший износ молотков вызван естественным процессом ударного разрушения зерна. Повышение ресурса рабочих органов, в частности молотков, в сочетании с простотой и надежностью зернодробилок молоткового типа сделало бы этот тип измельчителей одним из совершенных.

1.2 Анализ условий работы рабочих органов зернодробилок и факторы, влияющие на их изнашивание

К рабочим органам зернодробилок относят молотки, решета и деки. Решета предназначены для отвода готового продукта, дополнительного измельчения и регулирования степени измельчения. Деки предназначены для повышения эффективности процесса измельчения, они вместе с решетами составляют неподвижную стенку, о которую ударяются частицы материала, отброшенного молотками. Молотки предназначены для измельчения материала влет, они различаются по форме, размерам и назначению. Все остальные механизмы - транспортеры-питатели, бункеры, вентиляторы, циклоны, фильтры, трубопроводы, выгрузные транспортеры – являются вспомогательными, обеспечивающими непрерывность и надежность технологического процесса.

Процесс измельчения в зернодробилках молоткового типа происходит следующим образом (рисунок 1.4), зерна материала, попав в зону действия молотков, получают первый удар и отбрасываются к периферии, где отражаются поверхностью от деки или решета. Отражаясь от них, частицы замедляют свое движение, но в зоне действия молотков они опять ускоряются от их ударов и потока воздуха. При установившемся процессе по всей внутренней окружности корпуса зернодробилки образуется вращающийся непрерывно перемешивающийся слой материала. От многократных столкновений с молотками, решетом и декой зерна измельчаются. При достижении заданного

размера частицы материала проходят через отверстия решета и удаляются из зернодробилки. На их место поступают новые порции неизмельченного материала. [107]

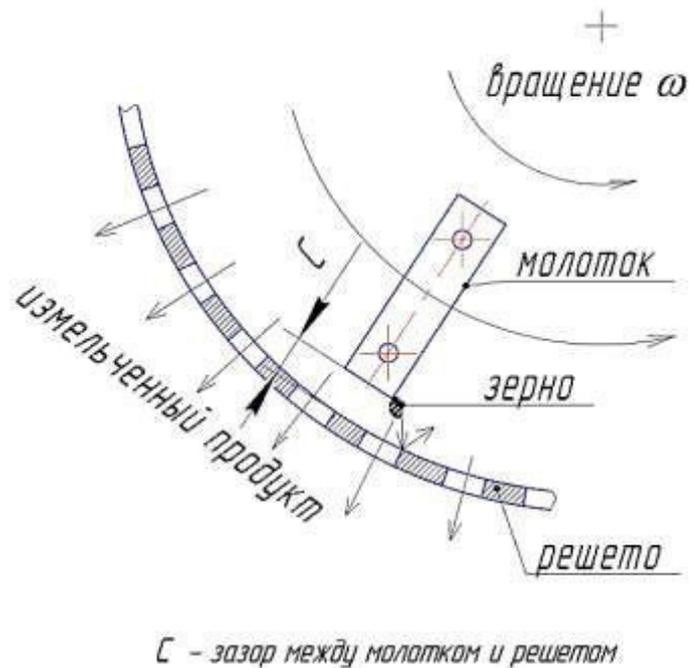


Рисунок 1.4. – Схема процесса измельчения в зернодробилке молоткового типа

В процессе работы зернодробилки молоткового типа подвергаются износу основные рабочие органы: молотки, решета и деки, что приводит к увеличению расхода мощности на измельчения, снижению производительности, а также снижению качества получаемого продукта. Описанию процесса изнашивания посвящена обширная литература [18, 40, 41, 46, 84, 95, 164, 168, 169, 181], но, несмотря на это единой теории этого процесса не создано ввиду его сложности и многоплановости физических аспектов.

Процесс дробления связан с ударами отдельных зерен (частиц) о поверхность молотка и деки, и относительным движением (скольжением) частиц по ударной поверхности молотка. По разным данным [169] срок службы молотков, в зависимости от перерабатываемого продукта, составляет от 72 до 300 часов, в то время как ресурс других органов на 1...2 порядка выше. Поэтому самым слабым звеном в зернодробилках является молоток, его изнашивание связано с усталостным разрушением поверхностного слоя от ударного воздействия частиц с последующим его истиранием за счет относительно

движения частиц [162, 163]. Это приводит к необоснованно большому количеству технических обслуживаний по замене молотков (в среднем 20 обслуживаний в год), повышенному расходу оборотных средств на закупку молотков и увеличению простоев оборудования [141].

В течение часа молоток воспринимает 10...50 млн. ударов с силой 10...20 кН, что приводит к пластической деформации и усталостным разрушениям [42]. При рассмотрении поверхности изношенного молотка отчетливо видны риски и царапины - типичные признаки абразивного износа. Причиной абразивного износа могут быть частицы размером в десятки микронов, по своему минералогическому составу близкие к кварцу, которые удалось выделить из зерна, а также песок и камни, которые являются постоянными примесями зерна. Наряду с этим, следует отметить возрастание скорости окислительных процессов вследствие непрерывных ударов зерна о поверхность молотка. Сочетание усталостных явлений, элементов абразивного и окислительного износа определяют необходимость оптимального сочетания твердости рабочей поверхности молотка и его динамической прочности. Кроме того, молоток должен обладать достаточным сопротивлением разрушения при попадании в зернодробилку металлических и неметаллических примесей [153].

Абразивное изнашивание является процессом механическим, при этом, протекание этого процесса и его важнейшие особенности в большей мере зависят от характера взаимодействия абразивных частиц с поверхностью детали. Микрорезание, пластическое деформирование поверхности детали, удар частиц по поверхности детали - все эти различные механические воздействия на материал детали, определяющие различие внешних факторов, влияющих на скорость изнашивания, и различие свойств материалов, ответственных за сопротивление абразивному воздействию.

В настоящее время еще нет единой точки зрения на природу абразивного изнашивания. Однако никто из исследователей не отрицает, что ведущим процессом в абразивном износе при раздавливании и истирании является микрорезание, пластическое оттеснение и усталостное разрушение [36, 40, 61, 73, 78, 154].

Поэтому проблема повышения износостойкости решается путем изучения закономерности изнашивания при самых различных условиях трения и качества поверхностного слоя. Однако процесс изнашивания настолько сложен, а разнообразие факторов, влияющих на износ, настолько велико, что, несмотря на обилие исследований в области трибологии, надежные методы защиты оборудования от интенсивного износа отсутствуют.

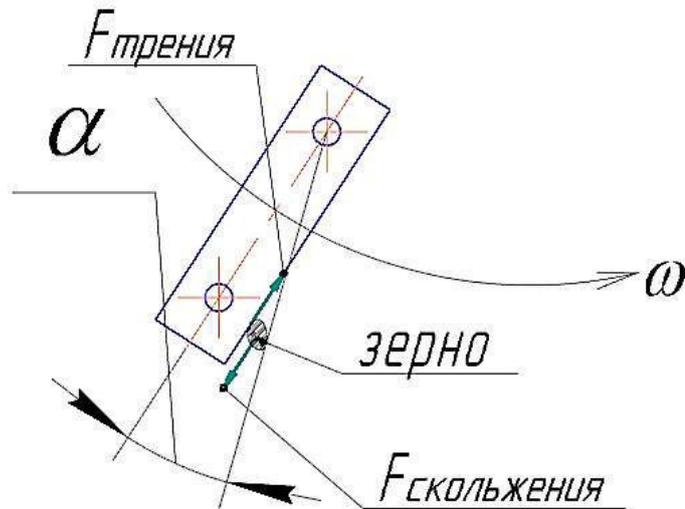


Рисунок 1.5. – Схема воздействия сил трения на рабочую поверхность молотка при соударении с частицей материала.

Основными факторами, влияющими на степень износа рабочих органов (молотков) зернодробилок, являются угол отклонения и конструкция молотка. Износ возникает вследствие соударения частицы материала с рабочей поверхностью, которая находится в положении, отличном от радиального (рисунок 1.5) [143], что, в свою очередь, приводит к возникновению интенсивного истирания под воздействием силы трения при скольжении материала по молотку.

На величину износа также влияют следующие факторы [40]:

- материал, из которого изготовлены детали;
- шероховатость их поверхности;
- твердость трущихся поверхностей;
- характер и род смазки;
- величина удельного давления;
- режим и условия работы деталей;

- антикоррозионные покрытия; загрязнение поверхности деталей;
- степень исправности и наличие уплотнений.

Взаимодействие молотка на высоких скоростях с дробимой средой приводит к быстрому изнашиванию передней (лобовой) грани молотка (в современных конструкциях окружная скорость молотков колеблется в пределах от 40 до 130м/с) [129]. Вследствие износа, вместо лобовых ударов дробимый материал воспринимает удары с проскальзыванием, что значительно ухудшает его взаимодействие с декой. В результате износа увеличивается зазор между молотком и решетом, что сильно сокращает зону воздействия молотков. Всё это сказывается на падении производительности зернодробилки на 30...45% и увеличении энергопотребления на 25...35% [113, 158].

Условия работы рабочих органов зернодробилок с продуктами измельчения изучались разными исследователями, такими как Горячкин В.П., Зеленев А.А., Тимановский А. В., Бойко А.И., Степанов В.В., Золотова А.А., Андреев П.В., С.В. Мельников, Власов Ю.А., Тенденбаум М.М., Федоренко И.Я., Ялпачика Ф.Е. и другие [21, 31, 42, 48, 64, 65, 106, 147, 153, 157, 170]. Из исследований видно, что динамика и характер износа молотков обуславливается совокупностью процессов:

1. усталостными разрушениями в микрообъёмах при многократном деформировании поверхностных слоёв ударами зёрен и частицами примесей минерального происхождения;
2. царапанья вследствие скольжения этих частиц по рабочим поверхностям молотка;
3. вероятными ударами молотков о посторонние предметы.

Также можно сказать, что основами дефектами молотка являются:

1. износ лобовой грани молотка зернодробилки;
2. износы установочных отверстий молотка;
3. погнутость молотка;
4. забоины на поверхности молотка.

Изучив результаты исследований ученых можно сделать вывод, что вопрос износа рабочих органов, в частности молотков, и условия работы их работы изучены

все еще не полностью. Некоторые результаты носят противоречивый характер. Прогнозированию ресурса молотков и его износа практически не уделялось внимания. Все это показывает на то чтобы продолжить исследования в области прогнозирования повышения ресурса рабочих органов зернодробилок.

Исходя из этого нами выдвинуто предположение о том, что в качестве основных мероприятий, позволяющих управлять изменением геометрических параметров молотка в процессе износа является его упрочнение.

1.3 Анализ материалов и технологий изготовления и упрочнения молотков

Материалы, применяемые для оборудования в перерабатывающем производстве агропромышленного комплекса, должны быть устойчивые к электрохимической и химической коррозии, к абразивному изнашиванию, оцениваться и регламентироваться нормативными документами по охране здоровья потребителя. К оборудованию перерабатывающих производств относят, например, зернодробилки молоткового типа, в которых продукт подвергается механическому воздействию, что приводит к изменению их формы и размеров при сохранении первоначальных свойств. К рабочим органам, изменяющим качественное состояние перерабатываемого материала, относятся молотки, решета и деки.

Как сказано ранее, износ молотков имеет преимущественно ударно-усталостный и абразивный характер. Причинами ускоренного износа молотков являются недостаточная твердость и динамическая прочность в зоне максимальных давлений, воспринимаемых от воздушно-продуктивного слоя. При этом для обеспечения достаточной производительности и умеренного энергопотребления процесса дробления необходимо обеспечивать условия самозатачивания рабочих улов молотков. Это условие выполняется при разнопрочности передней и, задней и боковых поверхностях молотка.

Геометрия молотков и материал, из которого изготовлены молотки, являются определяющими факторами, влияющими как на износостойкость самого молотка, его ресурс, так и на качество помола. Их следует изготавливать из тех марок сталей, которые имеют оптимальные сочетания твердости и вязкости,

причем наибольшая прочность молотка получается в том случае, когда повышение твердости не вызывает снижения вязкости.

Для изготовления молотков зернодробилок применяют различные стали дорогие высококачественные, легированные и дешевые углеродистые с упрочняющими гранями. Молотки дробилок, предназначенных для дробления твердых материалов (горнодробилки), изготавливают литыми из марганцовистой стали 110Г13Л, имеющую высокую ударную вязкость сердцевины 500...600 НВ на поверхности.

Молотки зернодробилок изготавливаются из износоустойчивых легированных сталей, таких как сталь 30ХГСА с последующей закалкой твердостью 45...50 HRC, сталь 65Г с последующей закалкой твердостью 50...55 HRC, сталь 40Х с последующей закалкой твердостью 50...55 HRC [109]. Применяют углеродистые стали с упрочняющими гранями, например, сталь 45 наплавляют электродами Т-590. Можно использовать сталь Ст3 с взаимозаменяемой рабочей гранью износостойкого стали У8А, стали 40Х, стали 65Г [124]. Для изготовления молотков применяется шведская износостойкая сталь HARDOX 450 твердостью 425...475НВW [71], аналогом зарубежной стали HARDOX 450 является высокопрочная износостойкая сталь MAGSTRONG 450 твердостью 420...470 НВW [133]. В таблице 1.2 представлены характеристики сталей для изготовления молотков зернодробилок.

Таблица 1.2 – Характеристики сталей для изготовления молотков зернодробилок

Сталь	Вид упрочнения / изготовления	Преимущества	Недостатки	Модель машины	Габаритные размеры / толщина, мм
1	2	3	4	5	6
30ХГСА	Закалка 45...50 HRC	Равномерность износа кромок	Скругление боковых граней, невысокий ресурс	ДКМ КД КДУ ДМ ДДМ	110×50×6 136×50×3

1	2	3	4	5	6
65Г	Закалка 50...55 HRC Без закалки	Равномерное изнашивание	Слабо флокеночув ствительна и склонна к отпускной хрупкости. «сырая» быстро изнашивается , разбивает гнездо крепления	КД ДМ	160×50×5
HARDOX500 HARDOX400 (аналог 18ХГНМФР)	Закалка с отпуском / плазменная или лазерная резка 425...530HBW (47...51 HRC)	Минимальный износ без сколов, высокая износостойкость, ресурс в 5 раз выше, чем у стали 10ХСНД	Высокая стоимость стали	ММ, ДДМ-5 КДУ СМД	110×50×6 565×230×130×52
110Г13Л	Литье 500...600HB	Дешевые отливки, не требующие механической обработки, высокое качество поверхности	Флокеночув ствительнос ть и внутренние напряжения ; низкий ресурс; образуются сколы; При сколе на одном молотке, приходится заменять все молотки	СМД	565×230×130×52

Таким образом, для изготовления молотков зернодробилок применяются в основном дорогостоящие стали, поэтому мы предполагаем, что возможно использовать дешевые углеродистые марки сталей с упрочненными рабочими кромками молотков.

1.4 Обзор основных способов повышения ресурса молотков зернодробилок

В процессе эксплуатации зернодробилок происходит изменение количественных и качественных показателей их работы, связанное с интенсивным износом рабочих органов (молотков). Ресурс молотков определяется четырьмя группами факторов: конструктивными, технологическими, конструктивно-технологическими и организационно-технологическими (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Методы повышения эксплуатационного ресурса молотков зернодробилок

Конструктивные факторы должны: обеспечить ресурс молотков при высоких технико-экономических показателях процесса измельчения, должны

соответствовать следующим требованиям: максимальному использованию массы материала молотка в течение срока службы; минимальному изменению или периодическому восстановлению профиля рабочих граней при износе, максимально допустимой толщине молотка из требований эффективного разрушения измельчаемого материала; преобладанию прямых ударов при взаимодействии с разрушаемым материалом.

Данному методу в основном соответствует изменение формы молотков: ступенчатый профиль, отклонение передней поверхности по отношению к направлению движения молотка, изменение геометрических размеров ударной части молотка и др.

Для исключения проскальзывания зерна по молотку предлагается новая конструкция молотка. Он изготавливается с заранее известным углом наклона боковой (рабочей) грани, поскольку сам молоток во время работы отклоняется именно на этот угол. Предлагаемая конструкция молотка составлена из двух разновеликих трапеций, расположенных вдоль продольной оси симметрии молотка и направленных меньшими основаниями к поперечной оси симметрии. При этом угол наклона граней трапеции равен углу отклонения молотка от радиального положения. Молотки с преобладающими прямыми ударами, приводят к увеличению производительности и значительному снижению потребления электроэнергии [125, 158]. Наибольшим ресурсом обладают модернизированные молотки, у которых рабочая грань изготовлена из стали У8 по сравнению с пластинчатым молотком, изготовленным из стали 65Г, в 3,7 раза [126]. Молоток рабочая поверхность, которого выполнена в виде трех выступов, радиусы от вершин, которых до точки подвеса равны, т.е. $r_0 = r_1 = r_2 = r_{\text{оптимальное}}$. увеличивает эффективность измельчения кормов [121]

Технологические факторы (термообработка, наплавка и др.) должны учитывать выбор материалов, применяемых для изготовления молотков. Сложность в выборе материала определяется условиями работы молотков. Поскольку рабочие органы подвергаются одновременному воздействию потока абразивных частиц и ударных нагрузок, то материал должен обладать

противоречивыми свойствами – повышенными твердостью и ударной вязкостью. Исследования молотков, выполненных из ряда материалов (сталей 65Г, 30ХГСА, У8А, 110Г13Л, 30ХГСА, 12Х13А, HARDOX500, конструкционных сталей с цементацией на различные глубины, закалкой в электролите, различными наплавками и напылениями, а также трехслойного проката и т. д.) не выявили реальных путей значительного повышения износостойкости рабочих органов [10]. К кардинальному решению вопроса повышения ресурса молотков может привести создание и исследование новых, в частности, спеченных материалов. Основным требованием в этом направлении остается выбор материала, обладающего высокой стойкостью к абразивному изнашиванию и ударным нагрузкам.

Повышение ресурса молотков технологическими методами упрочнения, являются лазерная обработка, нанесение порошковых материалов дискретным легированием и микроплазмой, индукционная наплавка псевдосплавов и эвтектических покрытий. Закалка при нагреве в электролите – способ термической обработки на повышение износостойкости углеродистых сталей. Для получения износостойких структур стали 45 (мартенситнокарбидная фаза) необходимо производить закалку сталей в электролите со следующими технологическими параметрами: сила тока до 100А, напряжение 220...250В, температура электролита 40...70°С, время нагрева 5...6,5с. Охлаждение после нагрева производится электролитом. Торцы детали экранируются огнеупорным шамотным кирпичом. Твердость закаленной поверхности составляет 55...59 HRC [30].

Диффузионный метод упрочнения состоит в том, что при значительно высоких температурах (близких к температуре плавления образца) материал насыщают инородными атомами (легирование). Молотки зернодробилки, изготовленные из стали 30ХГСА, насыщают хромом. Процесс диффузии хрома в сталь хорошо протекает в вакууме порядка 1×10^{-5} мм. рт. ст. По сравнению с другими методами, вакуумный метод диффузии более эффективен и во многих случаях экономически выгоден, хотя пока в производственных условиях он мало доступен. В процессе диффузии могут быть нежелательные явления (спекание, прилипание). Для их устранения в шихту хрома обычно добавляют окись

алюминия. Процесс диффузии длится в течение трех часов при температуре 1100°C. После этого для устранения всевозможных дефектов проводится отжиг в течение трех часов при температуре 800...900 °С. Остаточное давление в печи не должно превышать 1×10^{-3} мм. рт. ст. [137]

Толстослойные упрочнения, выполненные методами цементации, стали на разную глубину (0,7...1,8 мм) и нитроцементации на глубину 0,7...1,1 мм. показывают повышенную долговечность (в 2 раза, по сравнению со стандартными молотками). Наряду с повышением срока службы, молотки с толстыми слоями упрочнения лучше гомогенных измельчают зерносмеси и дают экономию в расходовании электроэнергии (с 6,5 до 4,9 кВт-ч/т.). Твердость упрочненного слоя HV900 и твердости несущего слоя HV225...250. Долговечность цементированных молотков в пределах 1,78...1,26 раза выше серийных молотков. Позволяет обеспечить снижение энергоемкости процесса на 20...25% [140].

Лазерная закалка деталей машин и образцов материалов осуществляется с использованием установок «Катунь», «Латус-31», ЛТ-1, ЛТ-100 и им подобным. Детали перед лазерной обработкой очищаются от грязи и окалины (в т. ч. дробеструйной обработкой). Для увеличения поглощательной способности поверхности используется покрытие $Zn_3(PO_4)_2$. При упрочнении варьируется направление и ширина дорожек упрочнения, расстояние между дорожками, фокусное расстояние, ток разряда. Для молотка измельчителя (из стали 35) – ток разряда 20А, фокусное расстояние 535 мм, скорость 53,4 м/ч, ширина упрочненного шва 4,5...5,5 мм, шаг между дорожками 4,3...5,3 мм. Твердость закаленной поверхности колеблется в пределах 62...68 HRC в зависимости от исходного материала и режимов лазерной обработки. Лазерное упрочнение рабочих граней молотков дает незначительное повышение износостойкости в сравнении с серийными из стали 65Г. При этом только в начале эксплуатации имеется некоторое преимущество, а затем, с возрастанием наработки, наблюдается тенденция к более резкому увеличению износа Молотки с лазерной обработкой поверхностей рабочих граней несколько выше по долговечности и теряют свою работоспособность после достижения наработки в 300 т. В результате

упрочнения лазером деталей их долговечность увеличивается в 1,5...3 раза [112].

Для повышения ресурса зернодробилок молоткового типа применяется технология жидкостного (безэлектролизного) борирования и термической обработки молотков с применением оптического квантового генератора. Для предотвращения разрушения борированные молотки подвергают термической обработке – высокому отпуску на высоковакуумной установке. Химико-термическая обработка позволяет получить на поверхности молотка защитный слой толщиной до 1,5 мм. Технология жидкостного борирования и термической обработки с применением ОКГ обеспечивает повышение износостойкости молотков в 3...4,5 раза. [26]

Конструктивно-технологические методы упрочнения сочетают в себе возможности технологических методов и некоторые конструктивные изменения, в основном связанные с изменением формы ударной части молотка. При этом необходимо учитывать размерный анализ технологических процессов изготовления деталей конструктивно-технологическими методами [138].

В практике упрочнения деталей сельскохозяйственных машин наибольшее распространение получила наплавка. Наплавка по слою легирующего порошка (смесь зернообразных ферросплавов, карбидов, металлических порошков или литых твердых сплавов) имеет ряд положительных качеств. В настоящее время разработано и предложено множество составов легирующих смесей для наплавки. Например, сталинит, сормайт, боридная смесь БХ, шихта ВИСХОМ-9, механическая смесь измельченного вольфрама с углеродом (вокар) и др.

Технология изготовления наплавки высокохромистым специальным чугуном без нагрева разработана авторами [97], они определили основные направления повышения качества наплавки молотков зернодробилок, за счет замены ручной дуговой сварки на плазменную наплавку с использованием высокоскоростных твердых наплавочных материалов. Технология упрочнения наплавкой заключается в следующем. Механическая обработка рабочих граней. На фрезерном или наждачном станке снимают слой металла, вместо которого наносят износостойкое покрытие. Нанесение обмазки из легирующей смеси на

боковые грани молотка. Состав компонентов смеси должен соответствовать условиям работы молотка. Просушка обмазки на воздухе (24 ч) и в печи или кузнечном горне при температуре 250...300°C в течение 1,5...2ч. Наплавка угольным или вольфрамовым электродом диаметром 10...12 мм, при силе сварочного тока 250...280 А. После наплавки боковых граней повторяют все предыдущие операции для торцевых граней. Механическая обработка наплавленных поверхностей (по необходимости) на обдирочно-заточном станке и подгонка молотков по массе.

Для наплавки используется электродная проволока марки Св08Г2С диаметром 1,6мм. Технологические параметры наплавки: сила сварочного тока 220...240А; скорость подачи электродной проволоки 18 м/ч; высота слоя легирующего порошка 4...5 мм; скорость наплавки 20 м/ч. Долговечность молотков при таком упрочнении увеличивается в 2...2,5 раза [47].

Несколько иная технология наплавки рабочего контура молотков из стали 35 электродом Т-590. Толщина наплавленного слоя 1,5...2,0 мм, твердость 50...55 HRC. После наплавки молотки подвергают объемной термической обработке до твердости 36...42 HRC. Однако они имеют невысокий ресурс долговечность из-за недостаточной толщины покрытия. Более износостойкое соединение получается при индукционной наплавке молотков сплавом ПР-С27 ГОСТ 21449-75. Индукционную наплавку молотков проводят в холодном тигле. Толщина наплавленного слоя – 6...8 мм, твердость – 57...61 HRC [75].

Технология повышения ресурса молотков при помощи электрошлаковой наплавки порошковых износостойких материалов состоит из нескольких этапов. На изношенную и подготовленную для наплавки сторону молотка надевается медный кристаллизатор, в котором предусмотрена полость для охлаждающей ванны. Сверху находится пластинчатый угольный (графитовый) электрод. Перед началом наплавки в кристаллизатор засыпается флюс (например, АН-22). Касанием электрода на деталь (молоток) при включенном источнике постоянного тока возбуждается электрическая дуга, которая расплавляет флюс. После его полного расплавления в зону наплавки равномерно засыпается износостойкая

шихта (смесь ферросплавов или гранулированный сормайт). Шихта расплавляясь образует жидкую ванну, а флюс всплывает на ее поверхность. Процесс продолжается до полного восстановления первоначальной формы молотка. Износостойким материалом для наплавки может служить гранулированный сормайт, сталинит или смесь ферросплавов. Источник постоянного тока для данного способа служит сварочный генератор или выпрямитель с силой тока не менее 500 А. Плоский угольный электрод круглого сечения диаметром 10...12 мм. Ресурс молотков при этом способе упрочнения, наплавленных сормайтом, возрастает в 1,5...2 раза, а смесью ферросплавов – в 2...2,5 раза [98].

Одной из высокопроизводительных технологий упрочнения деталей является точечная дуговая наплавка, предложенная институтом электросварки им Патона. В качестве наплавляемого износостойкого материала для молотков использовалась серийно выпускаемая промышленностью порошковая проволока ПП-АН170 параметры упрочняющего слоя разработаны [33]. Ресурс упрочненных молотков в 1,8...2 раза выше серийных. В качестве конструктивного решения, улучшающего эффективность и износостойкость, предлагается формирование ударной рабочей части молотка, а именно: создание триметаллического проката, периферийная часть которого выполнена из износостойкого материала с помощью наплавки износостойкими материалами – эвтектическими покрытиями, сплавом ПР-С27, порошковой проволокой ПП-АН170, молоток изготовлен из стали 65Г [33].

Наиболее перспективным направлением является, исследования по применению металлокерамических, минералокерамических, композиционных материалов и слоистых металлокомпозитов [111], а также разработку конструкций принципиально новых молотков, использующих высокую износостойкость материалов, преимущества технологии прессования спекания и спаивания деталей, а также новые доступные для массового производства варианты крепления износостойких пластинок.

Технология создания износостойких покрытий на рабочей поверхности молотков методом высокоскоростного лазерного напекания порошковых материалов, при которой формируются градиентные покрытия [74]. Одной из

технологий, обеспечивающих нанесение градиентных покрытий, является селективное лазерное спекание (SLS) [182]. Для получения износостойких покрытий применяется порошковая композиция марки ПГ-СР4(ГОСТ 21448-75). Покрытия наносили двумя различными способами: на поверхность торца прямоугольного молотка, а также на боковую поверхность молотка. В качестве источника энергии использовали лазерное излучение, генерируемое твердотельным лазерным генератором «Булат». Скорость нанесения покрытия 25 мм/с. Процесс обработки производили в защитной среде аргона. Использование градиентных покрытий решает проблемы низкой прочности адгезии покрытия к поверхности молотка. Метод позволяет получать покрытия из сложных порошковых композиций с адгезионной прочностью, приближенной к прочности материала подложки с толщиной от 0,5 до 1 мм [167].

Удовлетворительные результаты по износостойкости молотков получены при упрочнении рабочих граней самофлюсующимся сплавом системы Ni-Cr-B-Si-C. На изношенную часть молотка зернодробилки из стали 65Г, а также на рабочие поверхности нового молотка, изготовленного из стали 30, после дробеструйной обработки способом плазменного напыления наносился самофлюс ПГ-12Н-03 с 5% WC с последующим печным оплавлением при 1050...1100°C с выдержкой до 5 мин. Для напыления использовали установку УПУ-3Д, укомплектованную источником питания ИПН 160/600. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, гранулометрический состав порошка – 100...150 мкм, температура просушки порошка – 100...150°C в течение двух часов, предварительная подготовка основы – дробеструйная обработка чугуновой крошкой, дистанция напыления – 70...80 мм, температура предварительного подогрева подложки – 100...120°C. Такое упрочнение покрытий за счет измельчения их структуры и целенаправленного формирования значительного количества эвтектики и упрочняющих фаз обеспечивает повышение износостойкости сплавов 65Г и стали 30 с плазменным покрытием ПГ-12Н-03 с добавкой WC и без нее в 1,5...2 раза [44].

Одним из новых способов является упрочнения молотка зернодробилки

индукционной наплавкой. Для упрочнения использовался порошок высоколегированного хромистого чугуна марки ПГ-УС25 (ГОСТ 21448-75). Наплавку осуществляли на инверторе фирмы «ЭЛСИТ» (г. Томск). Повышение срока службы детали достигается тем, что перед упрочнением по периметру одного или обоих концов одной из сторон пластины, на расстоянии 2...2,5 мм от ее краев, выполняют отверстия или пазы на глубину $1/2...1/3$ толщины упрочняемого молотка, при этом размещение отверстий повторяет очертания экспериментальной фигуры износа детали. Испытания молотков зернодробилки, упрочненных по этому способу, показали, что износостойкость и ресурс детали увеличились на 18...20% [23, 134].

Институтом проблем литья и Институтом сверхтвердых материалов, был создан специальный молоток-модуль, на который крепились износостойкие материалы методом сварки, пайки или склеивания с помощью смолы «Спрут». На торцах молотка делаются специальные вырезы, к которым крепятся с помощью порошка бронзы БрОФ пластинки из различных материалов. Пластинки для молотка-модуля изготавливались из износостойких материалов КХНФ-15 и КХЖ-70, базальтового каменного литья, материалов на основе карбидов титана и пластинки из различных полимеров. Получено повышение износостойкость молотков в 2...3 раза за счет применения материалов КХНФ-15 и КХЖ-70. Однако данные технологии имеют существенные недостатки по надежности крепления, а также сложность технологии пайки армирующих твердых сплавов к основе молотка [52].

В таблице 1.3. представлена краткая характеристика материалов и технологий упрочнения молотков технологическим и конструктивно-технологическим методами

Под группой организационно-технологических факторов, влияющих на ресурс молотков, подразумеваются: особенности организации технологического процесса измельчения материала, определяющиеся в значительной мере общей конструкцией зернодробилки; подготовка материала, поступающего на измельчение; предварительная обработка и т. д. [97, 188]

Таблица 1.3. – Краткая характеристика материалов и технологий упрочнения молотков технологическим и конструктивно-технологическим методами

Материал и технология упрочнения	Толщина рабочей части, мм	Упрочняемая поверхность	Материал упрочнения	Способ упрочнения	Глубина (толщина) упрочняемого слоя, мм	Твердость упрочненной зоны, HRC	Наработка до достижения предельного износа, т
Сталь 65Г (серийный)	4	-	-	закалка	-	54	200
Сталь 65Г, лазерная обработка	5	боковая	-	лазерная обработка	0,4...0,5	по HV	250...300
Ст3, дискретное легирование	4	боковая	ПП-АН170	электродуговой контактный	до 4	59...61	400...450
Сталь 65Г, эвтектическое покрытие	4	-	система Fe-Mn-C-B	индукционная наплавка	0,1...2,5	-	400
Сталь 65Г, эвтектическое покрытие	4	-	система Fe-Mn-C-B	индукционная наплавка	0,1...2,5	-	400
Ст3, модульная пластинка КХЖ-70	8	модульная пластинка	КХЖ-70	припайка износостойкой пластинкой	8	60...65	400...420
Сталь 65Г, микроплазма	4	боковая и торцевая	ПП-АН148	микроплазменная сварка	2...3	60...62	430
Сталь 45, микроплазма	5	боковая	-	-	2...3	60...62	550
Графитизированная сталь, литье	12	-	125СРЛ	литейная технология	12	56...72	1000
Сталь 35, эвтектическое покрытие	5	боковая	ПР-С27	индукционная наплавка	6...8	57...61	560...600
Сталь 45, электролитическая закалка	5	-	-	закалка в электролите	-	55...59	700

Проанализировав различные факторы, влияющие на износ молотка, различные методы упрочнения, мы пришли к выводу о создании принципиальной новой конструкции молотка, которая позволит устранить недостатки предыдущих моделей и принципиально изменит характер износа, а также существенно повышает эксплуатационный ресурс молотков за счет эффекта самозатачивания.

1.5 Разработка гипотезы комбинированного упрочнения молотков

В процессе работы зернодробилки частицы измельчаемого продукта ударяются о молотки, а также скользят по их поверхностям (в течение часа молоток воспринимает 10...50млн. ударов с силой 10...20кг). Взаимодействие молотка на высоких скоростях с дробимой средой приводит к быстрому изнашиванию передней (лобовой) грани молотка (в современных конструкциях зернодробилок окружная скорость молотков колеблется в пределах 40...120м/с). Динамика и характер износа молотков обуславливается совокупностью процессов:

- усталостными разрушениями в микрообъемах при многократном деформировании поверхностных слоёв ударами зёрен и частицами примесей минерального происхождения;

- царапанья вследствие скольжения этих частиц по рабочим поверхностям молотка;

- вероятными ударами молотков о посторонние предметы.

Причиной абразивного износа являются частицы размером в десятки микрон, по своему минералогическому составу близкие к кварцу (в зерновой массе минеральных примесей содержится до 5%), а также песок и камни, которые являются постоянными примесями зерна. При рассмотрении поверхности изношенного молотка отчётливо видны риски и царапины – типичные признаки абразивного износа. Наряду с этим, следует отметить возрастание окислительных процессов вследствие непрерывных ударов зерна о поверхность молотка. Кроме того, до 3% молотков выходит из строя при соударении о не дробимые материалы, случайно попадающие в дробильную камеру [42].

Анализ изменения профилей в процессе изнашивания показывает, что наибольший износ наблюдается в зоне максимальных давлений, т.е. в вершине угла рабочей части молотка. При этом молоток быстро теряет прямоугольную форму, а вместо выступающего ребра образуется некоторая поверхность трения. По мере изнашивания существенно меняется геометрия торцевой поверхности, постепенно приобретающей выпуклый криволинейный профиль. В дальнейшем форма торцевой поверхности стабилизируется, а превалирующий износ наблюдается только в направлении уменьшения длины молотка (рисунок 1.7) [16].

Вследствие износа молотков, сопровождающегося скруглением лобовой грани, вместо лобовых ударов дробимый материал воспринимает удары с проскальзыванием, что значительно ухудшает его взаимодействие с декой (решетом). В результате износа увеличивается зазор между молотком и решетом (декой), что сильно сокращает зону воздействия молотков. Всё это сказывается на падении производительности зернодробилки на 30...45% и увеличении энергопотребления на 25...35% [16].

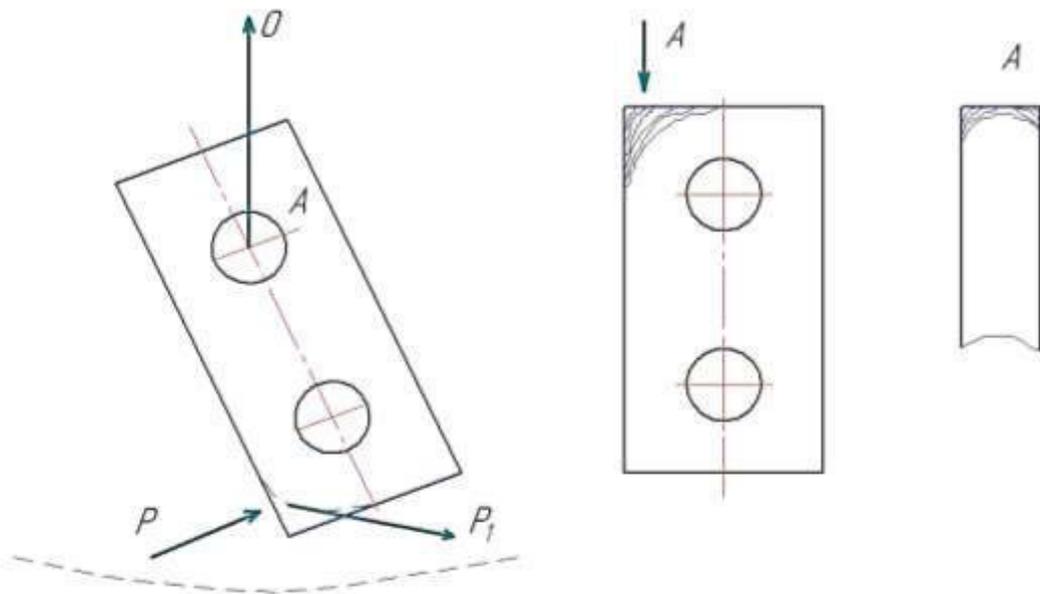


Рисунок 1.7 – Условная схема работы и характер износа серийных молотков

Многолетняя эксплуатация зернодробилки показала, что предлагаемые до настоящего времени способы повышения ресурса молотков не нашли широкого применения в практике агропромышленного комплекса, очевидно, по причинам

их недостаточной эффективности и технологичности.

В связи с этим на основе многолетних исследований, проводимых в Новосибирском ГАУ в различных областях производства горнодобывающей промышленности и упрочняющих технологий деталей сельскохозяйственных машин (известные работы Ю.Б. Капилевича, С.У. Глазычева, В.В. Коноводова, А.А. Малышко) была выдвинута гипотеза, о возможности повышения ресурса рабочих органов зернодробилки молоткового типа технологическими методами за счёт комбинированного упрочнения рабочих кромок индукционной пайкой твердосплавной пластинкой с применением специального железоуглеродистого сплава. Для реализации идеи самозатачивания в процессе эксплуатации молотков предлагается упрочнение рабочей кромки вольфрамокобальтовыми твердосплавными пластинками (ВК8) индукционной пайкой с применением специального высокопрочного железоуглеродистого сплава (патент РФ №2076795 от 10.04.97г.) [118] (рисунок 1.8).

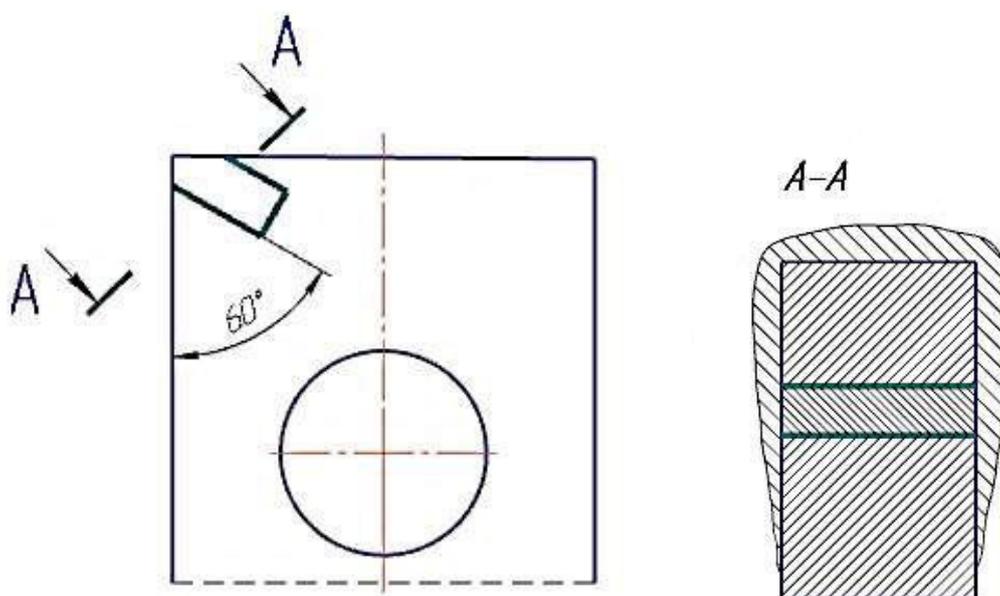


Рисунок 1.8 – Комбинированное упрочнение молотков

На основании теоретических исследований и предложенной гипотезы была разработана полезная модель «Молоток дробилки» (патент РФ №192763 от 30.09.2019г.) [122]

1.6 Выводы по главе, цель и задачи исследования

Проведенный анализ выполненных исследований показал, что молотки зернодробилки работают в условия абразивного изнашивания, износ сопровождается скруглением рабочей кромки молотка, поэтому требуется его упрочнение. Рассмотренные технологии упрочнения недостаточно применимы для повышения ресурса молотков зернодробилок, поэтому предлагается технология комбинированного упрочнения рабочих кромок индукционной пайкой твердосплавной пластинкой с применением специального железоуглеродистого сплава.

В соответствии с анализом состояния вопроса и целью исследования – повышение эффективности работы зернодробилок за счет комбинированного упрочнения молотков при их изготовлении поставлены следующие задачи:

- разработать технологию комбинированного упрочнения рабочих кромок молотков зернодробилок для управления изменением их геометрических параметров в процессе износа;
- разработать математическую модель прогнозирования и установить закономерности изнашивания молотков зернодробилок и величины износа упрочняющих элементов рабочей кромки молотков от наработки;
- обосновать структурный состав, показатели прочности паяного соединения и рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы пайки твердосплавной пластинки к молотку;
- провести производственные испытания молотков, упрочненных комбинированным способом и оценить экономическую эффективность результатов исследования.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА МОЛОТКОВ КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

2.1. Методы определения износа молотков зернодробилок

Теоретический анализ изменения профилей молотков зернодробилок в процессе изнашивания (раздел 1.5), показывает, что наибольший износ наблюдается в зоне максимальных давлений, т.е. в вершине угла рабочей части молотка. При этом молоток быстро теряет прямоугольную форму, а вместо выступающего ребра образуется некоторая поверхность трения. По мере изнашивания существенно меняется геометрия торцевой поверхности, постепенно приобретающей выпуклый криволинейный профиль близкий к параболической поверхности. В дальнейшем форма торцевой поверхности стабилизируется, а преобладающий износ наблюдается только в направлении уменьшения длины молотка (рисунок 1.7 п.1.5). Предельным износом рабочей грани считается износ до главной оси симметрии молотка. Дальнейшая его эксплуатация возможна после перестановки молотка на оси ротора новой рабочей гранью в сторону измельчаемого продукта.

Следовательно, для обеспечения высокой эффективности производства кормов – необходимо применение рабочих органов – имеющих достаточный запас эксплуатационного ресурса и износостойкости за счет конструктивно-технологических мероприятий, на достижение чего и направлена технология комбинированного упрочнения рабочих органов зернодробилок рабочей кромки твердосплавной пластинкой с применением FeC-припоя.

Оценка износа молотков, несмотря на их простую форму, представляет экспериментальные трудности. Широкое применение в практике нашел метод определения износа по потере массы, когда после определенной наработки молоток должен быть тщательно очищен, взвешен, а затем для сохранения балансировки установлен на роторе в прежнем положении. Данный метод трудоемок и позволяет определить износ только в виде потери массы, не давая информации о форме изнашиваемого молотка, что ограничивает возможности его

применения монометаллическими однородными молотками, когда параболическая форма изнашивающегося профиля известна [81].

В процессе обработки опытных данных по методу определения износа по потере массы находятся следующие показатели:

1) абсолютный износ молотка, г.

$$\Delta m = m - m' \quad (2.1)$$

где m – масса нового молотка, г.;

m' – масса изношенного молотка, г.

2) относительный износ молотка, %.

$$\Delta m' = \frac{\Delta m}{\Delta m_q} \times 100 \quad (2.2)$$

где Δm_q – предельно допустимый абсолютный износ одной рабочей грани молотка, г.;

3) удельный износ молотка, г/т:

$$\Delta m_y = \frac{\Sigma \Delta m}{G} \quad (2.3)$$

где $\Sigma \Delta m$ – абсолютный износ партии молотков, г.;

G – количество переработанного материала, т.

Зависимость абсолютного износа молотков по потере массы от количества измельченного материала зернодробилок представлена на рисунке 2.1.

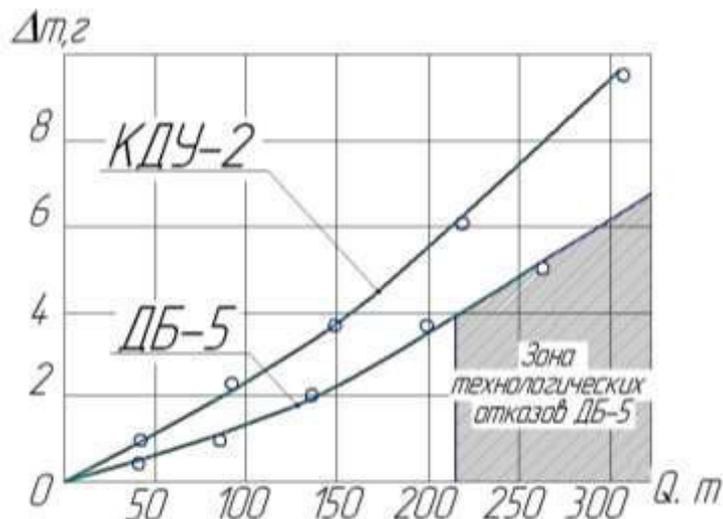


Рисунок 2.1 – Зависимость абсолютного износа по потере массы молотков от количества измельченного материала

Допустимый абсолютный износ одной рабочей грани представляет собой

потерянную в процессе эксплуатации массу молотка, изношенного до половины его ширины. Применяемые методы повышения ресурса молотков в большинстве случаев влияют на форму профильных кривых износа в направлении сохранения их более длительной работоспособности. Вследствие этого метод определения износа по потере массы, не предусматривающий анализа формы бойковой части молотка, оказывается малоприменимым.

Зависимость между величиной износа, определенными по потере массы и потере площади, может быть представлена следующей формулой:

$$W = S \times \Delta \times \gamma \quad (2.4)$$

где Δ – толщина молотка (мм);

γ – плотность материала молотка (г/мм³);

S – площадь (мм²).

Согласно формуле 2.4, зная площадь износа можно определить количество потерянной массы молотка во время эксплуатации. Для определения площади износа молотка известен координатный метод измерения износа, при использовании которого, задаваясь несколькими значениями одной координаты в плоскости молотка по положению линии изношенного профиля, определяются величины другой координаты, характеризующие износ профиля. Точность метода увеличивается с увеличением количества точек замера, что приводит к возрастанию объема и усложнению обработки результатов.

В работе [31] описано приспособление для измерения износа молотков. В основе его заложена одна из разновидностей координатного метода, когда молоток помещается в полярную систему координат с фиксированными значениями угловой координаты. По величине радиусов определяются значения износа, в измеряемых точках профиля молотка. Приспособление позволяет получать профили рабочих граней молотков (рисунок 1.7 п.1.5) без их снятия с ротора [31]. Однако, этот метод снятия профильных кривых не измеряет износ ребер, разделяющих торцевые и боковые поверхности, и поэтому погрешность в измерении наиболее высока.

При оценке точности определения площади изношенного участка молотка,

снятого с помощью миллиметровой бумаги, при независимых повторностях измерения одного и того же профиля выявили, что основная ошибка измерений зависит от качества визуального подсчета площади изношенного участка.

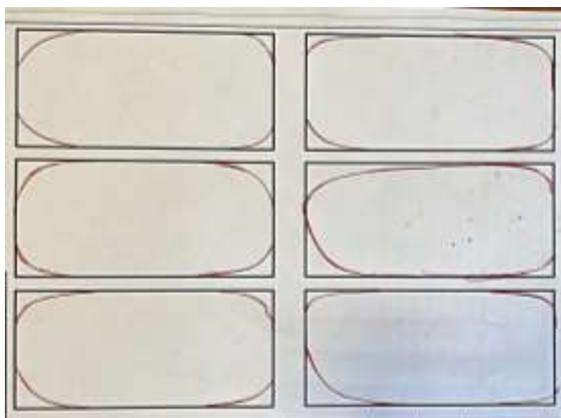


Рисунок 2.2 – Профили изношенных молотков

Для определения площади изношенного профиля молотков и для подсчета изношенных участков графоаналитическим методом путем построения профильных кривых с помощью планиметров и определение площади изношенного участка. Результаты измерений величин износа молотков, при использовании измерений износа путем массового метода и графоаналитического указывают на существенные отличия в полученных данных. Однако графические зависимости, построенные по результатам измерений, представляются зависимостями идентичного характера изменений износа от наработки (рисунок 2.3).

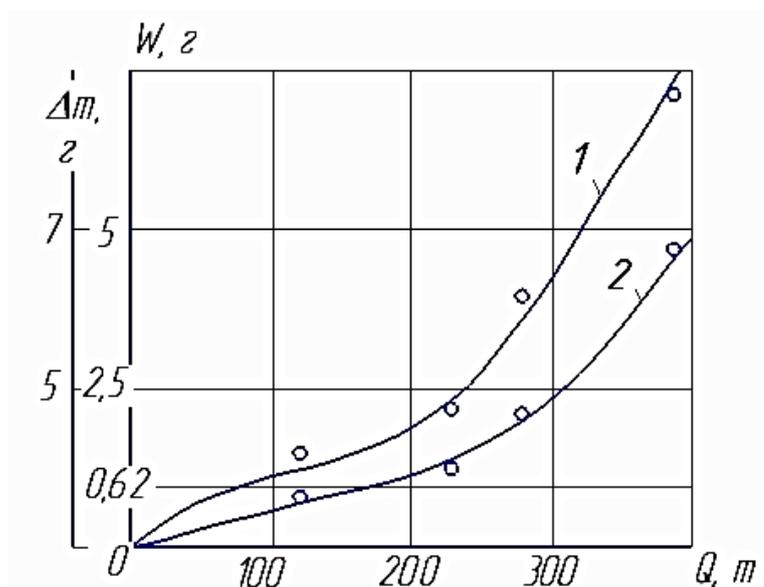


Рисунок 2.3 – Динамика изнашивания молотков при измерении износа:

1 – массовым методом; 2 – графоаналитическим методом

Статистическая обработка результатов визуальных измерений при графоаналитическом методе позволила установить, что при уровне доверительной вероятности 0,95 допустимой при изучении процессов изнашивания молотковых рабочих органов, они находятся в пределах 122...158мм², а относительная погрешность составляет примерно 2%.

Количественная оценка графоаналитическим методом определения износа молотков производится по потере площади, образованной первоначальным профилем (прямыми $x = 0$, $y = 0$, представленными на рисунке 2.4) и профилем, полученным в результате изнашивания (кривая $y = f(x)$). При этом площадь определяется формулой:

$$S = \int_0^{x_k} f(x) dx \quad (2.5)$$

где x_k – точка, соответствующая предельному износу рабочей кромки молотка.

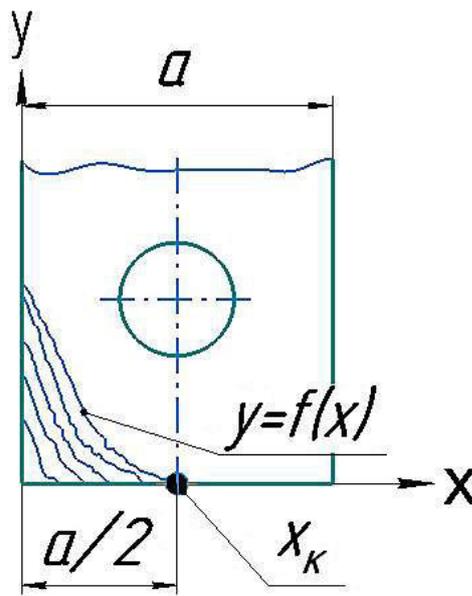


Рисунок 2.4 - Профильные кривые изменения формы ударной части молотка

Таким образом, при определении износа молотка воспользуемся графоаналитическим методом построения кривых износа, по которым определяется площадь износа, зависящая от наработки молотка.

2.2. Математическая модель прогнозирования ресурса упрочненных молотков

Вопросы изнашивания молотков зернодробилок в процессе дробления

материала являются особым объектом исследований. Это связано со сложностью самого процесса изнашивания и учета всех факторов влияния в процессе работы зернодробилки, что предопределяет сложные связи между параметрами процесса износа молотков. Для разработки конструктивно-технологических мероприятий с целью повышения эксплуатационного ресурса молотков необходимо определить связи между параметрами, описывающими процесс износа молотков и наработку. Зависимость между ресурсом (наработкой Q) и величиной износа S может быть представлена математической моделью прогнозирования. Построение математической модели позволит определить не только связи, но и создаст математический аппарат, позволяющих выразить количественную и качественную связь между теми или иными процессами, в частности между предельным износом и наработкой молотков.

В основе методологии процесса износа зададим коэффициент предельного износа S_0 при приближении, которому устремляется к минус-бесконечности параметр Q и коэффициент предельной наработки Q_0 , при приближении к которому к бесконечности устремляется параметр S .

Приближение к этим параметрам резко увеличивает значения других параметров или определяет невозможность принять это особое значение рассматриваемым параметром. Наличие особых значений, являющихся точкой разрыва второго рода (точки, при которых значения других параметров стремятся к бесконечности), является основанием использовать в качестве зависимости гиперболу, в которой имеются асимптоты [15]. Для определения коэффициентов эмпирической зависимости предлагаем использовать метод наименьших квадратов.

Обобщённая модель гиперболы. Рассмотрим зависимость двух параметров S – величина износа и Q – наработка молотка, каждый из которых имеет особое значение (S_0 для S и Q_0 для Q), определяющее разрыв второго рода связи между параметрами, а именно, значение, при приближении к которому второй параметр стремится к бесконечности. В качестве зависимости предлагается использовать уравнение гиперболы в общем виде [15]:

$$(S + S_0)^{a_s}(Q_0 - Q)^{a_q} = A, \quad (2.6)$$

где a_s , a_Q и A – показатели, характеризующие свойства молотка и измельчаемого продукта, а также взаимодействие между ними. Отметим, что если $a_s = a_Q$, то модель (2.6) эквивалентна модели

$$(S + S_0)(Q_0 - Q) = A. \quad (2.7)$$

Также модель (2.6) можно рассматривать в виде

$$(S + S_0)(Q_0 - Q)^{\frac{a_Q}{a_s}} = A^{\frac{1}{a_s}} = A_1, \quad (2.8)$$

или

$$(S + S_0)^{\frac{a_s}{a_Q}}(Q_0 - Q) = A^{\frac{1}{a_Q}} = A_2. \quad (2.9)$$

В общем случае поиск значений показателей S_0 , Q_0 , a_s , a_Q и A при использовании экспериментальных данных является сложной задачей. Поэтому имеет смысл рассматривать зависимость при определённых условиях.

Например, при известных значениях показателей S_0 и Q_0 , используя логарифмирование уравнения (2.6), для связи можно рассмотреть модель

$$a_s \ln(S + S_0) + a_Q \ln(Q_0 - Q) = A_1, \quad (2.10)$$

где $A_1 = \ln A$. Если ввести новые переменные $X_1 = \ln(S + S_0)$ и $X_2 = \ln(Q_0 - Q)$, то получим линейную вспомогательную модель

$$a_s X_1 + a_Q X_2 = A_1, \quad (2.11)$$

по которой можно определить показатели a_s , a_Q и A_1 .

Приближение с использованием уравнения гиперболы первого порядка. Предлагаем рассмотреть в качестве зависимости между S и Q приближение (2.7), положив, что $S(0) = 0$. Тогда раскрыв скобки, получим уравнение:

$$SQ_0 - SQ + S_0Q_0 - S_0Q = A. \quad (2.12)$$

При $S = Q = 0$ находим значение A

$$A = S_0Q_0. \quad (2.13)$$

И вспомогательная модель будет иметь вид

$$SQ = SQ_0 - S_0Q. \quad (2.14)$$

Полагая, что $SQ = Z$, получаем линейную модель зависимости Z от S и Q :

$$Z = Q_0S - S_0Q, \quad (2.15)$$

в которой нужно найти значения коэффициентов S_0 , Q_0 . Найти значения

коэффициентов S_0 и Q_0 можно по методу наименьших квадратов или с помощью регрессионного анализа статистических данных.

Предлагаем определить значение коэффициентов методом наименьших квадратов, так как этот метод подходит для построения криволинейной линии по точкам, характеризующим площадь износа и позволяет определить наименьшее отклонение значений. Представим результаты n наблюдений в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты наблюдений зависимости S и Q

S	S_1	S_2	...	S_n
Q	Q_1	Q_2	...	Q_n

В качестве модели зависимости рассматриваем формулу (2.4). Для оптимизации модели (2.15) экспериментальным данным таблице 2.1 определяем функцию $L(S_0, Q_0)$ как сумму квадратов разности фактических значений Z_i и теоретических, рассчитанных по формуле (2.15):

$$L(S_0, Q_0) = \sum_{i=1}^n (Z_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2 \quad (2.16)$$

или согласно (2.14)

$$L(S_0, Q_0) = \sum_{i=1}^n (S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2. \quad (2.17)$$

Вычислим частные производные функцию $L(S_0, Q_0)$ по S_0 и Q_0 и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial L(S_0, Q_0)}{\partial S_0} = \left(\sum_{i=1}^n (S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2 \right)'_{S_0} = \sum_{i=1}^n \left((S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2 \right)'_{S_0}, \quad (2.18)$$

$$\sum_{i=1}^n \left((S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2 \right)'_{S_0} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \left((S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i)) Q_i \right) = 0. \quad (2.19)$$

Из (2.19) следует:

$$-S_0 \sum_{i=1}^n Q_i^2 + Q_0 \sum_{i=1}^n (S_i Q_i) = \sum_{i=1}^n (S_i Q_i^2). \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial L(S_0, Q_0)}{\partial Q_0} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n \left((S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i)) S_i \right) = 0, \quad (2.21)$$

Из (2.21) следует:

$$-S_0 \sum_{i=1}^n (S_i Q_i) + Q_0 \sum_{i=1}^n S_i^2 = \sum_{i=1}^n (S_i^2 Q_i). \quad (2.22)$$

Обозначим:

$$\overline{SQ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i), \quad \overline{S^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad \overline{Q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2, \quad (2.23)$$

$$\overline{S^2 Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i^2 Q_i), \quad \overline{S Q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i^2). \quad (2.24)$$

Разделим обе части уравнений (2.20) и (2.22) на число испытаний n , используем выражения (2.23) и (2.24), получим для коэффициентов S_0 и Q_0 систему уравнений:

$$\begin{cases} -S_0 \overline{Q^2} + Q_0 \overline{S Q} = \overline{S Q^2} \\ -S_0 \overline{S Q} + Q_0 \overline{S^2} = \overline{S^2 Q} \end{cases} \quad (2.25)$$

Это система уравнений для неизвестных значений коэффициентов S_0 и Q_0 . Из неё находим значения коэффициентов:

$$S_0 = \frac{\overline{S Q^2} \cdot \overline{S^2} - \overline{S^2 Q} \cdot \overline{S Q}}{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2} + (\overline{S Q})^2}, \quad (2.25)$$

$$Q_0 = \frac{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2 Q} + \overline{S Q} \cdot \overline{S Q^2}}{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2} + (\overline{S Q})^2}. \quad (2.26)$$

В результате, мы нашли значения коэффициентов S_0 и Q_0 , при которых достигается минимум квадратов отклонений фактических от теоретических значений величины $Z = SQ$ в моделях (2.14) и (2.15). Для расчета коэффициентов S_0 и Q_0 можно использовать расчетные значения, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расчетные значения коэффициентов S_0 и Q_0

Номер наблюдения	S_i	Q_i	$S_i \cdot Q_i$	S_i^2	Q_i^2	$S_i^2 \cdot Q_i$	$S_i \cdot Q_i^2$
1	S_1	Q_1	$S_1 \cdot Q_1$	S_1^2	Q_1^2	$S_1^2 \cdot Q_1$	$S_1 \cdot Q_1^2$
2	S_2	Q_2	$S_2 \cdot Q_2$	S_2^2	Q_2^2	$S_2^2 \cdot Q_2$	$S_2 \cdot Q_2^2$
...
n	S_n	Q_n	$S_n \cdot Q_n$	S_n^2	Q_n^2	$S_n^2 \cdot Q_n$	$S_n \cdot Q_n^2$
Сумма	$\sum_{i=1}^n S_i$	$\sum_{i=1}^n Q_i$	$\sum_{i=1}^n (S_i Q_i)$	$\sum_{i=1}^n S_i^2$	$\sum_{i=1}^n Q_i^2$	$\sum_{i=1}^n (S_i^2 Q_i)$	$\sum_{i=1}^n (S_i Q_i^2)$
Среднее значение	\bar{S}	\bar{Q}	$\overline{S Q}$	$\overline{S^2}$	$\overline{Q^2}$	$\overline{S^2 Q}$	$\overline{S Q^2}$

В последней строчке этой таблицы вычисляются вспомогательные показатели для расчета коэффициентов S_0 и Q_0 . Находим коэффициенты в математической модели (2.7), которая определяет зависимость

$$S = \frac{S_0 Q_0}{Q_0 - Q} - S_0, \quad (2.27)$$

или

$$S = \frac{S_0 Q}{Q_0 - Q}. \quad (2.28)$$

Мы получили математическую модель прогнозирования зависимости предельного износа от наработки молотков, которую можно представить графиком (рисунок 2.5).

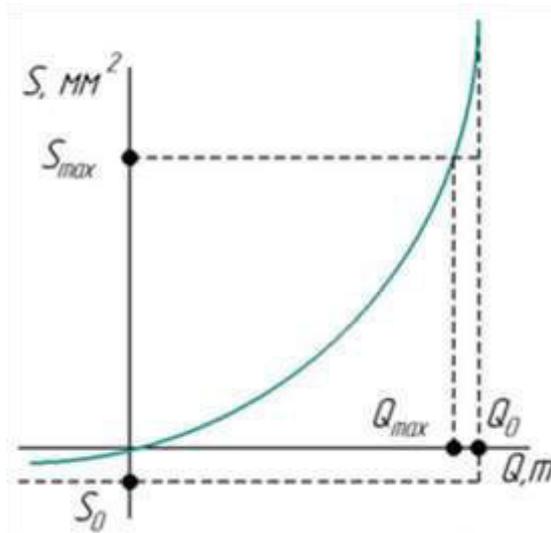


Рисунок 2.5 – Теоретический график зависимости износа от наработки

Таким образом, для построения связей между этими параметрами в качестве модели предлагается уравнение гиперболы и предложена методика расчёта коэффициентов модели. При этом предполагая, что при начальном (нулевом) значении одного параметра второй тоже обращается в ноль.

2.3. Обоснование технологических свойств FeC-припоя для упрочнения рабочих кромок молотка твердым сплавом

Исходя из анализа условий работы рабочих органов зернодробилок и результатов предварительных исследований, была выдвинута гипотеза о возможности повышения ресурса рабочих органов конструктивно-технологическими методами за счет комбинированного упрочнения рабочих кромок молотка твердым сплавом с помощью специального FeC-сплава, используемого в качестве припоя. [10, 118]. FeC-сплавы широко используются в различных отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов, причем, являясь более дешевыми в производстве, имеют значительно более высокие механические свойства.

В соответствии с выдвинутой гипотезой было установлено, что для

уменьшения износа рабочей кромки молотков зернодробилок целесообразно применить комбинированное упрочнение, которое существенно изменит конструкцию молотка (рисунок 2.6). Предполагается молоток изготавливать из стали Ст3 и упрочнять твердосплавными пластинками ВК8, которые располагаются углом к рабочим кромкам и закрепляются посредством индукционной пайки на FeC-припой. FeC-припой обладает повышенной износостойкостью в сравнении с материалом самого молотка. Диффузия элементов из FeC-припоя при пайке обеспечивает науглероживание материала основы молотка, что обеспечивает совместную работу упрочняющего элемента и материала молотка.

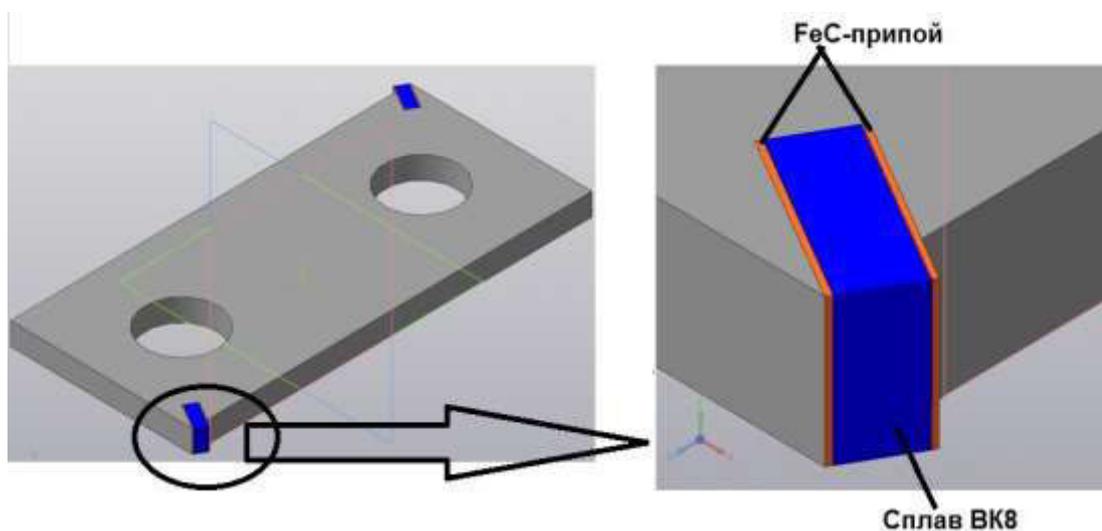


Рисунок 2.6 – Модель упрочненного молотка

Теоретическими концепциями и допущениями при решения поставленной задачи явилось следующее:

1. Исследуемая технология пайки на базе FeC-припоя обеспечивает показатели качества паяного соединения твердосплавной пластинки и молотка высокую прочность при благоприятном характере напряженного состояния, т.е. FeC-припой обеспечивает такие свойства соединения, которые позволяют повысить ресурс молотков зернодробилок при эксплуатации.

2. Применение упрочненных молотков твердосплавной пластинкой, с применением FeC-припоя позволит эксплуатировать их в более производительном оптимальном режиме без их разрушения до предельного износа, что обеспечит

повышение производительности и снижение эксплуатационных затрат при производстве кормовых смесей.

Известно, что основным эксплуатационным требованием, предъявляемым к молоткам, работающих в тяжелых условиях, является требование высокой износостойкости и прочности, которые обеспечиваются служебными свойствами твердых сплавов, уровнем и характером напряженного состояния на рабочих гранях молотков и физико-механическими свойствами, которые и определяют ресурс молотков. При этом от паяного соединения требуется высокая жесткость и прочность при низком уровне напряжений в твердосплавной пластинке.

Анализ и производственный опыт эксплуатации позволяет заключить, что применяемые в настоящее время припой, преимущественно на основе медных сплавов [2, 3, 4 и др.], не удовлетворяют производству рабочих органов машин в горнодобывающей промышленности, кормоперерабатывающем производстве и т.д.

Следовательно, сформулируем основные требования, которым должен удовлетворять FeC-припой в сравнении с известными [1, 5, 120 и др.]. Такими требованиями должны быть следующие:

1. Более высокие механические свойства материала припоя, что обеспечит высокую прочность и жесткость паяного соединения, а, следовательно, ресурс молотков.

2. Достаточная жидкотекучесть и смачиваемость паяемых поверхностей твердого сплава и стали расплавом припоя, сочетаемые со способностью к диффузионному взаимодействию с обоими материалами. Подобное сочетание качества материала припоя следует считать особенно ценным, так как позволяет сгладить резкий перепад напряжений на границе «твердый сплав – FeC-припой» при одновременном «залечивании» поверхностных микродефектов (концентраторов напряжений, имеющих место в исходном состоянии, которые могут возникнуть в процессе пайки).

3. Меньшее различие по коэффициенту теплового линейного расширения (КТЛР) между материалом припоя и соединяемыми материалами – твердым сплавом и сталью, что обеспечивало бы низкий уровень напряжений.

4. Способность материала припоя к релаксационным процессам в паяном шве в результате, например, внутрифазовых превращений при кристаллизации и изменении температуры, регулируемое протекание которых позволило бы влиять на конечную структуру и механические свойства материала припоя, а, следовательно, и на свойства паяного соединения в целом.

5. Температурный интервал технологического процесса пайки должен соответствовать температуре структурно-фазовых превращений конструкционного материала, т.е. термическое воздействие при пайке не должно отрицательно воздействовать на прочностные свойства твердого сплава и материала молотка.

6. Технологический процесс производства упрочненных молотков твердыми сплавами должен быть достаточно гибким, преемственным действующим технологическим процессам, не содержать дополнительных операций, усложняющих и удорожающих их производство.

7. FeC-припой должен содержать минимальное количество дефицитных и дорогостоящих элементов.

Названным требованиям в определенной мере удовлетворяют железоуглеродистые сплавы (FeC-сплавы), содержащие более 2,14% углерода и относящиеся к чугунам. Эти сплавы широко используются в различных отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов, являясь более дешевыми в производстве, имеют значительно более высокие механические свойства.

Припои на основе FeC-сплава позволяют получать паяное соединение с высокой жесткостью и прочностью, соответствующей или превосходящей жесткость и прочность материала молотка – стали, то есть значительно более высокие по сравнению с традиционными припоями на основе меди.

Фактором, определяющим эффективность применения FeC-припоев, является их высокая активность взаимодействия по отношению к стали и компонентам твердых сплавов. FeC-припой из-за этого обладает хорошей смачиваемостью по отношению к металлам связки и карбидам твердых сплавов. Известно [76, 101], что железо в жидкой фазе полностью смачивает кристаллы

WC, которые являются основой большинства твердых сплавов, краевой угол смачивания θ° равен нулю, а также достаточно хорошо смачивает карбиды других элементов (TiC, NbC, NiC и др.), входящих в состав твердых сплавов. FeC-припой характеризуется полной смачиваемостью металлов связки (Co, Ni, Mo) и образует с ними, как правило, непрерывный ряд растворов [55]. Медные припои при этом взаимодействуют только со связкой [69], в системе WC-Cu смачиваемость и растворимость весьма ограничены, а в системе (TiC-WC)-Cu смачиваемость и растворимость отсутствуют, чем и объясняется плохая паяемость твердых сплавов с пониженным содержанием Co и безвольфрамовых твердых сплавов.

Следовательно, при пайке FeC-припоем будет иметь место активный объемно-диффузионный характер взаимодействия FeC-припоя со сталью и твердым сплавом [50, 92, 101]. Данное обстоятельство обеспечивает хорошую паяемость FeC-припоями различных твердых сплавов, в частности ВК8 [12].

Основными проблемами, сдерживающими применение FeC-сплавов в качестве припоев для производства упрочненных молотков твердыми сплавами, являются вопросы несогласованности паяного соединения на границе «твердый сплав – FeC-припой», а также их более высокая температура плавления (1200°C), способствующая, как утверждают некоторые исследователи [68, 87, 88, 186], перегреву и снижению физико-механических свойств твердых сплавов.

Однако эти трудности вполне преодолимы, что было подтверждено опытом литейных технологий производства твердосплавных изделий [7, 77, 99, 189] и паяных инструментов на основе FeC-припоя [6, 92]. В связи с этим данные вопросы требуют дополнительного теоретического рассмотрения и экспериментального подтверждения, применительно к комбинированному упрочнению твердосплавными пластинками молотков зернодробиллок с применением FeC-припоя.

2.4. Обоснование структурного состава материала паяного шва молотка

На основании рассмотренных выше требований, предъявляемых к свойствам паяного соединения твердосплавной пластинки и молотка, следует обосновать

структурное состояние материала шва, паяного выбранным FeC-припоем.

Ранее было установлено, что в микроструктуре паяного шва необходимо наличие фазы, выделяющейся с увеличением объема материала FeC-припоя – графита, выделение которого можно рассматривать как процесс, ответственный за релаксацию напряжений. Данная фаза сама по себе обладает малой прочностью на растяжение, (таблица 2.3), но находясь в изолированных микрообъемах матрицы, хорошо выдерживает сжимающие нагрузки. Строение его слоистое, он легко расщепляется по плоскостям спайности на отдельные слои-чешуйки из-за большого расстояния между слоями и малой связи между ними. Поэтому можно предполагать, что графит является микроподатливым материалом, способным сдвигаться под действием нагрузки и не препятствовать упругости металлической основы материала. Наличие графита в металлической матрице делает ее нечувствительной к концентраторам напряжений. Графитовые выделения могут иметь различные очертания, в данных условиях наиболее вероятно пластинчатое строение в виде интеркристаллитных, соединяющихся друг с другом субмикротрещин. [28, 29, 165]

Таблица 2.3 – Физико-механические свойства структурных составляющих FeC-сплавов

Структурные составляющие	Условное обозначение	Возможное кол-во структурных элементов, %	Удельный объём фазы, см ³ /моль	Коэф-т линейного расширения (20...100°C), $\alpha \times 10^{-6}$	Твёрдость, НВ	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
Жидкая фаза	Ж	0...100	-	-	-	-	-
Аустенит	А	-	25,48	18...19	2000	-	40...60
Феррит	Ф	10...90	21,27	12,5	1100 ... 1300	360...450	15...25
Перлит	П	-	22,6	10...11	1500 ... 2500	800...1000	15...20

1	2	3	4	5	6	7	8
Графит	Г	0...20	5,33	II базису 6,6...8,0 I базису 26	30... 50	-	0
Цементит	Ц	0...80	23,4	6,0...6,5	6000 ... 9000	30-50	0
Мартенсит	М	-	-	11,5	6500 ... 7500	-	-
Спец. карбиды	-	0...80	-	-	-	-	-

Неблагоприятным следует считать крупнопластинчатые выделения графита – значительно снижающие механическую прочность материала паяного шва. Опыт литейных технологий [77] и паяных FeC-припоями [6, 92] подтверждает необходимость наличия в материале соединения твердого сплава и основы молотка структурно-свободного углерода, содержание которого при благоприятной микроструктуре составляет 5...8% поля микрошлифа.

Микроструктура металлической матрицы паяного шва может быть обоснована на основании физико-механических свойств структурных составляющих FeC-сплавов. Следует отметить, что данные, приводимые в таблице 2.3, носят только ориентировочный характер и во многом ограничиваются данными для узкого температурного интервала (20...100°C), полные сведения довольно ограничены и разнородны. Однако, несмотря на отсутствие таких подробных данных, позволяют с некоторой степенью приближения обосновать структурное состояние материала паяного шва.

Так, например, если сформировать паяный шов с преобладающей аустенитной структурой, чему способствует легирование FeC-сплавов, следует ожидать высоких опасных сжимающих напряжений при достаточной прочности. Графитизация при этом будет затруднена, а аустенит имеет КТЛР в 4...4,5 раза

выше, чем у твёрдых сплавов.

Перлитная матрица хотя и будет прочной, но образование трещин не исключено при неразвитой графитизации или крупнодисперстной структуре. Жесткость при этом ниже, чем у цементитной структуры.

Ферритная основа является технологически маловероятной паяного шва. Такая основа не обеспечит релаксацию остаточных паяных напряжений (ОПН) и имеет малую прочность.

Цементитная основа – хотя и имеет ТКЛР близкий к твердым сплавам (в интервале низких температур), является альтернативой графитизированной и практически исключает релаксацию ОПН. Одновременно цементит обладает высокой твердостью и отсутствием пластичности. Практика показала, что цементитная структура (ледебуритная) является наиболее неблагоприятной и однозначно создает недопустимо высокие сжимающие напряжения, приводящие к при подошвенным трещинам в твердосплавной пластинке.

Руководствуясь приведенными соображениями можно установить, что высоконадежное паяное соединение, характеризуемое низким уровнем остаточных паянных напряжений (ОПН) при достаточно высокой прочности, будет обеспечивать графито-перлитно-цементитная структура материала FeC-припоя с развитыми диффузионными зонами на границах «твердый сплав – FeC-припой» и «FeC-припой – сталь». В таком состоянии цементит обеспечивает жесткость, перлит – прочность и вязкость, а выделения графита компенсируют напряжения между структурными составляющими внутри материала FeC-припоя и твердым сплавом. Диффузионная зона на границе «твердый сплав – FeC-припой» будет способствовать перераспределению граничных напряжений и созданию прочной малонапряженной границы раздела, диффузионная зона на границе «FeC-припой – сталь» обеспечит упрочнение и повышение жесткости подложки твердосплавной пластинки.

2.5. Условия образования структуры шва, паяного FeC-припоем

В предыдущем разделе было установлено, что соединение, образованное FeC-припоем, будет удовлетворять эксплуатационным требованиям для рабочих органов

зернодробилок молоткового типа при условии диффузионного взаимодействия FeC-припоя с паяемыми материалами «твердый сплав – сталь» и формирования графито-перлито-цементитной (Г-П-Ц) микроструктуры материала шва.

Несмотря на имеющиеся в литературе сведения о применении для изготовления твердосплавных изделий с применением FeC-припоев [6, 50, 92], исследования структурообразования таких соединений в литературе практически отсутствуют. В связи с этим необходимо рассмотреть структурообразование FeC-припоя в условиях формирования паяного шва, основываясь на современных представлениях о структурообразовании FeC-сплавов с учетом условий образования паяного шва «твердый сплав – FeC-припой – сталь».

Известно, что направление структурообразования FeC-припоя, который по своему составу близок к FeC-сплавам с содержанием 3,0...4,5 % углерода, носит инвариантный характер, то есть при кристаллизации может формироваться микроструктура, как содержащая структурно-свободный углерод (серые чугуны), так и содержащая весь углерод в связанном виде – цементитная (белые чугуны), а также половинчатая, содержащая графит и цементит одновременно.

Процесс упрочнения молотков методом пайки твердосплавных пластинок с применением FeC-припоя достаточно близок к процессам, имеющим место в чугунолитейном производстве [119], и многое из того, что накоплено практикой и исследованиями по управлению структурой и свойствами отливок весьма полезно использовать при разработке состава припоя и самой технологии пайки.

Структура FeC-припоя в отливках зависит в первую очередь от химического состава и скорости кристаллизации, это следует учитывать в структурообразовании при процессе пайки твердых сплавов, но с некоторыми ограничениями.

1. Использование малого объема расплава FeC-припоя (по сравнению с массой расплава, заливаемого в литейную форму), в результате чего не следует сравнивать условия затвердевания и в первую очередь скорость охлаждения. В литейном производстве отливки обычно остывают в естественных условиях (на спокойном воздухе), то есть довольно медленно, что обеспечивает достаточно

полное протекание диффузионных процессов и получение соответствующей равновесной структуры. При технологическом процессе пайки пластин на молотке такие режимы охлаждения неприемлемы из технологических соображений. Хотя охлаждение и происходит на воздухе, но идет оно с более высокой скоростью (10...20 °C/c), что необходимо учитывать с точки зрения обеспечения требуемой структуры паяного шва.

2. При взаимодействии FeC-припоя с твердым сплавом и сталью из-за взаимодиффузионных процессов происходит изменение состава FeC-припоя. В результате состав материала шва будет отличаться от исходного. При этом, диффузионные процессы на границе FeC-припоя с твердым сплавом и со сталью протекают по-разному: в твердый сплав диффундирует преимущественно железо, а в сталь – углерод, причем скорость процессов различна, что скажется не только на структурообразование этих зон, но и на величину этих зон в материале паяного шва.

3. Высокая скорость нагрева FeC-припоя до температуры пайки. Для индукционной пайки скорость нагрева ограничена материалом твердого сплава (10...100 °C/c) и максимальной температурой пайки (не более 1200°C) [9]. В результате наличия указанных ограничений становится возможным, при отставании диффузионных процессов некоторое наследование затвердевающим припоем его исходной структуры, например, частичное сохранение в расплаве FeC-припоя остатков графитовых включений. С точки зрения литейного производства скорость нагрева значения не имеет, при этом расплав некоторое время выдерживают перед заливкой для обеспечения равномерности по составу и температуре. Температура нагрева при литье является технологическим параметром и назначается исходя из времени, необходимого для заполнения формы, превышение этой температуры считается перегревом и обычно приводит к отбелу поверхности отливки. При пайке твердосплавных пластинок на молотке FeC-припоем под перегревом следует понимать существенное (более 30...50° C) превышение температуры плавления FeC-припоя, так как это повлияет на развитие диффузионных зон и скорость охлаждения паяного соединения, увеличивая склонность к переохлаждению, что затрудняет получение

микроструктуры с достаточно развитой графитизацией.

4. Структурообразование паяного шва сопровождается одновременным внешним воздействием напряжений, которые возникают вследствие рассогласованного изменения размеров паяемых элементов при охлаждении. При этом неизбежны возникающие растягивающие напряжения в припое, которые очевидно окажут существенное влияние, как на структурообразование, так и на диффузионные процессы на границах «твердый сплав – FeC-припой» и «FeC-припой – сталь».

Следовательно, в связи с достаточно ограниченными технологическими режимами пайки твердосплавных пластинок на молотке FeC-припоем, наиболее важным фактором, гарантирующим свойства паяного соединения, является состав припоя, таким составом обладает FeC-припой, разработанный коллективом Инженерного института Новосибирского ГАУ [118].

2.6. Обоснование структурно-фазовых превращений в паяном соединении

Влияние термического воздействия при нагреве паяемых элементов до температуры пайки FeC-припоем следует рассмотреть применительно к конкретным технологическим условиям пайки. Так, если рассматривать широко распространенный в промышленности способ получения паяных твердосплавных изделий нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) (скорость нагрева 10...100°C/с), то кратковременность процесса несмотря на более высокую температуру плавления FeC-припоя, не может оказать существенного влияния на прочностные свойства твердых сплавов за недостаточностью времени на протекание нежелательных в этом отношении структурных изменений, носящих диффузионную природу. Немаловажным обстоятельством является то, что при высокочастотном нагреве структурные превращения в сталях и твердых сплавах происходят при температуре на 50...100°C выше, чем при медленном нагреве.

Температура нагрева под пайку FeC-припоем, при соответствующем их составе, составляет 1140...1200°C, с учетом возможного технологического

перегрева при пайке (30...50°C) относительно температуры начала плавления FeC-припоя ($\approx 1147^\circ\text{C}$) [87]. Влияние данных температур на структурное состояние паяемых элементов может быть обосновано анализом диаграммы состояния системы твердых сплавов, входящих в их состав (WC-Co) [54].

Наиболее вероятным отрицательным фактором, который может иметь место при нагреве твердых сплавов при пайке, является вероятность выгорания или перераспределения углерода – образования ζ – фазы. При этом образуется двойной карбид вольфрама и кобальта ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), с содержанием углерода в 2 раза меньше, чем в монокарбиде. Обезуглероживание твердого сплава приводит к уменьшению количества металлического кобальта, уходящего в $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, что сопровождается охрупчиванием и снижением механической прочности твердосплавных пластинок.

Данная проблема, применительно к пайке, может быть решена в достаточной степени рядом технологических мероприятий. В частности, в настоящее время для высокотемпературной пайки твердых сплавов разработаны и применяются флюсы [156] с интервалом активности свыше 1200°C , что в достаточной мере обеспечит защиту нагретых паяемых элементов от выгорания углерода. Определяющим фактором, оправдывающим применение FeC-припоя, является то, что данный сплав при соответствующем его составе имеет положительный градиент активности углерода по отношению к твердым сплавам. Следовательно, это обстоятельство обеспечит благоприятное диффузионное перераспределение углерода между припоем и твердым сплавом, таким образом можно сделать вывод, что при высокочастотном нагреве до температуры пайки FeC-припоем 1200°C в твердом сплаве не должно происходить существенных структурных превращений, приводящих к снижению их прочностных свойств.

В результате высокотемпературного воздействия в процессе пайки изделий [87, 101], твердый сплав приобретает склонность к снижению износостойкости. Для установления влияния высокотемпературного нагрева твердых сплавов на установке ТВЧ были проведены исследования микроструктуры и физико-механических свойств твердого сплава марки ВК8 до и после нагрева,

обладающего высокой ударной вязкостью. Нагрев осуществляли до температуры 1200°C со скоростью, допустимой для данной марки пластинки, выдержка составляла 25...30с, охлаждение проводилось на воздухе (10...22°C/с).

Металлографическими исследованиями в травленном и нетравленном состояниях [86] установлено отсутствие существенных изменений структурного состояния α , β , и γ – фазы. Выявлено незначительное перераспределение пористости и включений графита в сторону их более равномерного распределения и измельчения при сохранении их суммарного объемного содержания. Наличие в микроструктуре твердых сплавов ζ – фазы ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) проявляются при выдержке более 5...12 мин при температуре 1200°C и при нагреве свыше 1260°C в течении 15...25с. Микротвердость сплава после нагрева, изменяется незначительно как в сторону уменьшения для ВК8 на 1,5...5 % [87].

Результаты лабораторных испытаний показывают, что температура пайки, соответствующая температуре плавления FeC-припоя, не оказывает существенного отрицательного воздействия на прочностные свойства твердого сплава. Аналогичные результаты были подтверждены и реализованы в рекомендациях по упрочняющей термической обработке твердых сплавов [38]. Уменьшение прочности твердого сплава после нагрева может быть связано с градиентом температур при быстром нагреве и охлаждении. Применительно к технологическому процессу пайки эти напряжения вполне устранимы соблюдением технологических ограничений скорости нагрева и охлаждения, а также последующей термической операцией отпуска или старения.

Температурное воздействие на сталь при пайке FeC-припоем не может вызвать отрицательных последствий, так как практически соответствует температурному интервалу обработки давлением этих материалов, при этом речь идет о кратковременном местном нагреве ТВЧ с применением защитных флюсов.

Положительным фактором тугоплавкости FeC-припоя следует считать то, что повышение температуры плавления ведет к резкому увеличению адгезии и диффузии с материалами паяемых элементов при хорошей растекаемости и смачиваемости. Это обуславливается достаточной энергией активации паяемых

материалов, так как считается, что термодинамическая активность элементов становится существенно заметной только при $T = 2/3T_{пл.}$ относительно температуры плавления основных компонентов. При этом более тугоплавкий FeC-припой будет в большей степени сохранять свои прочностные характеристики при повышенных эксплуатационных температурах [38].

Рассмотренные обстоятельства позволяют заключить, что рекомендации, связанные с ограничением температуры плавления FeC-припоев (950...1100°C) связаны с отелным воздействием на рабочий орган как на соединение разнородных материалов. В результате охлаждения в паяном соединении разнородных материалов неизбежно возникнут напряжения, которые будут тем больше, чем выше температура кристаллизации припоя. Следовательно, для создания качественного паяного соединения необходимо разработать и исследовать механизм релаксации ОПН в соединении твердого сплава и стали, образованном посредством FeC-припоя.

Напряжения, возникающие в паяном соединении, классифицируются как напряжения первого рода и определяются как величиной разности сокращения линейных размеров твердого сплава, FeC-припоя и стали, так и характером изменений этой разности от температуры и зависимостью механических свойств этих материалов в рассматриваемом интервале температур. Было рассмотрено, что в результате термического воздействия нагрева и охлаждения твердых сплавов в интервале температур пайки FeC-припоем, в них не происходит структурных превращений, сопровождающихся изменением объема. Изменение линейных размеров пластинки происходит практически по линейному закону [87, 101] и характеризуется ТКЛР. Следовательно, при пайке ОПН образуются из-за различия ТКЛР твердого сплава, FeC-припоя и стали, и в результате структурно-фазовых превращений в стальной подложке и припое (если он обладает таковым свойством), ТКЛР стали носит нелинейный характер и возрастает с повышением температуры, имея характерный скачок при эвтектоидных превращениях в FeC-сплавах.

Уменьшение ОПН в паяном соединении будет иметь место при выравнивании КТЛР материалов твердосплавной пластинки, FeC-припоя и стали.

КТЛР твердого сплава и стали соответствует их физико-механическим свойствам, выбор которых определяется эксплуатационными и стоимостными факторами.

FeC-сплавы имеют ТКЛР в 1,5...2,0 раза ниже, чем Cu-сплавы. Следовательно, соединение на границе «твердый сплав – FeC-припой» следует считать более согласованным, чем в соединении «твердый сплав – Cu-припой». Соединение на границе «FeC-припой – сталь» будет носить характер практически согласованного соединения, а «Cu-припой – сталь» – несогласованного.

Разработка паяных соединений с твердосплавными пластинками с использованием высокопрочного FeC-припоя обусловила иной подход к проблеме релаксации ОПН. Так, разность в изменении размеров твердого сплава и подложки может быть компенсирована структурно-фазовыми превращениями в материале самого FeC-припоя. Известно, что около эвтектические FeC-сплавы (чугуны) имеют возможность структурообразования, осуществляемого по двум направлениям: с уменьшением объема; с увеличением объема при затвердевании и последующем охлаждении.

Применительно к релаксационным процессам в соединении, образованном FeC-припоем, определяющим следует считать выделение графита при затвердевании и, особенно, в твердом состоянии. Графитизация, проходящая по механизму образования из жидкого расплава графита и аустенита ($J \rightarrow \Gamma + A$), на релаксационные процессы непосредственно не влияет, хотя в значительной мере определяет направление структурообразования и способствует графитизации на последующих стадиях.

Таким образом, процесс графитизации, даже при повышенной температуре плавления FeC-припоя и его высокой прочности, позволит обеспечить оптимальный уровень ОПН в элементах паяного соединения молотка, если в процессе структурообразования материала FeC-припоя в его металлической матрице выделится 1,5...2% структурно-свободного углерода, что является естественной компенсацией изменения размеров материалов стали, FeC-припоя и твердого сплава.

Кроме того, на границах взаимодействия «FeC-припой – твердый сплав» и «FeC-припой – сталь» возникает напряженное состояние вследствие высокой

фазовой неоднородности и различной природы взаимодействующих элементов (напряжения 2 рода). При этом, если паяное соединение основано на адгезионном взаимодействии, то имеет место плосконапряженное состояние, концентрирующееся по границе раздела. По нашему мнению, существенная роль данного вида напряженного состояния подтверждается характером разрушения паяных соединений с твердосплавными пластинками, образованных Си-припоями при срезе: поверхность разрушения, как правило, проходит по границе раздела частично затрагивая приграничные микрообъемы твердого сплава и припоя, усугубляясь присутствием в зоне взаимодействия интерметаллидов.

FeC-припой в рассматриваемом аспекте имеет существенное преимущество. Как было установлено выше, соединение, образованное FeC-припоем, характеризуется взаимодействием с образованием объемных диффузионных зон (фронтов) на границах «FeC-припой – твердый сплав» и «припой – сталь». FeC-припой, при соответствующем его составе, имея положительный градиент активности углерода по отношению к стали, упрочняет опорную зону подложки паяного шва за счет науглераживания. Ранее было установлено, что соединение «FeC-припой – сталь» является практически согласованным, в связи, с чем влияние данной зоны на релаксационные процессы считаем допустимым подробно не рассматривать.

Таким образом, структурно-фазовые превращения в материале FeC-припоя, сопровождаемые выделением графита в совокупности с образованием зон диффузионного взаимодействия FeC-припоя с паяемыми материалами обеспечит релаксацию напряжений, их благоприятное распределение в паяном соединении твердосплавной пластинки и основы молотка, образованного высокопрочным припоем. При проведении экспериментальных исследований необходимо установить влияние состава структуры – количества структурно-свободного углерода и фронта зоны диффузионного взаимодействия на напряжения и их влияние на эксплуатационные показатели паяных изделий с твердосплавными пластинками и рабочих органов сельскохозяйственных машин, в том числе молотков зернодробилок.

2.7 Структурообразование паяного шва и обоснование технологических режимов пайки упрочненного молотка

Процесс формирования паяного соединения, происходящий при пайке твердосплавной пластинки и основы молотка, который определяет структурообразование, состоит из ряда последовательных этапов:

- нагрев паяемого узла до температуры плавления;
- взаимодействие расплава FeC-припоя, флюса с паяемыми элементами, сопровождаемое диффузионными процессами;
- формирование паяного шва в период затвердевания и охлаждение в верхнем интервале температур;
- охлаждение в нижнем интервале температур.

Названные этапы, хотя и в разной степени, определяют основные закономерности, характеризующие направление физико-химических процессов структурообразования, во многом схожи с аналогичными закономерностями литейного производства и могут быть рассмотрены с этих позиций с учетом особенностей, определенных в подразделе 2.4.

Вопросы структурообразования FeC-сплавов, как и FeC-припоев в частности, достаточно схожи и многообразны. Все многообразие структурно-фазовых превращений в FeC-сплавах при нагреве и охлаждении описывается общеизвестной совмещенной (стабильной и метастабильной) диаграммой состояния этих сплавов, которая уже давно считается общепризнанной и широко используется в производстве. Исходя из условий формирования паяного шва, наиболее ответственным является процесс графитизации материала шва, обеспечивающий релаксацию напряжений в паяном соединении при пайке, эксплуатационных нагревах изделий, при этом в шве вероятно образование цементита, который выступает при структурообразовании как самостоятельный компонент, конкурирующий графиту (это и является причиной упомянутой сдвоенности диаграммы состояния FeC-сплавов).

Исследованию графитизации FeC-сплавов посвящено огромное количество работ. Важность непрекращающихся исследований вытекает из того, что в

литейном производстве был и остается центральным вопросом о перераспределении углерода в структуре сплава между металлической основой и графитом, так как это в основном и определяет свойства данных материалов. Еще в 1957 году Д.П. Иванов [67] констатировал противоречивость теоретических взглядов на процесс графитизации и отсутствие единого мнения ни по одному из его этапов. Подобное положение сохраняется и до настоящего времени, о чем свидетельствуют многочисленные обзоры, периодически рассматривающие и классифицирующие различные теории графитизации FeC-сплавов, описываемые как отечественными, так и зарубежными авторами [96, 114, 165 и др.]. В связи с этим рассмотрим некоторые, на наш взгляд определяющие структурообразование FeC-припоя, положения, вытекающие из ранее рассмотренных особенностей условий структурообразования паяного шва.

Теоретически и экспериментально доказано, что в расплавленном состоянии сплавы являются неоднородными и имеют микрообъемы, называемые «кластерами», которые близки по составу и строению к фазам, имеющимся в твердом состоянии. Так, рентгенографическими методами в расплавах чугуна выявлены микрообъемы, близкие по строению к аустениту, цементиту и графиту, которые сохранялись после начала кристаллизации – в жидко-твердом состоянии [105]. На основании этого в настоящее время разрабатываются основы теории жидко-твердого состояния FeC-сплавов и описывается существование экспериментально установленных высокотемпературных разновидностей углерода - карбида, который можно рассматривать как «предграфит» или «предцементит» [35, 80].

Исходя из высказанных положений можно заключить, что структурообразование шва, паяного FeC-припоем в определенной мере будет управляемым при ограниченной температуре нагрева под пайку в исходном строении FeC-припоя, имеющем в своей микроструктуре крупное пластинчатое строение графита. В связи с этим целесообразно при выплавке FeC-припоя иметь пластинчатое строение графита с ферритной или ферритно-перлитной металлической матрицей, микроструктура исходного FeC-припоя приведена на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7. – Микроструктура FeC-припоя ($\times 250$)

Важными моментами в формировании структуры шва являются: диффузионные процессы взаимодействия FeC-припоя со сталью и твердым сплавом, приводящие к изменению состава сопрягающихся микрообъемов, причем их характер во взаимодействии со сталью и твердым сплавом различен; возникновение отрицательного давления (растягивающих напряжений) при процессах структурообразования при затвердевании и последующем охлаждении паяного шва.

С целью качественного выявления влияния диффузионных процессов и растягивающих напряжений на структурообразование шва, полученного при использовании FeC-припоя, нами были проведены предварительные эксперименты. Исследование проводилось индукционной пайкой FeC-припоем образцов – пластин из различных материалов, отличающихся по температурному коэффициенту линейного расширения и характером диффузионного взаимодействия с FeC-припоем. Пластинки из стали и твердых сплавов имели одинаковые геометрические параметры, соответствующие стандартным твердосплавным пластинкам. При пайке обеспечивалось получение шва $h_{п} = 0,5 \dots 0,8$ мм. Условия пайки образцов во всех случаях были одинаковыми ($V_{н} = 30 \dots 40$ °C/с, $t = 1140 \dots 1190$ °C, $\tau_{в} = 5 \dots 7$ с), охлаждение проводилось на спокойном воздухе ($10 \dots 20$ °C/с) и после затвердевания (1100°C) в воде.

На рисунке 2.8 приведены фотографии микроструктур экспериментальных спаев. Как видно из снимков, в структуре FeC-припоя имеются существенные

различия. В спае «твердый сплав – FeC-припой – твердый сплав» формируется Г+П+Ц микроструктура, которая, как было установлено ранее, гарантирует качественное состояние паяного шва (рисунок 2.8, а). При этом данное направление структурообразования обеспечивается на первой стадии кристаллизации, хотя при охлаждении в воде (рисунок 2.8, г) и наблюдается образование некоторого количества цементита (ледебуритной эвтектики). Диффузионное расслоение материала шва при этом незначительно.

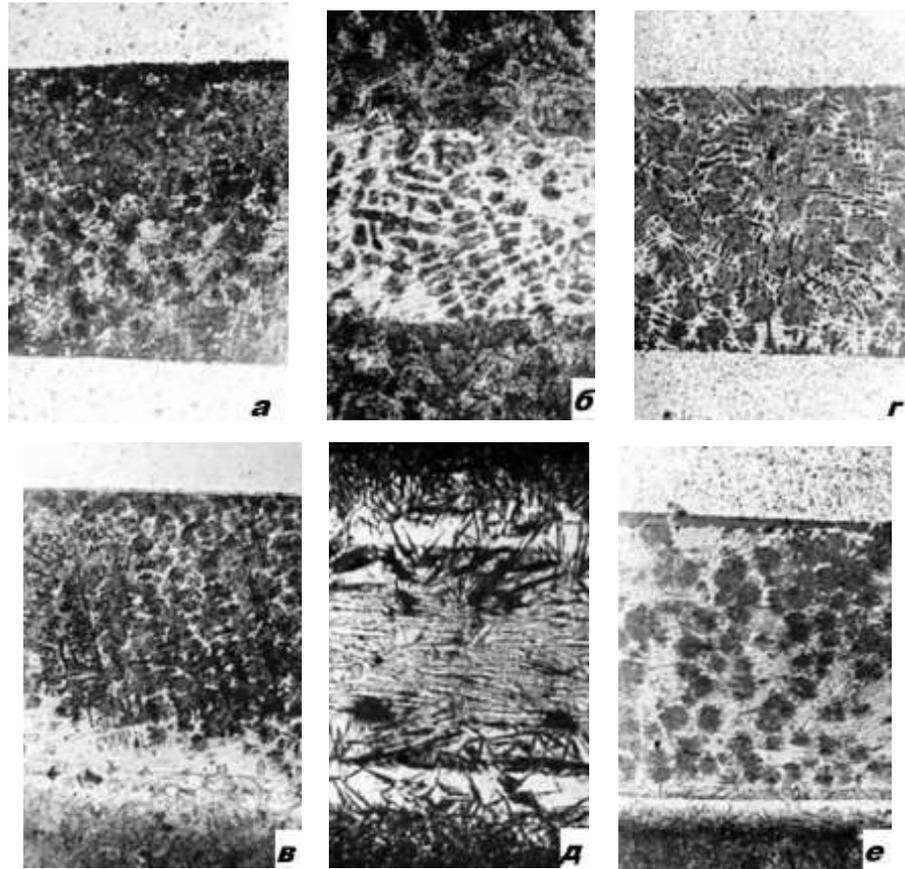


Рисунок 2.8. – Микроструктура паяных соединений образцов, ($\times 100$):

а, г – «VK8 – FeC-припой – VK8»; б, д – «сталь – FeC-припой – сталь»; в, е – «VK8 – FeC-припой – сталь»; а, б, в – охлаждение на воздухе; г, д, е – охлаждение с $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в воде

Паяный шов «сталь – FeC-припой – сталь» имеет совершенно иную микроструктуру (рисунок 2.8, б). Микроструктура такого шва состоит из перлита и ледебурита, то есть соответствует доэвтектическому состоянию материала FeC-припоя, что является следствием значительного изменения состава исходного FeC-припоя – уменьшения содержания углерода, который диффундировал в

сталь. При охлаждении в воде в припое и диффузионных зонах наблюдаются мартенситные превращения, ледебурит преимущественно ориентируется параллельно спаю (рисунок 2.8, д).

Паяный шов «твердый сплав – FeC-припой – сталь» (рисунок 2.7, в, е) является комбинированным – содержит конкурирующие зоны, соответствующие ранее рассмотренным соединениям. В таких соединениях шов состоит из графита (Г) + перлита (П) + цементита (Ц) в области, примыкающей к твердому сплаву и Ц+П в соединении со сталью.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили качественно установить влияние факторов диффузии и инициирующее влияние растягивающих напряжений на структурообразование (графитизацию), которое до настоящего времени с подобной позиции не рассматривалось, хотя в литературе и есть сведения о влиянии напряжений на структурообразование FeC-сплавов.

При формировании паяного соединения FeC-припоя и твердого сплава, как указывалось ранее, возникают растягивающие напряжения (отрицательные давления), влияние которых в этом отношении мало исследовано. Тем не менее, по имеющимся сведениям, логично предположить противоположное воздействие на процессы структурообразования FeC-припоя растягивающих напряжений.

Исходя из вышеизложенного и принимая во внимание условия затвердевания FeC-припоя, при которых структурообразование соединения в шве стали с твердым сплавом происходит под действием растягивающих напряжений, можно сделать вывод об обратном воздействии этих напряжений на процессы структурообразования FeC-припоя. В данном случае следует ожидать повышения устойчивости графита по сравнению с аустенитом, а, следовательно, и с цементитом, что должно привести в конце затвердевания FeC-припоя к формированию аустенито-графитного ледебурита ($L = A+Г$). В дальнейшем, при охлаждении в верхнем интервале температур, релаксация напряжений в паяном соединении будет осуществляться по механизму развития интеркристаллитных субмикротрещин, увеличивающих первичные выделения графита, а присутствие меди делает процесс необратимым. При эвтектоидных превращениях ледебурит

под воздействием рассмотренных условий рекристаллизуется в перлитографитную мелкодисперсную эвтектику. В результате конечная микроструктура (Г+П+Ц) будет соответствовать структуре, гарантирующей качественное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой».

Данные предположения и подтверждаются результатами ранее рассмотренных экспериментов, при которых в материале шва «твердый сплав – FeC-припой» формируется графито-перлито-цементитная микроструктура.

Кроме того, известно влияние напряжений на диффузионные процессы. Так из работы [145] следует, что даже при нормальном давлении процесс диффузии не может осуществляться без сопутствующей деформации кристаллической решетки сплава, которая изменяет энергетическое состояние атомов в решетке и состояние всего кристалла в целом и ведет к изменению условий диффузионного перемещения атомов в решетке, то есть положительное давление замедляет диффузионные процессы.

Применительно к паяному соединению «твердый сплав – FeC-припой – сталь» следует ожидать обратного эффекта – интенсификации диффузных процессов на границах взаимодействия FeC-припоя с соединяемыми материалами. Так, FeC-припой, при соответствующем его составе, имея положительный градиент активности углерода по отношению к стали, упрочняет опорную зону подложки паяного шва за счет науглераживания, т.е. на границе «FeC-припой – сталь» будет ускоряться диффузия углерода в материал молотка. А формирование фронта диффузии на границе «твердый сплав – FeC-припой» будет определяться рядом процессов: диффузия железа в твердый сплав и образование с металлами связки (Co) непрерывного ряда растворов – увеличение объемного содержания металла связки, этот процесс следует считать ведущим; смачивание и частичное растворение материалом расплава FeC-припоя поверхностных слоев карбидов. Диффузионное перераспределение элементов, входящих в состав взаимодействующих материалов приведет к неизбежному расслоению FeC-припоя по составу, а, следовательно, к изменению структуры в соответствующих микрообъемах шва.

Таким образом, существует тесная взаимосвязь между материалами твердого сплава, FeC-припоя и стали, образующими паяное соединение, их размерами, составом и свойствами, которыми регламентируется технологический процесс изготовления паяного соединения твердосплавной пластинки и основы молотка, предусматривающей индукционный нагрев.

Исходя из этого, для качественного паяного соединения молотка и твердосплавной пластинки, обеспечивающего релаксацию напряжений при высокой прочности, необходимо соблюдение определенных технологических режимов при выполнении каждого из технологических этапов пайки.

1-й этап – нагрев паяемого узла до расплавления FeC-припоя. Технологическими параметрами данного этапа являются скорость (V_n) и температура (t_n) нагрева.

При этом максимальная скорость нагрева в первую очередь ограничена максимальной допустимой скоростью нагрева твердосплавных пластинок соответствующего типоразмера и марки сплава ($10...100^\circ\text{C}/\text{с}$); во-вторых температурой нагрева – перегревом, обусловленным отставанием диффузионно-фазовых превращений при нагреве ТВЧ, температура пайки при этом ограничена 1200°C (включая возможный перенагрев $30...50^\circ\text{C}$), гарантирующей (в соответствии с разделом 2.3) стабильные прочностные свойства твердых сплавов.

Минимальная скорость нагрева назначается исходя из производительности пайки, а также сохранения некоторой структурной наследственности – сохранения графитовых зародышей, при этом целесообразно в составе исходного материала FeC-припоя крупнопластинчатое строение графита, микроструктура исходного FeC-припоя приведена на микрофотографиях рисунок 2.7.

2-й этап – выдержка спая в температурном интервале, в котором расплав FeC-припоя взаимодействует с твердым сплавом и сталью. Технологическим режимом является время выдержки (τ_b), которую целесообразно оценивать, как время нахождения материала FeC-припоя в расплавленном состоянии.

Назначение τ_b определяется развитием фронтов зон диффузионного взаимодействия на границах «твердый сплав – FeC-припой» и «FeC-припой –

сталь», причем очевидно, скорость развития процессов различна; расслоением по составу зон материала FeC-припоя – определяющее направление последующего структурообразования.

Определяющим следует считать развитие диффузной зоны на границе «твердый сплав – FeC-припой», величина фронта которой должна соответствовать размерам поверхностных микродефектов (концентраторов напряжений), ведущей (с большой скоростью) очевидно, будет диффузия углерода в сталь, упрочняющая опорную зону подложки паяного шва и приводящая к обезуглероживанию материала FeC-припоя и кристаллизации доэвтектической зоны материала FeC-припоя.

Конструктивно-технологическими параметрами при этом будут величина фронта зон диффузионного взаимодействия FeC-припоя с твердым сплавом и сталью, величина зоны эвтектического (графито-перлитно-цементитного) состояния материала FeC-припоя и, следовательно, толщина паяного шва в целом.

3-й этап - охлаждение паяного соединения в верхнем интервале температур, из требований технологичности, производится на спокойном воздухе со скоростью 15...30°C/с. На данном этапе завершаются процессы диффузионного взаимодействия на границах, и происходит окончательное затвердевание FeC-припоя, сопровождаемое выделением графита в его структуре, как при затвердевании, так и твердом состоянии в соответствии с ранее рассмотренным механизмом структурообразования. Это позволит эффективно релаксировать напряжения в шве при создании прочного каркаса раздробленных цементитных выделений в металлической основе, окончательно формирующейся при вторичной кристаллизации. Рекристаллизация, при наличии ведущей фазы графита под воздействием растягивающих напряжений и легирования FeC-припоя медью, из аустенита формируется перлитно-графитная смесь (эвтектика).

4-й этап – охлаждение паяного соединения молотка и твердосплавной пластинки в нижнем интервале температур, при этом оно не сопровождается активными структурнофазовыми превращениями в материалах паяного шва, охлаждение производится на спокойном воздухе и ограничена также допустимой

скоростью нагрева.

Таким образом, соблюдение определенных технологических режимов пайки, получим качественное паяное соединение молотка и твердосплавной пластинки с применением FeC-припоя

2.8. Выводы по главе

Разработана математическая модель позволит прогнозировать наработку молотка по достижению которой наступит его предельный износ.

Для уменьшения износа рабочей кромки молотков зернодробилок предлагается комбинированное упрочнение рабочих кромок молотка твердым сплавом с применением – FeC-припоя, для этого разработана конструкция молотка.

Чтобы получить качественное паянное соединение «твердый сплав – FeC-сталь» при изготовлении молотка, необходимо соблюдать ряд технологических требований. Поэтому при проведении исследований необходимо экспериментально установить:

влияние рассмотренных выше конструктивно-технологических факторов на структурообразование паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь»;

установить влияние структурного состояния паяного шва на качество паяного соединения – уровень напряжений и механическую прочность паяного соединения и молотка в целом.

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу решения поставленных задач заложены экспериментальные и сравнительные методы исследования. Экспериментальные методы использованы при исследованиях структуры состава FeC-припоя, технологических режимов пайки и при разработке методики прогнозирования остаточных напряжений соединений (твердый сплав – FeC-припой – основа молотка) и методики пайки с отсутствием микротрещин. Сравнительные методы использованы при установлении эксплуатационных показателей ресурса молотков, упрочненных и серийных в лабораторных и производственных условиях.

В соответствии с целью и определенными для ее достижения задачами, разработана программа экспериментальных исследований, которая включает следующие этапы:

- выявление закономерностей структурообразования паяных соединений твердого сплава и стали с применением FeC-припоя;
- обоснование структурного состава, рациональных технологических режимов пайки твердого сплава и молотка FeC-припоем, обеспечивающих высокую прочность соединения и релаксацию напряжений;
- установление показателей относительной износостойкости и прочности упрочненного молотка, влияющих на ресурс;
- определение эксплуатационных показателей экспериментальных молотков в сравнении с серийными в производственных условиях..

3.1. Методика пайки молотков зернодробилок FeC-припоем

Для проведения микроструктурных исследований, проведения лабораторных и производственных испытаний рабочих органов, определение механических и эксплуатационных свойств производилось изготовление образцов и партий молотков пайкой ТВЧ (токами высокой частоты). Для проведения лабораторных и производственных испытаний производилась пайка прямоугольных пластинчатых молотков размером 110×50мм и толщиной 6 мм.

Для реализации разрабатываемой технологии упрочнения требовалась предварительная подготовка рабочих кромок молотка. Подготовка паяемых поверхностей заключалась в формировании паза у рабочей кромки молотка для твердосплавной пластинки на горизонтально-фрезерном станке, а также зачистки, удалении заусенцев и макронеровностей. Специальная подготовка не производилась согласно ранее проведенным исследованиям [89].

Предварительный контроль качества твердосплавных пластинок, предназначенных для пайки включал: визуальный осмотр с целью обнаружения сколов, короблений и макротрещин; для образцов, предназначенных для исследования и выборочно из каждой партии осуществлялся макроструктурный и микроструктурный анализ, а также определялась их исходная микротвердость. Твердосплавные пластинки без маркировки и паспорта для производства опытных партий рабочих органов не допускались.

Пайка производилась с использованием индукционного нагрева высокочастотной установкой ЛПЗ-67М. Скорость нагрева варьировалась в пределах оптимизации технологической операции формирования паяного шва с ограничением максимально допустимой скорости нагрева твердого сплава в зависимости от размеров пластинок приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Допустимые скорости нагрева твердосплавных пластинок при пайке, °C/c

Марка сплава	Толщина пластинки, мм		
	до 4,5	от 5 до 7	от 7 до 12
ВК8	100	65	32

Для определения наличия трещин в твердосплавных пластинках до и после пайки осуществлялся контроль методом красок [20]. Контролируемые поверхности очищались от флюса и излишков FeC-припоя, шлифовались и обезжиривались (10...15% раствор каустической соды). После подготовки наносилась красная краска в два слоя с промежуточным просушиванием 1 мин. После полного высыхания краски ее удаляли (30% раствор керосина и 70% трансформаторного масла) и наносили слой белой краски. При наличии трещин

поверхности проявлялись их следы.

При проведении экспериментальных металлографических исследований паяного соединения и твердого сплава осуществлялся контроль параметров: скорость нагрева и охлаждения, температура и время нагрева, выдержки и охлаждения. Контроль времени осуществлялся секундомером, температурный интервал плавления. Контроль времени осуществлялся секундомером, температурный интервал плавления и кристаллизации фиксировался ТЕТРОН-Т1300 и хромель-алюминиевой термопарой с потенциометром ПП-63. Для уменьшения погрешности, связанной с электрическими колебаниями и неравномерностью теплопередачи, производилось фиксирование отчета от температуры 768°C – точка Кюри [72], при этом приборы высокочастотной установки скачкообразно изменяли свои показания.

Учитывая завышенную температуру плавления FeC-припоя, пайка осуществлялась с применением специального флюса [155]. Технология приготовления флюса представлена в таблице 2.

Таблица 3.2 – Технология приготовления флюса

Наименование операции	Технические требования	Оборудование	Примечание
1	2	3	4
Составление смеси на 1кг флюса, кг	Борная кислота-0,36; бура-1,36; фтористый кальций-0,09	Барабан	Равномерно перемешать в течении 20...30 мин
Плавка смеси	Температура 850...900°C, время выдержки 1,5...2 ч	Электропечь	Выдерживать до прекращения пузырения
Выливание и охлаждение	Охладить на воздухе до 50...30°C	Лист	
Дробление, размол		Барабан, ступа	
Просеивание		Сито, размер ячеек 0,15...0,25 мм	Для таблетизированного припоя не более 0,2мм

Оценка активности флюса производилась по технологической пробе растекания FeC-припоя по поверхности твердого сплава. На зачищенную поверхность пластинки ВК8 размером 3×6×8 помещалась пластинка FeC-припоя массой 0,50...0,55 г, затем порошок специального флюса. Пластинка помещалась в индуктор и нагревалась до расплавления FeC-припоя (рисунок 3.1). После затвердевания FeC-припоя и охлаждения замерялась площадь смоченной поверхности. При нагреве не допускался перегрев свыше 1200°C, площадь растекания при этом соответствовала не менее 70...80%.



Рисунок 3.1 – Оборудование для пайки упрочненных молотков

Нагрев осуществлялся в соответствующих типоразмеру молотков индукторах. Скорость, равномерность и температура нагрева регулировались: подбором размеров и конструкций индуктора; положением паяемого молотка в индукторе; режимами работы генератора и его периодическими отклонением. Пайку образцов с гарантированной толщиной шва осуществляли в приспособлении обеспечивающим, требуемый зазор паяемого соединения.

Последовательность переходов при осуществлении технологического процесса пайки упрочненных молотков твердым сплавом:

1. Уложить пластинку FeC-припоя на паяемую поверхность молотка, предварительно офлюсованную.

2. Засыпать тонким слоем флюса и уложить твердосплавную пластинку в гнездо, при необходимости закрепив ее асбестовым шнуром.

3. Засыпать поверхность пластинки флюсом.

4. Установить молоток в индуктор.

5. Включив нагрев, довести FeC-припой до расплавления (скорость нагрева устанавливается по таблице 3.1) и обеспечить соответствующую выдержку, не допуская перегрева (свыше 1200°C) паяемых элементов.

6. Отключив установку, обеспечить затвердевание металла шва (3...5с).

7. Произвести охлаждение молотка в среде, обеспечивающей требуемую скорость, если требуется техпроцессом, соответствующую технологическую операцию отпуска.

Скорость охлаждения варьировалась в пределах 0,1...200°C/с, для чего охлаждение производилось в печи, на воздухе, графитовой крупке, песке, масле, воде.

3.2. Методика микроструктурных исследований FeC-припоя, твердого сплава и паяного соединения

Для проведения металлографических исследований и определения механических свойств изготавливались микрошлифы образцов молотка с упрочненной рабочей кромкой (рисунок 3.2). Микроструктуру FeC-припоя исследовали в исходном состоянии и паяном соединении. Для изучения исходной структуры отрезали темплет от серединной части отливки, на котором готовился шлиф. При изучении микроструктуры зоны паяного соединения изготавливались поперечные и продольные микрошлифы паяных образцов и реальных рабочих органов. Приготовление шлифов осуществлялось по известной методике [144], включающей: вырезка темплета, шлифование, полировку и травление. Микроструктуры исследовались до и после травления. Травление шлифов проводилось известными реактивами (5...6% раствор азотной кислоты в этиловом спирте), для выявления микроструктуры твердых сплавов применялись травители, установленные ГОСТ 9391-80.

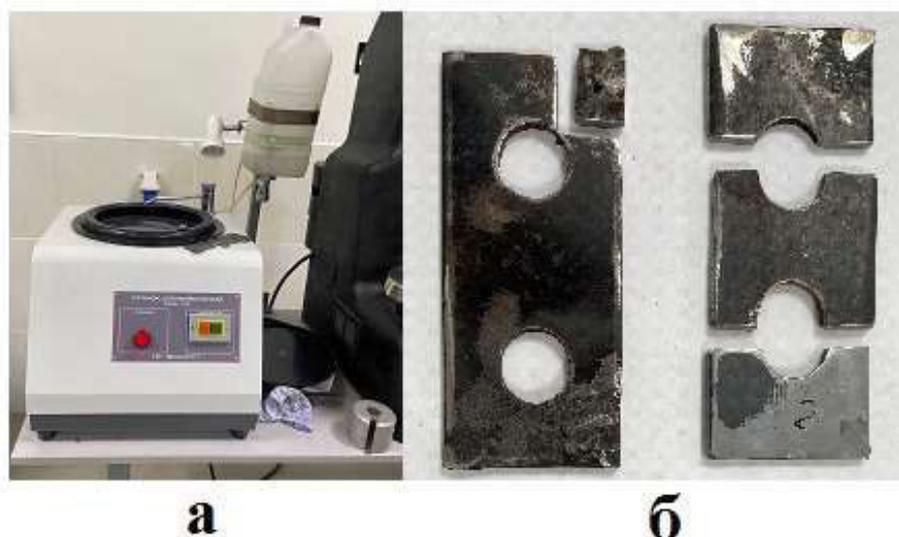


Рисунок 3.2 – Подготовка микрошлифа молотка:

а – установка для шлифования LPA-1A; б – темплет молотка

Исследования микроструктуры осуществлялось на металлографических микроскопах МИМ-7, ВМ-1 при увеличении 100...1350раз (рисунок 3.3). Для определения увеличения при измерениях отдельных элементов структуры использовались окуляр-микрометры с ценой деления 1×10^{-5} м.

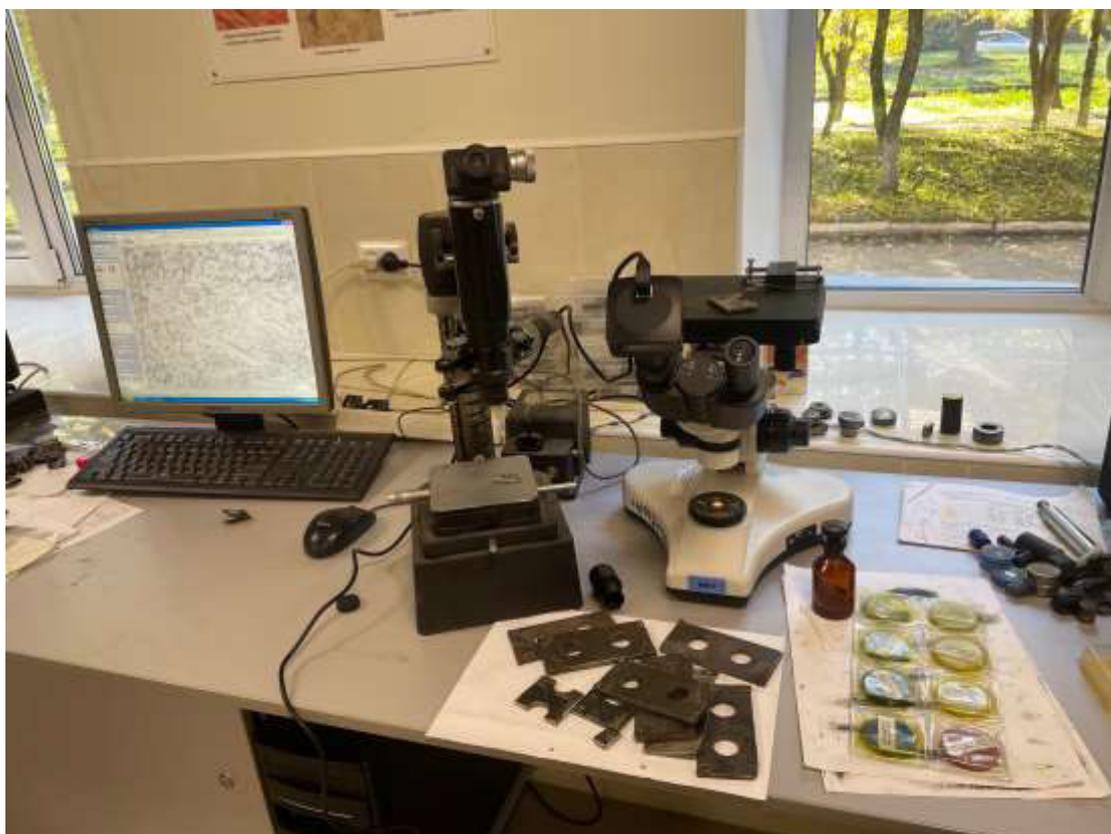


Рисунок 3.3 – Микроструктурное исследование микрошлифа под микроскопом ВМ-1
Количественный анализ микроструктуры проводился линейными методами

[144] способом неподвижного шлифа. Количественный анализ микроструктуры твердых сплавов проводили с использованием автоматического линейного анализатора «Эпиквант» при увеличении $\times 500$. Также количественный анализ диффузии химических элементов из твердого сплава, в FeC-припой и в материал молотка производился на электронном микроскопе PhenomX при увеличении 100...10000раз (рисунок 3.4 и приложение А).

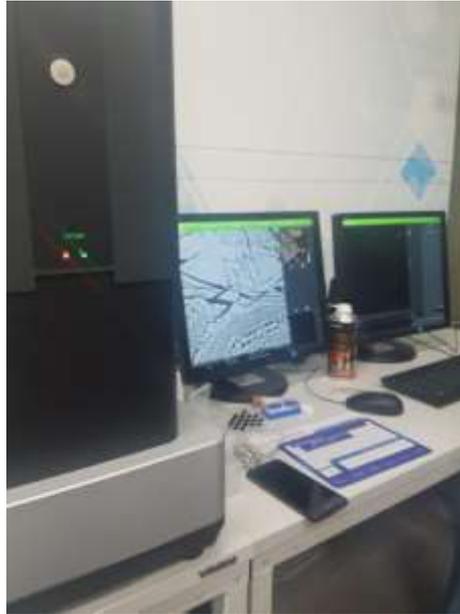


Рисунок 3.4 – Микроструктурное исследование микрошлифа под микроскопом PhenomX

Исследование микроструктурных изменений в твердом сплаве, имеющим место после нагрева их до температуры пайки FeC-припоем проводили для сплава марки ВК8. Для работы использовали шестигранные пластинки ГОСТ19047-80, которые исследовались в соответствии с ГОСТ 9391-80 до и после термического воздействия и имитаций процесса пайки FeC-припоем (нагрев до $t_{п} = 1200^{\circ}\text{C}$, выдержка до 30с при температуре пайки, охлаждение на воздухе с последующим отпуском при $t = 200...250^{\circ}\text{C}$ в течение 3...6 часов).

Упрочнение молотков основано также на диффузионном науглероживании слоев основы молотка, лежащих ниже твердосплавной пластинки, на достаточный уровень толщиной 5...6мм, это позволяет создать прочную диффузионную прослойку. Таким образом науглероживаемые слои основы молотка будут подвергаться меньшему износу.

3.3. Методика определения физико-механических свойств паяного соединения

Эксплуатационная стойкость и ресурс упрочненных рабочих органов зернодробилок, в значительной мере определяется физико-механическими свойствами зоны упрочнения.

Задачи экспериментальных исследований по определению физико-механических свойств соединений «твердый сплав – FeС-припой – основа молотка» заключались:

- определение физико-механических свойств паяного соединения;
- установление влияния технологических режимов пайки и конструктивных параметров соединений на прочностные характеристики молотков.

Определение микротвердости элементов упрочненного молотка проводилось на приборах DuraScan и ПТМ-3. Количество отпечатков на каждом образце и значения твердости принималось в соответствии с ГОСТ9450-76. Погрешность измерения диагоналей составила $\pm 3\%$. (рисунок 3.6 и приложение Б).



Рисунок 3.6 – Определение микротвердости твердомером DuraScan

Термическое расширение FeС-припоя изучали с помощью фоторегистрирующего дилатометра системы Шевернара. Определение термического расширения материала проводилось для интервала температур 20...60°C, т.е. имеющих место в материале FeС-припоя паяного соединения при эксплуатации молотка. Коэффициент линейного расширения определяли для

образцов FeC-припоя в литом состоянии, имеющих микроструктурное строение, имитирующее структурное состояние материала паяного шва.

Определения механической прочности паяного соединения «твердого сплава – сталь», и соединения «сталь – FeC-припой» предусматривало испытания на износостойкость и ударно-усталостную прочность по известным методикам [5, 19].

Методика определения механической прочности паяного соединения твердого сплава и стали молотка предусматривала испытания на статический срез. Испытаниям подвергали образцы с напайками сплавом ВК8. Исследования проводили на образцах при нормальной температуре ($\sim 20^\circ\text{C}$) и эксплуатационных температурах в интервале варьирования до 600°C с шагом 200°C . Для экспериментального установления оптимальной толщины паяного шва подвергали разрушению образцы с толщиной шва $0,05\dots 1,5$ мм. Интервал варьирования установлен исходя из предварительных экспериментов, наиболее вероятных при формировании паяного соединения.

Разрушающее напряжение определяли по формуле [155]:

$$\tau_{cp} = \frac{P_p}{F_c}, \text{ МПа} \quad (3.1)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, Н;

F_c – площадь паяного соединения, мм^2 .

Для установления влияния переменных факторов на прочность паяного соединения твердого сплава и стали использовалась конструкция образцов [155]. Для изготовления образцов паяных соединений твердого сплава и стали использовали твердосплавные пластинки по ГОСТ25395-90, формы 01, 02 из твердого сплава ВК8, молоток из стали Ст3.

Испытание образцов на срез осуществлялось на машине ИМ430-ЦНИТМАШ при комнатной температуре, а также предварительно нагретых образцов, отклонение температуры испытаний не превышало 10°C . Температура испытаний фиксировалась установкой в образцах хромель-алюминовой термопары, тип используемого потенциометра ПП-63. В процессе испытаний фиксировали фактическую разрушающую нагрузку, прилагаемую со скоростью

1...6 мм/мин, параметры измерялись с точностью до 0,2 мм.

В соответствии с положениями, рассмотренными в главе 2 ресурс молотка зависят от уровня ОПН (остаточных паяных напряжений). Величина и характер ОПН являются следствием конструктивных и технологических факторов. Определение остаточных паяных напряжений производилось способом, предусматривающим измерение стрелы прогиба твердосплавной пластинки и подложки. Деформации измеряли инструментальным микроскопом УИМ21 на образцах после пайки и последующего разделения подложки и пластинки электро-химической обработкой, при этом не допускалась температура нагрева образцов более 100...150°C.

Напряжения рассчитывали по формулам [82]:

$$\sigma_{опн}(\sigma'_{опн})_1 = A \left[E_1 h_1 \pm \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{3h_1(h_1 + h_2)} \right] \quad (3.2);$$

$$\sigma_{опн}(\sigma'_{опн})_2 = A \left[E_2 h_2 \pm \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{3h_2(h_1 + h_2)} \right] \quad (3.3)$$

где индекс 1 – для твердого сплава;

индекс 2 – для стали;

$\sigma'_{опн}$ – слой, прилегающий к паяному шву,

$\sigma_{опн}$ – наружный слой;

E_1, E_2 – модуль упругости твердого сплава и стали соответственно, МПа;

h_1, h_2 – высота пластинки и подложки соответственно, м;

$$A = (f_n - f_{ост}) / l^2 \quad (3.4);$$

где f_n – стрела прогиба твердосплавной пластинки после пайки, м;

$f_{ост}$ – то же после разделения, м;

l – половина длины образцов, м.

Знак «минус» относится к наружным слоям, «плюс» – к слоям, примыкающим к паяному шву.

3.4. Методика оценки износа рабочих органов молотковых зернодробилок

Опыт эксплуатации рабочих органов зернодробилок молоткового типа показывает, что в процессе работы молотки подвергаются интенсивному

изнашиванию. Как правило, простая прямоугольная первоначальная форма молотков при изнашивании изменяется, так что прямой угол в активной зоне взаимодействия с массой закругляется по кривой поверхности, близкой к параболической (рисунок 3.7). Предельным износом рабочей грани считается износ до главной оси симметрии молотка. Дальнейшая его эксплуатация возможна после перестановки молотка на оси ротора новой рабочей гранью в сторону измельчаемого продукта.

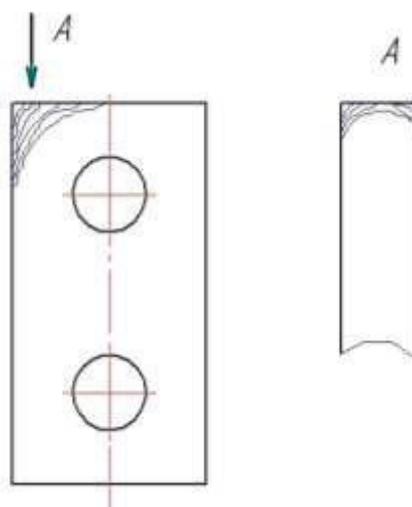


Рисунок 3.7 – Характер износа молотков

В качестве предмета исследований использовали прямоугольные молотки толщиной мм, изготовленные из стали 65Г с закалкой ТВЧ до твердости HRC50...55 и упрочненные молотки твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя. При подготовке молотков к исследованию определялись твердость на твердомере HR-150А и масса каждого из них – взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,05г.

Подготовленные к исследованиям партии молотков (упрочненных и серийных) устанавливались на зернодробилку КДУ-2 по принятой схеме (серийный и упрочненный молотки работают друг за другом) (рисунок 3.8). Установленное решето имело диаметр отверстий 4 мм. Замеры проводились после измельчения одной рабочей гранью следующего количества зерно смесей – каждые 100.



Рисунок 3.8 – Прибор для определения площади износа по профильным кривым износа молотков

Изменение профилей молотков оценивалось графоаналитическим методом путём построения профильных кривых для серийных и упрочненных молотков (рисунок 2.2 и 3.8). Для определения площади изношенного профиля молотков и для подсчета изношенных участков графоаналитическим методом применялся электронный планиметр Plantx, точность измерений которого составляет 0,2%. Площадь изношенного угла определяется, путем отметки точки на замкнутом участке угла профиля изношенного молотка, с которой начинают и заканчивают обвод с помощью линзы планиметра и получают результат на мониторе прибора.

3.5. Методика производственных испытаний упрочненных молотков

Производственные испытания производились сравнительным методом, для чего испытанию подвергались серийные молотки (сталь 65Г с закалкой кромок ТВЧ) и молотки упрочненные по разрабатываемой технологии. Все молотки предварительно подвергались визуальному и весовому контролю (отклонение по массе не более 5...8г). Выборочно 5...10% от партии подвергалось металлографическому контролю.

Все исследуемые молотки маркировались набивкой цифр в зоне наименьшего износа (зона между подвесными отверстиями).

Молотки испытывались при дроблении зерновых материалов (пшеница, рожь, ячмень, кукуруза) с влажностью не более 13% и содержанием примесей минерального происхождения не более 3...5% на зернодробилки КДУ-2 (рисунок 3.9).

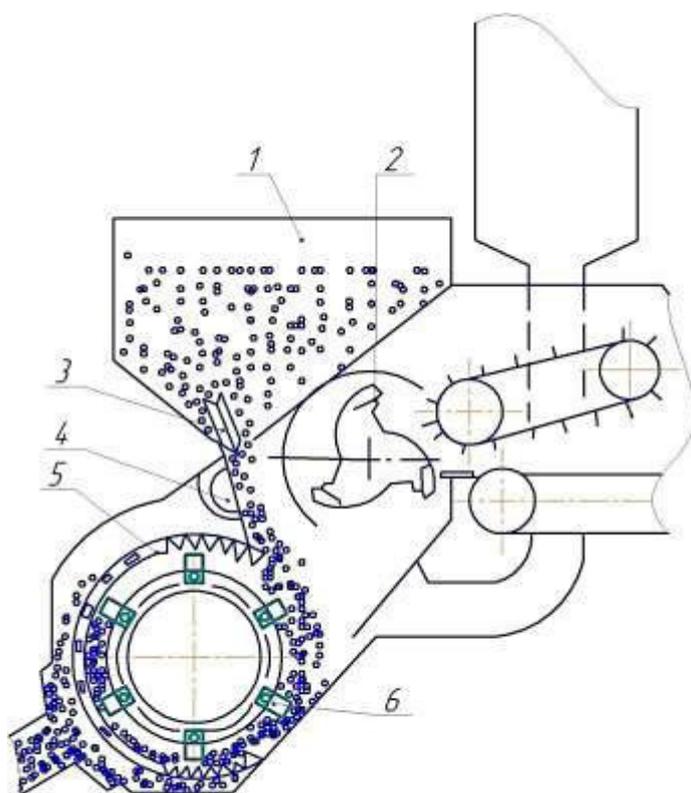


Рисунок 3.9 – Экспериментальная зернодробилка КДУ-2:

1 – приемный бункер; 2 – ножевой барабан; 3- заслонка; 4- магнитный сепаратор; 5 – решето; 6 – упрочненные молотки

Результаты производственных испытаний обрабатывались методом математической статистики [43, 49] и теории надежности. При испытаниях оценивались:

- ресурс – суммарная стойкость рабочего органа;
- износостойкость – изменение профилей молотка;
- энергоемкость – удельная энергоемкость процесса дробления;
- производительность;
- качество получаемого продукта.

В качестве относительного показателя эксплуатационного ресурса молотков в нормируемых условиях обработки принят коэффициент эксплуатационной прочности (способность работать без поломок) [82]:

$$K_{эн} = 1 - \frac{N_1}{N} - \frac{\sum_{i=1}^{N_2} (t - m)}{N(n - m)}, \quad (3.6)$$

где N – число изготовленных молотков, шт.;

N_1 – количество брака при изготовлении, шт.;

N_2 – количество выведенного из строя из-за поломки, шт.;

n – лимитирующий размер пластинки до поломки, мм.;

m – остаточная величина лимитирующего размера пластинки при амортизации, мм.;

t – остаточная величина лимитирующего размера пластинки при поломке, мм.

Качество изготовленных молотков оценивалось по соответствию точности размеров, шероховатости, допускаемым отклонениям формы и взаимного расположения поверхностей техническим требованиям, а также изменением микротвердости обработанной поверхности.

3.6. Определение необходимого количества наблюдений и оценка точности результатов экспериментов

Определение необходимого количества наблюдений, а также по возможности управления точностью и разбросом экспериментальных данных принимали разное значение относительной ошибки, коэффициента вариации, доверительной вероятности этих данных, следовательно, и количества наблюдений при испытаниях молотков коромдробильных машин на надежность и ресурс, как в лабораторных, так и производственных условиях.

При этом значения названных величин принимали [43, 49]:

относительной ошибки $t = 0,1 \dots 0,2$

коэффициента вариации $V = 0,2 \dots 0,5$

доверительной вероятности $0,8 \dots 0,95$.

Такие значения названных величин позволили повторить опыт не менее 3 раз при малой относительной ошибке (0,1) и разбросе (0,2), при максимально возможных значениях ошибки (0,2), высокой доверительной вероятности испытаний (0,95), разбросе (0,5) и минимально возможной вероятности ресурсных

испытаний (0,8).

Все лабораторные испытания проводили по плану NUN, при котором испытания молотков проводили до проявления исследуемого показателя: предельный износ, разрушение или отделение пластинки. Производственные испытания молотков проводили по планам NUN и NRT [171].

Оценка точности результатов испытаний и проверка их соответствия теоретическим данным проводилась в соответствии с рекомендациями [43, 139, 146, 148].

Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Стьюдента. Для этого определяли среднее значение результатов величины опыта:

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3.7)$$

где X_i – результат каждого испытания по исследуемому показателю (например, прочность паяного соединения, разрушающая нагрузка, наработка и т.д.);

n – число испытаний образцов.

Отклонение максимального (или минимального) результата от среднего, среднеквадратическое отклонение результатов испытаний каждого опыта:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{cp})^2 + (x_2 - x_{cp})^2 + \dots + (x_n - x_{cp})^2}{n}} \quad (3.8)$$

- коэффициент вариации результатов испытаний каждого опыта:

$$V = \sigma / X_{cp} \quad (3.9)$$

- проверку результатов и исключение выпадающих значений проводили исходя из неравенства:

$$X_i \leq X_{cp} \pm 3\sigma \quad (3.10)$$

где $X_{cp} + 3\sigma = X_g$ – верхняя доверительная граница результатов испытаний;

$X_{cp} - 3\sigma = X_n$ – нижняя граница, которые определяют относительную ошибку:

$$\delta = X_g - X_{cp} / X_{cp} \quad (3.11)$$

Проверка соответствия результатов испытаний теоретическим данным, используя критерий Стьюдента:

$$X_{cp} - X_{cp} \leq 3\sigma, \quad (3.12)$$

где X_{cp} – средняя величина исследуемого показателя, определяемая по

установленной теоретической, эмпирической или графической зависимости;

3σ – среднее значение коэффициента доверительной вероятности принято $t = 1,42 \dots 4,30$ для принятого количества повторений опыта $n = 3 \dots 5$ и принятого значения доверительной вероятности $0,8 \dots 0,95$.

3.7. Выводы по главе

По проведенным исследованиям можно заключить, что состав FeC-припоя и исследованные конструктивно-технологические параметры и режимы пайки обеспечивают теоретически обоснованное структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь», которое гарантирует релаксацию напряжений при достаточно высокой прочности паяного соединения.

Разработаны программа и методики исследований по:

1. выявлению закономерностей структурообразования паяного соединения твердого сплава и стали;
2. обоснованию структурного состава и рациональных технологических режимов пайки твердого сплава и молотка FeC-припоем, обеспечивающих высокую прочность соединения и релаксацию напряжений;
3. установлению показателей относительной износостойкости и прочности упрочненного молотка;
5. определению сравнительных эксплуатационных показателей молотков, упрочненных и серийных, в производственных условиях.

При проведении экспериментальных исследований также предлагается использовать ряд общих и частных методик.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты металлографических исследований паяного соединения

Для проведения металлографических исследований микроструктуры паяного соединения экспериментальных молотков (рисунок 4.1) изготавливались поперечные и продольные микрошлифы (рисунок 4.2) паяных пробных образцов и реальных упрочненных молотков.



Рисунок 4.1 – Образец молотка с упрочненной рабочей кромкой



Рисунок 4.2 – Микрошлиф упрочненной кромки молотка

Исследования показали, что предложенные решения принципиально изменяют характер износа и существенно повышают ресурс молотков. При упрочнении рабочей кромки твердым сплавом (рисунок 4.3, а), эффект достигается, тем что твердосплавная пластинка установлена в зоне максимальной

скорости и давления, ее угловое расположение обеспечивает малое (2...3 мм) сечение затылочной фаски и защиту твердосплавной пластинки от разрушения при вероятных ударах инородных предметов. Применяемый при этом FeC-припой, обеспечивает высокопрочное диффузионное (рисунок 4.3), соединение твердого сплава с молотком, упрочняет рабочие грани молотка за счет формирования на поверхности слоя 0,2...0,5мм отбеленного чугуна и высокоуглеродистой диффузионной зоны глубиной до 0,5мм на границе взаимодействия молотка и FeC-припоя твердостью HRC48...56.

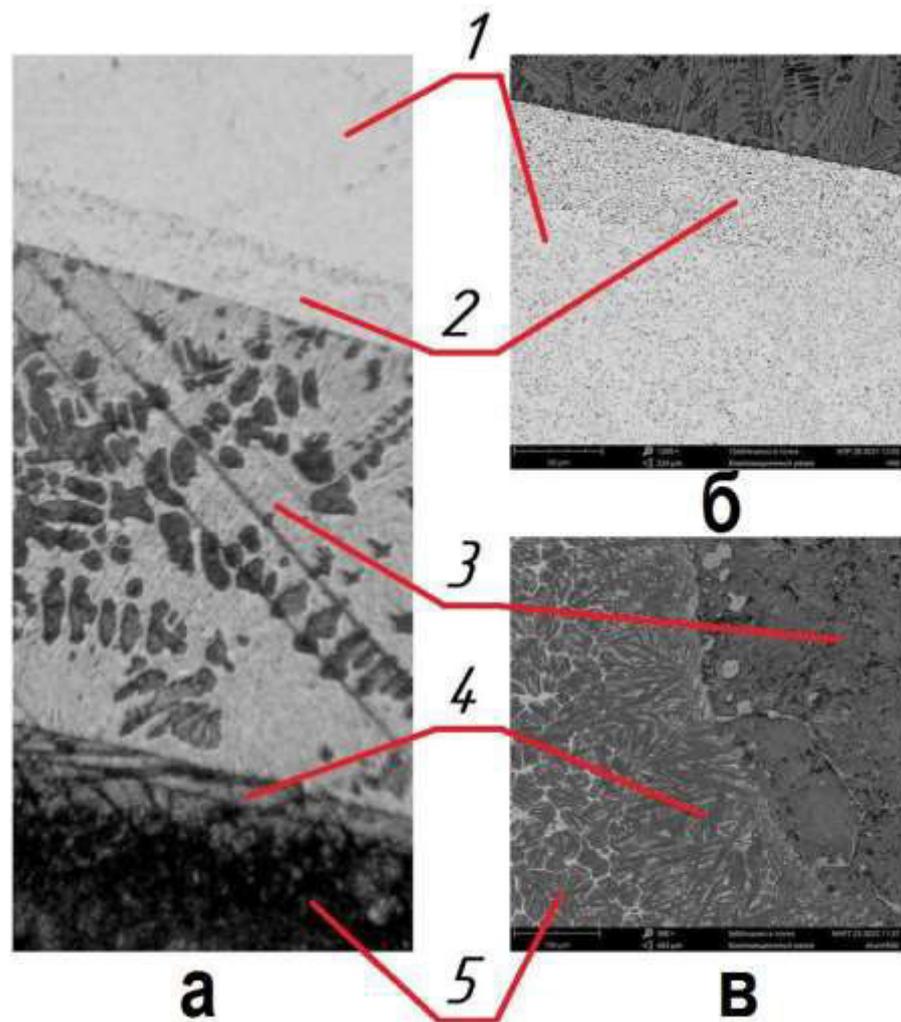


Рисунок 3.4 – Микроструктура упрочненных зон молотков: а – паяное соединение «VK8 – FeC-припой – сталь Ст3», $\times 100$ (микроскоп BM-1); б – диффузионная зона «VK8 – FeC-припой», $\times 1200$ (микроскоп PhenomXL); в – диффузионная зона «FeC-припой – сталь Ст3», $\times 580$ (микроскоп PhenomXL); 1 – твердый сплав VK8; 2 – диффузионная зона «VK8 – FeC-припой»; 3 – FeC-припой; 4 – диффузионная зона «FeC-припой – сталь Ст3»; 5 – сталь Ст3

Упрочнение молотков основано также на диффузионном науглероживании основы молотка при пайке с применением FeC-припоя. В результате формируется ориентированная высокотвердая (HRC56...61) вязкая микроструктура.

Проведенные исследования показали, что используемый при пайке FeC-припой, позволяет получить паяное соединение твердого сплава с материалом молотка достаточно высокой прочности, за счет формирования диффузионных зон (рисунок 4.4), это происходит вследствие того, что в сталь диффундирует углерод из FeC-припоя формируя повышенную прочность в данном соединении, а в твердый сплав диффундирует в железо, это соединение формирует прочную и малонапряженную границу (формируется графитно-перлитно-цементная структура, где графит – компенсирует напряжения, гасит высокочастотные вибрации, перлит – дает прочность и вязкость, цементит – дает жесткость).

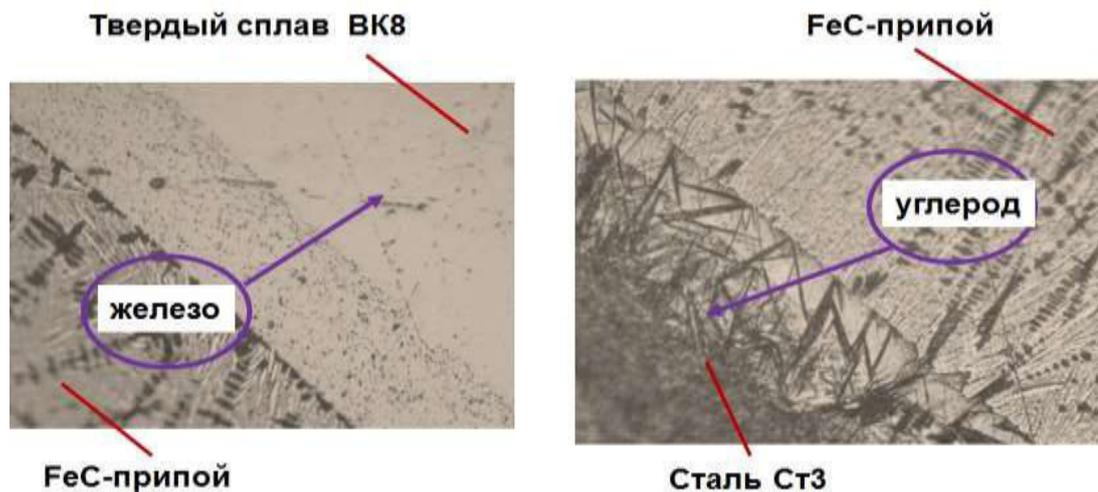


Рисунок 4.4 – Микроструктура диффузионных зон упрочненных молотков: а – диффузионная зона «VK8 – FeC-припой», ($\times 1200$); б – диффузионная зона «FeC-припой – сталь Ст3», ($\times 580$)

Металлографический анализ образцов позволил установить, что взаимодействие «FeC-припой – твердый сплав VK8» обусловлено диффузионным взаимодействием (рисунок 4.5, а), при этом FeC-припой растворяет связку (преимущественно процесс развивается по микронеровностям и дефектам поверхности твердого сплава, смачивает карбиды и частично их растворяет, в результате в микроструктуре граничной зоны присутствуют частично-растворимые карбиды твердого сплава и отдельные вновь образовавшиеся

карбиды.

Строение диффузионных зон «FeC-припой – сталь», показанное на рисунке 4.5, б, показывает, что первоначально диффузия протекает по границам зерен с образованием жидкой фазы в стали и реактивным оплавлением микронеровностей паяемой поверхности стали, а затем принимает характер объемной. На этом этапе скорость диффузии углерода в аустените значительно превышает скорость подплавления основного металла, о чем свидетельствует прогрессивное увеличение фронта диффузии на первом этапе.

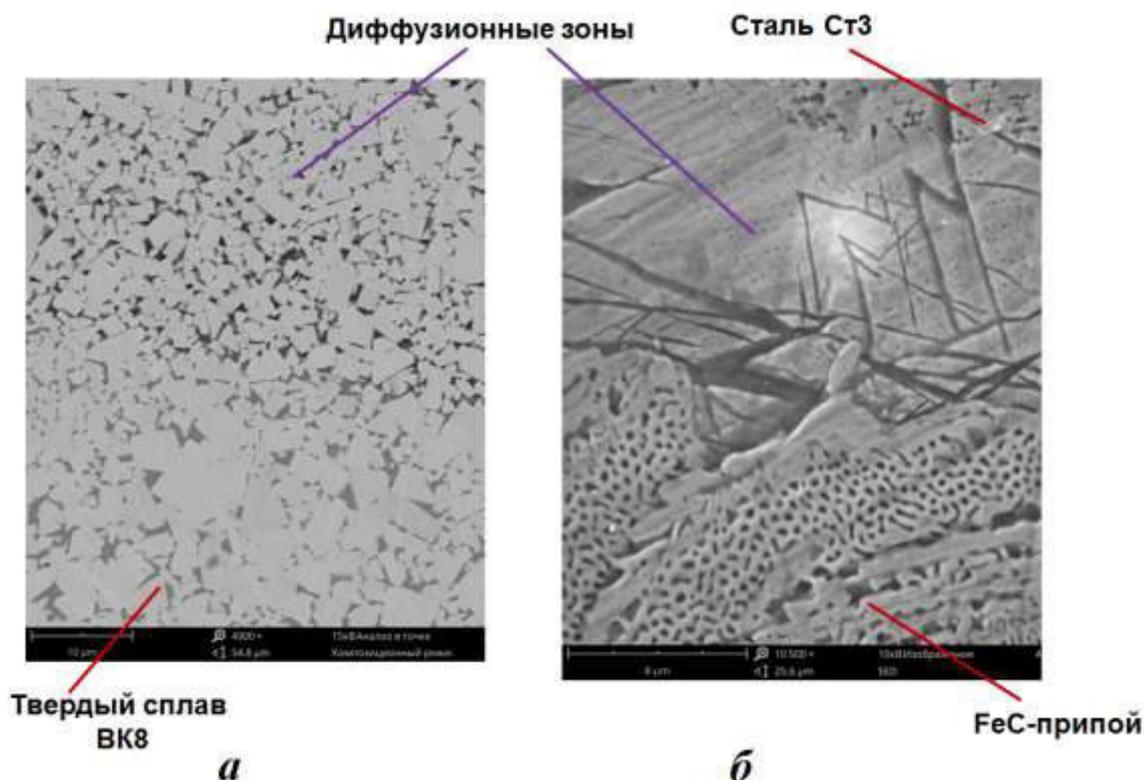


Рисунок 4.5 – Зона диффузионного взаимодействия:

а – твердый сплав ВК8 – FeC-припой; б – FeC-припой – сталь Ст3

Взаимодействие «FeC-припой – твердый сплав» обусловлено двумя диффузионными процессами: объемное диффузионное взаимодействие, при котором формируется фронт диффузии, приводящий к увеличению объемного содержания металлической связки (рисунок 4.6), состоящий из ряда непрерывных твердых растворов металла связки и железа; поверхностное растворно-диффузионное взаимодействие (рисунок 4.7), при этом FeC-припой растворяет связку (преимущественно процесс развивается по микронеровностям и дефектам

поверхности твердого сплава), смачивает карбиды и частично их растворяет, в результате в микроструктуре граничной зоны присутствуют частично-растворимые карбиды твердого сплава и отдельные вновь образовавшиеся карбиды.

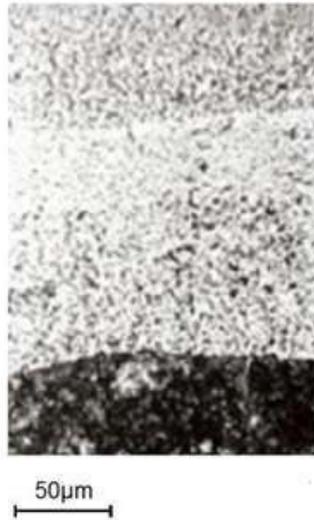


Рисунок 4.6 – Микроструктура зоны диффузионного взаимодействия соединения
VK8 – FeC-припой, $\tau_b = 5$ с ($\times 630$)

Анализ микроструктур позволил установить, что наиболее интенсивно диффузионная зона развивается с момента смачивания расплавом FeC-припоя паяемой поверхности в начальный период взаимодействия ($\tau_b = 5 \dots 10$ с) (рисунок 4.6), затем по мере выравнивания концентрационных градиентов затухает и ведущим становится растворно-диффузионное взаимодействие (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Микроструктура зоны растворно-диффузионного взаимодействия
твердого сплава VK8 и FeC-припоя ($\times 1200$)

Ускорение развития диффузионного фронта может сопровождаться наличием дефектов (пор, микротрещин) в приповерхностном слое твердого сплава. Прирост фронта диффузии после затвердевания шва при охлаждении на воздухе ($10...20^{\circ}\text{C}/\text{c}$) незначительный (не более $0,5...1\%$).

Строение диффузионных зон «FeC-припой – сталь» (рисунок 4.8, а) показывает, что первоначально диффузия протекает по границам зерен с образованием жидкой фазы в стали и реактивным оплавлением микронеровностей паяемой поверхности стали, а затем принимает характер объемной. На этом этапе скорость диффузии углерода в аустените значительно превышает скорость подплавления основного металла, о чем свидетельствует прогрессивное увеличение фронта диффузии на первом этапе. По мере взаимодействия (более 10 с) обедненный углеродом, примыкающий микрообъем FeC-припоя и растворенный микрослой стали при данной температуре начинает кристаллизоваться за счет концентрационного переохлаждения. Диффузионные зоны «FeC-припой – сталь», состоят из мелкопластинчатого перлита и тонкой цементитной сетки (рисунок 4.8, б, в), то есть ее микроструктура соответствует заэвтектоидной стали, плавно переходящей к строению основного металла. Микротвердость зоны, в зависимости от дисперсности структуры, находится в пределах $2290...4130\text{МПа}$.

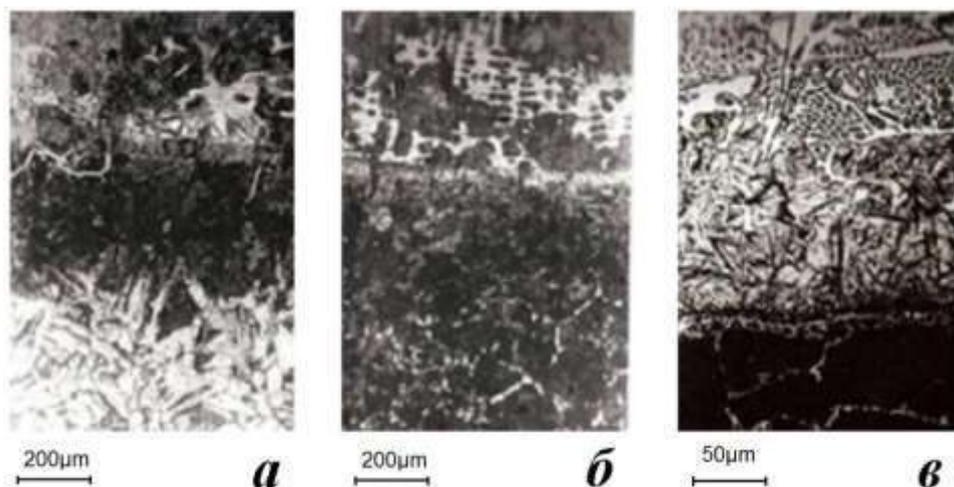


Рисунок 4.8 – Микроструктура зоны диффузионного взаимодействия FeC-припоя и стали: а – соединение FeC-припой – сталь Ст3 ($\times 100$); б – соединение FeC-припой – сталь Ст3 ($\times 100$); в – граничный слой FeC-припой – сталь Ст3 ($\times 100$)

Так как коэффициент диффузии углерода выше коэффициента диффузии других элементов, находящихся во взаимодействии (Si, Cu, Cr, Ni, Co и др.) то на границе сплавления образуется граничный слой легированного аустенита, при охлаждении испытывающего мартенситные превращения. Данное положение дополнительно будет способствовать релаксации напряжений в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь». Кроме того, имея высокую микротвердость, граничная полоска совместно с диффузионной зоной повышает жесткость опорной поверхности твердосплавной пластинки. Исследования показали, что качество паяного соединения гарантируется графитно-перлитно-цементитной микроструктурой материала паяного шва, такое состояние определяется как эвтектическое (графит + перлит + цементит) и формируется в паяном соединении с участием FeC-припоя.

По проведенным металлографическим исследованиям можно сделать вывод, что примененный состав FeC-припоя и исследованные конструктивно-технологические параметры и режимы пайки обеспечивают теоретически обоснованное структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь».

4.2. Результаты исследований зависимости структурообразования от технологических режимов

Экспериментальное исследование структурообразования проводилось применительно к разработанной схеме упрочнения рабочих кромок молотков. Исследование структурообразования в соединениях твердый сплав и сталь проводилось применительно к предлагаемому составу FeC-припоя, позволяющему, как было установлено результатами предварительных экспериментов, формировать графитно-перлитно-цементитную микроструктуру материала паяного шва в соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» в пределах наложенных технологических ограничений.

Конструктивно-технологическими параметрами и режимами, определяющими физические процессы структурообразования паяного

соединения, являются:

- скорость нагрева, $V_n, \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$
- температура пайки, $t \text{ }^\circ\text{C}$;
- время выдержки при температуре пайки, τ_b, c ;
- толщина паяного шва, $h_p, \text{мм}$;
- скорость охлаждения, $V_{\text{охл}} \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$

Экспериментальные исследования влияния технологических режимов на структурообразование проводились варьированием факторов в пределах наложенных технологических ограничений. На основании рассмотренных положений о влиянии технологических режимов на формирование качественного паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» определялось влияние скорости нагрева под пайку на температуру начала плавления FeC-припоя, наличие ваточного графита, структурное состояние металла шва и состояние паяного соединения в целом, результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования состояния паяного соединения от скорости нагрева под пайку

Скорость нагрева, $V_n, \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	Температура начала плавления припоя, $t, \text{ }^\circ\text{C}$	Наличие остаточного графита об. %	Состав структуры (охлаждение на воздухе)	Состояние паяного соединения
5	1147	0...0.2	цементит + перлит	трещины в твердом сплаве
15	1147	0.5...0.8	графит + перлит + цементит	трещины в твердом сплаве
30	1147...1153	0.7...0.9	графит + перлит + цементит	нет трещин в сплаве
60	1147...1174	0.6...1.0	графит + перлит + цементит	нет трещин в сплаве
100	1198...1216	0.3...1.4	графит + перлит + цементит и цементит + перлит	структурная неоднородность, трещины в сплаве

Из результатов микроструктурных исследований следует, что с увеличением скорости нагрева возрастает температура начала плавления FeC-припоя. Причем, температуру плавления FeC-припоя в интервале скоростей нагрева 15...60 °C/с следует считать приемлемой.

По результатам экспериментальных исследований влияния скорости нагрева на структурообразование паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» [13] следует вывод, что, нагрев под пайку молотка с FeC-припоем со скоростью 30...60 °C/с обеспечивает формирование графитно-перлитно-цементитной микроструктуры паяного шва, что укладывается в интервал допустимых скоростей нагрева твердосплавных пластинок.

Температура пайки при высокочастотном нагреве обуславливается температурой плавления исходного FeC-припоя (1147°C) и перенагревом, величина которого, как было рассмотрено в таблице 4.1, зависит от скорости нагрева. При теоретическом обосновании активности применения FeC-припоев было установлено, что температура пайки не должна превышать 1200°C, так как с учетом перенагрева вероятен перегрев твердого сплава, приводящий к структурным изменениям и снижающий их режущие свойства.

Исследование показало, что наиболее важным технологическим фактором, определяющим структурное состояние паяного шва и свойства паяного соединения, является выдержка – время взаимодействия FeC-припоя, находящегося в жидкой фазе, с паяемыми поверхностями твердого сплава и стали. Выдержка определяет степень развития металлургических процессов в материале FeC-припоя, динамику диффузионных процессов и последующего структурообразования паяного соединения. В результате пайки микроструктура исходного FeC-припоя и сопрягающихся с ним объемов стали и твердого сплава претерпевает значительные структурные изменения.

Электронно-микроскопические исследования выявили, что в результате, процесса соединения твердого сплава с основой молотка на FeC-припоя, из твёрдого сплава диффундируют химические элементы W и Co в FeC-припой и

основу молотка, что способствует образованию высокопрочных диффузионных зон (рисунок 4.9 и 4.10).

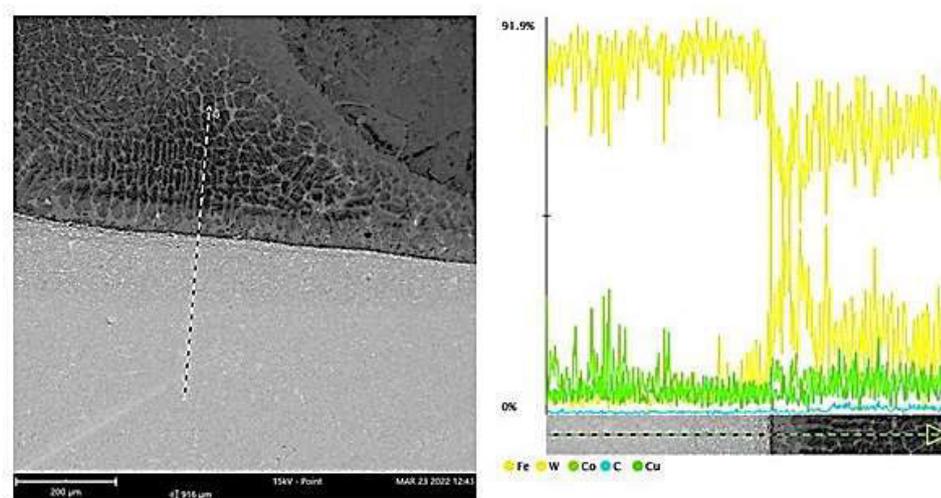


Рисунок 4.9 – Диффузионная зона паяного соединения и распределение химических элементов FeC-припой – твердый сплав ВК8

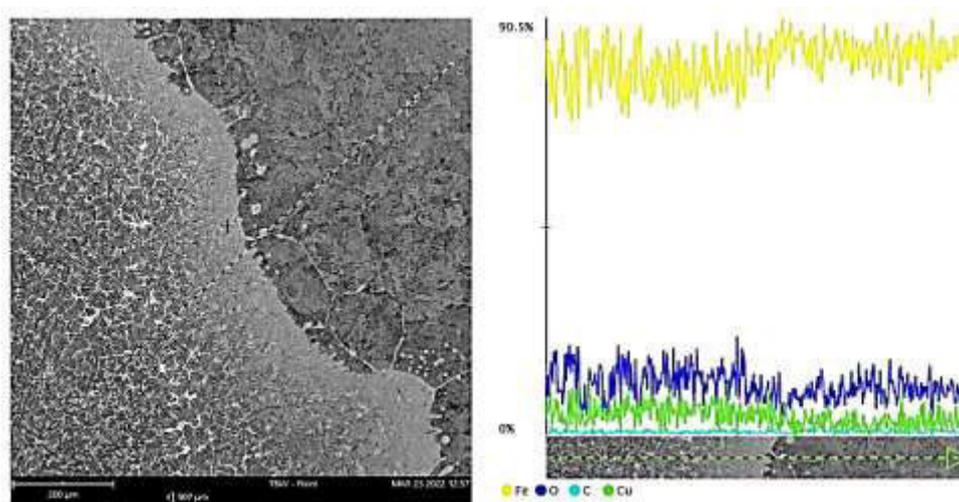


Рисунок 4.10 – Диффузионная зона паяного соединения и распределение химических элементов FeC-припой – сталь Ст3

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния технологических факторов на структурообразование паяных соединений твердых сплавов и сталей от структурного состояния шва позволяют установить режимы пайки молотков твердым сплавом с применением предлагаемого FeC-припоя:

- скорость нагрева под пайку $V_H = 30...40^\circ\text{C}/\text{с}$, но не превышающая допустимую скорость нагрева для соответствующих твердосплавных пластинок;
- температура пайки не более $t = 1140...1190^\circ\text{C}$;
- время выдержки при температуре пайки (FeC-припоя в жидкой фазе) $\tau_B = 5...7 \text{ с}$;

- охлаждение после пайки на воздухе со скоростью $V_{\text{охл}} = 10 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, с последующим отпуском при $t = 200 \dots 250^\circ\text{C}$ в течении 3...6 ч.

Таким образом, предлагаемый состав FeC-припоя и рассматриваемые конструктивно-технологические параметры и режимы пайки обеспечивают структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь», которое гарантирует релаксацию напряжений при достаточно высокой прочности паяного соединения.

4.3. Результаты исследований зависимости свойств паяного соединения от структуры шва

Механические свойства паяного соединения определяют эксплуатационный ресурс упрочненных молотков зернодробилок. Задачей экспериментальных исследований являлось определение механических свойств (твердость и прочность) соединений твердый сплав – FeC-припой – основа молотка.

Определение микротвердости элементов упрочненного молотка проводилось на приборах DuraScan и ПТМ-3 (рисунок 4.11, 4.12 и приложение Б), путем определения микротвердости в точках диффузионных зонах «FeC-припой – сталь Ст3» и «FeC-припой – твердый сплав ВК8».

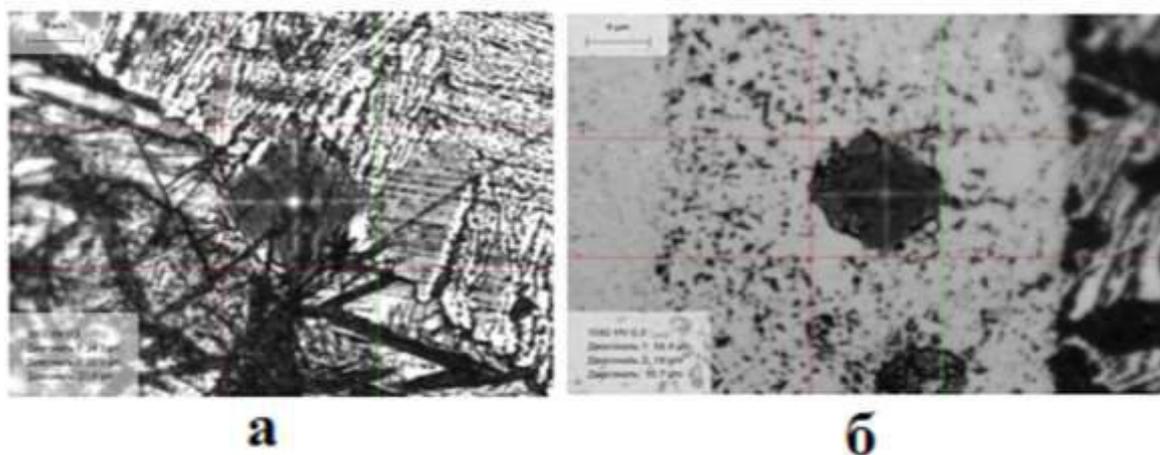


Рисунок 4.11. – Схема измерения микротвердомером DuraScan диффузионных зон:

а – «FeC-припой – сталь Ст3»;

б – «FeC-припой – твердый сплав ВК8»

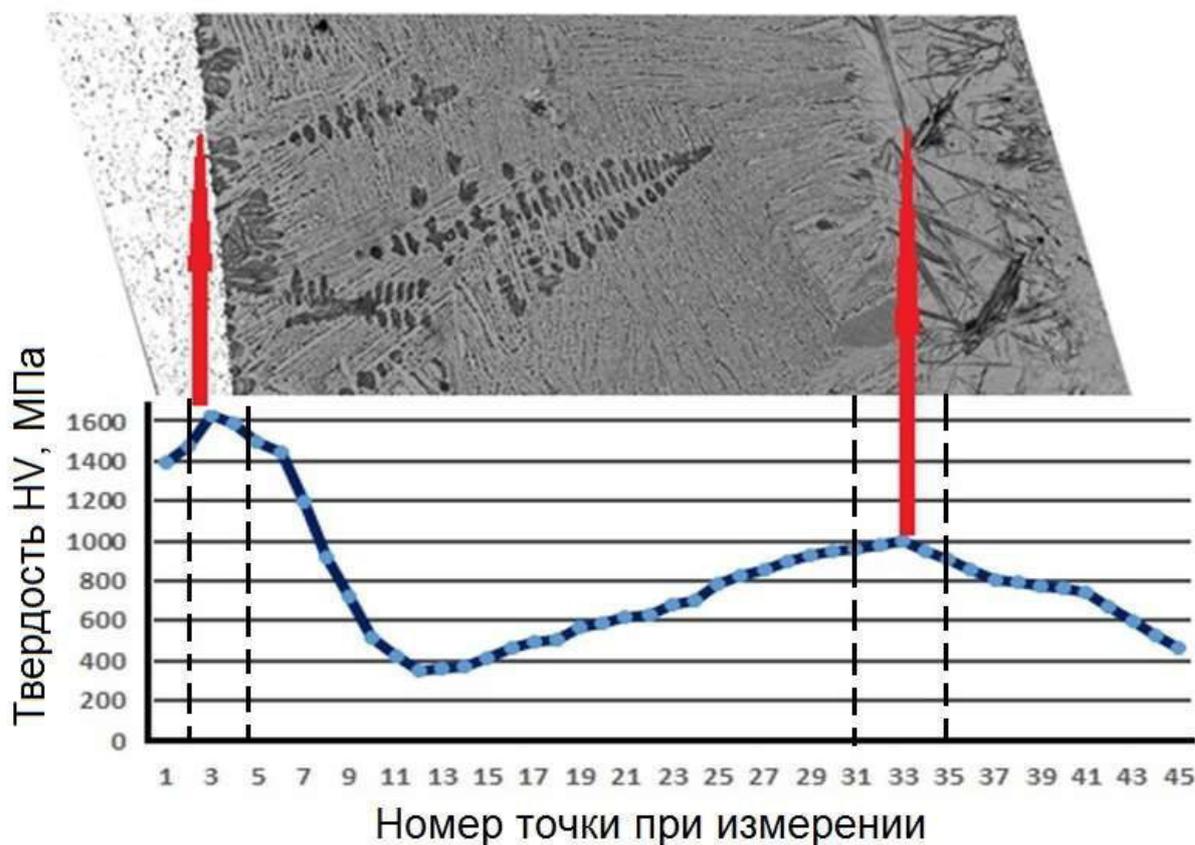


Рисунок 4.12 – Микроструктура и микротвердость паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь»

В результате экспериментальных исследований получены зависимости микроструктуры и микротвердости в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» (рисунок 4.12). В диффузионных зонах микротвердость высокая, свыше HV1600 в зоне «твердый сплав – FeC-припой» и HV1000 в зоне «FeC-припой – сталь». В диффузионных зонах микротвердость достаточная высокая твердость, а значит и соединение обладает повышенной прочностью.

Определение зависимости механической прочности паяного соединения от величины диффузионной зоны и толщины паяного соединения, предусматривала испытания на срез. Влияние структурно-фазового состава материала паяного шва «VK8 – FeC-припой» и «FeC-припой – сталь Ст3» на механические свойства соединения исследовалось после проведения макро- и микроструктурного анализа образцов на вертикальных срезах.

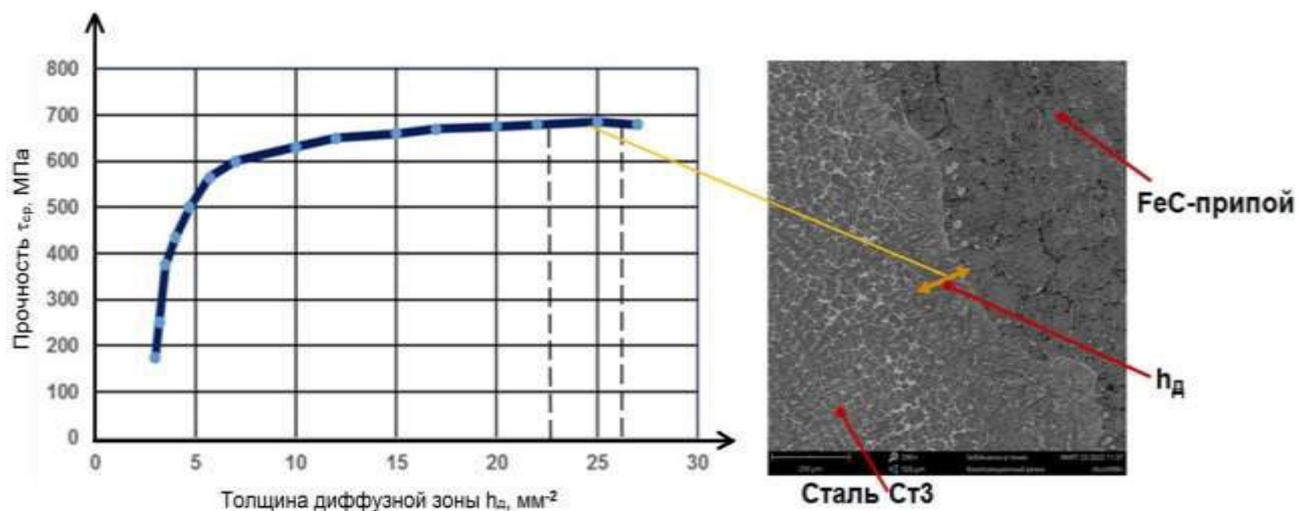


Рисунок 4.13 – Зависимость прочности соединения от величины диффузионной зоны

По результатам экспериментальных исследований получены зависимости прочности соединения от величины диффузионной зоны и прочности соединения от толщины паяного шва. Исходя из анализа проведенных испытаний максимальная прочность достигается при толщине диффузионной зоны $h_d = 0,25$ мм и толщине паяного шва $h_{п} = 0,5 \dots 0,8$ мм (рисунок 4.13 и 4.14).



Рисунок 4.14 – Зависимости прочности соединения от толщины паяного шва

Таким образом, проведенные исследования подтвердили наличие диффузионных зон в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» с достаточно высокой твердостью и прочностью, а также определили оптимальную толщину диффузионной зоны и толщину паяного шва для достижения максимальной прочности.

4.4. Результаты экспериментально-производственной испытаний

Производственные испытания опытных партий молотков в количестве 1000шт позволили определить величины износа упрочненных молотков путем построения профильных кривых (рисунок 4.15). Результаты проведенных испытаний в таблице 4.2.

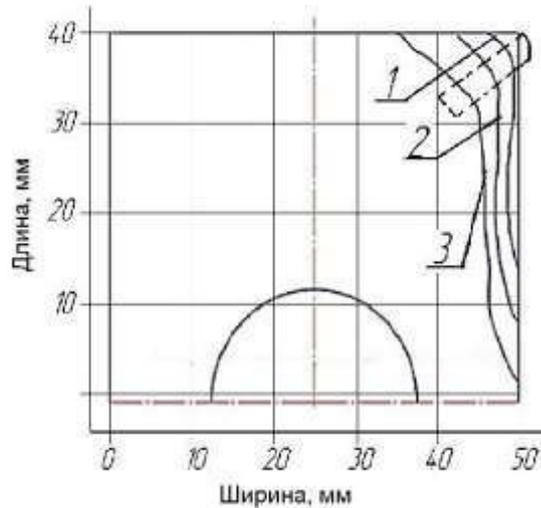


Рисунок 4.15 – Профильные кривые ударной части молотка через каждые 300т наработки

Таблица 4.2 – Экспериментальные значения величины износа упрочненного и серийного молотка от наработки

Наработка молотка, Q , т	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Износ молотка S , мм ² серийный	20	65	160	-	-	-	-	-	-	-
упрочненный	6	10	16	22	35	45	50	75	120	160

модель (2.28), для которой методом наименьших квадратов находим средние значения: \overline{SQ} , $\overline{S^2}$, $\overline{Q^2}$, $\overline{S^2Q}$, $\overline{SQ^2}$ [17] результаты расчетов представлены в таблице 4.3.

Применяя метод наименьших квадратов, получаем систему уравнений, по которой определяем коэффициенты S_0 и Q_0 :

$$\begin{cases} -S_0\overline{Q^2} + Q_0\overline{SQ} & = \overline{SQ^2} \\ -S_0\overline{SQ} + Q_0\overline{S^2} & = \overline{S^2Q} \end{cases} \quad (4.1)$$

Таблица 4.3 – Результаты расчета средних значений коэффициентов S_0 и Q_0

Номер наблюдения	S_i	Q_i	$Q_i \cdot S_i$	S_i^2	Q_i^2	$Q_i^2 \cdot S_i$	$Q_i \cdot S_i^2$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	4	100	400	16	10000	40000	1600
3	10	200	2000	100	40000	400000	20000
4	11	300	3300	121	90000	990000	36300
5	20	400	8000	400	160000	3200000	160000
6	32	500	16000	1024	250000	8000000	512000
7	38	600	22800	1444	360000	13680000	866400
8	50	700	35000	2500	490000	24500000	1750000
9	75	800	60000	5625	640000	48000000	4500000
10	120	900	108000	14400	810000	97200000	12960000
11	160	1000	160000	25600	1000000	160000000	25600000
Сумма	–	–	415500	51230	3850000	356010000	46406300
Среднее значение	–	–	37773	350000	4657	32364545	4218755

в которой

$$\overline{SQ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i), \quad \overline{S^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad \overline{Q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2, \quad (4.2)$$

$$\overline{S^2 Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i^2 Q_i), \quad \overline{SQ^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i^2). \quad (4.3)$$

Из системы (4.1) находим значения коэффициентов:

$$S_0 = \frac{\overline{SQ^2} \cdot \overline{S^2} - \overline{S^2 Q} \cdot \overline{SQ}}{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2} + (\overline{SQ})^2}, \quad (4.4)$$

$$Q_0 = \frac{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2 Q} + \overline{SQ} \cdot \overline{SQ^2}}{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2} + (\overline{SQ})^2}. \quad (4.5)$$

Из таблицы 4.2 выписываем значения средних значений: $\overline{SQ} = 37773$, $\overline{S^2} = 4657$, $\overline{Q^2} = 350000$, $\overline{S^2 Q} = 4218755$, $\overline{SQ^2} = 32364545$, по этим значениям находим значения коэффициентов S_0 и Q_0 :

$$S_0 = \frac{32364545 \cdot 4657 - 4218755 \cdot 37773}{-35000 \cdot 4657 + 37773^2} = -42,4;$$

$$Q_0 = \frac{-350000 \cdot 428755 + 37773 \cdot 32364545}{-35000 \cdot 4657 + 37773^2} = 1250.$$

Подставляем значения S_0 и Q_0 в модель (2.7), получаем зависимость износа молотка от его наработки:

$$(S - 42,4)(1250 - Q) = 42,4 \cdot 1250 = 53026,$$

Зависимость S от Q будет имеет вид:

$$S = \frac{53026}{1250 - Q} - 42,4. \quad (4.6)$$

Сравним эмпирические значения износа молотка $S_{\text{эмп}}$ с теоретическими $S_{\text{теор}}$, данные приведем в таблице 4.4.

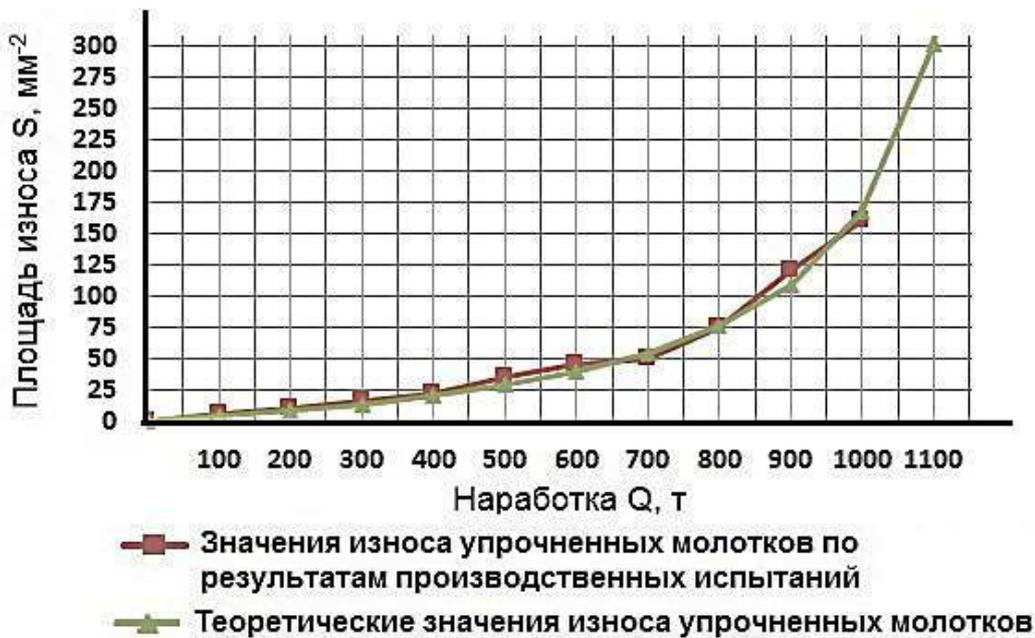


Рисунок 4.16 – Теоретические значения и результаты производственных испытаний

Таблица 4.4 – Сравнение экспериментальных и теоретических значений зависимости износа молотка S от наработки Q

Номер наблюдения	Q_i	$S_{\text{эмп}}$	$S_{\text{теор}}$	$\frac{S_{\text{эмп}} - S_{\text{теор}}}{S_{\text{теор}}}$	$v \%$	$(S_{\text{эмп}} - S_{\text{теор}})^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0
2	100	4	3,69	0,31	7,77	0,0965

3	200	10	8,08	1,92	19,19	3,6812
4	300	11	13,40	-2,40	21,80	5,7510
5	400	20	19,97	0,03	0,17	0,00115
6	500	32	28,29	3,71	11,61	13,7969
7	600	38	39,17	-1,17	3,07	1,3579
8	700	50	54,00	-4,00	8,00	16,0147
9	800	75	75,43	-0,43	0,58	0,1880
10	900	120	109,11	10,89	9,07	118,4878
11	1000	160	169,75	-9,75	6,09	95,0548
Сумма	–	–	–	–	–	254,43
Средняя квадратическая ошибка	–	–	–	–	–	5,32

Полученная зависимость (4.6) достаточно точно отображает экспериментальные значения износа, а величина ошибки прогноза не превышает 5% (рисунок 4.16).

Также определим коэффициенты S_0 и Q_0 для серийных молотков зернодробилок, используя данные производителя: $S(200) = 65\text{мм}^2$, $S(300) = 160\text{мм}^2$. Для этого также используем уравнение (2.7) и модель (2.28) при значениях выработки 200т и 300т.

$$\begin{cases} -200 \cdot S_0 + 65 \cdot Q_0 = 200 \cdot 65 \\ -300 \cdot S_0 + 160 \cdot Q_0 = 300 \cdot 160 \end{cases} \quad (4.7)$$

следовательно, для системы (4.7) значения S_0 и Q_0 равны: $-83,2 \text{ мм}^2$ и 456т.

Таким образом, при комбинированном упрочнении рабочей кромки молотка зернодробилки твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя предельное значение наработки увеличивается в 2,76 раз (с 456т до 1250т) (рисунок 4.16).

По результатам производственных испытаний опытных партий упрочненных молотков (1000шт) толщиной 6мм – установлено увеличение ресурса комбинированным упрочнением молотков твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя в 3...4 раза по сравнению с серийными (сталь 65Г, закалка ТВЧ).

Наработка упрочненных молотков до достижения ими предельного состояния в среднем составила 1000т (рисунок 4.17).

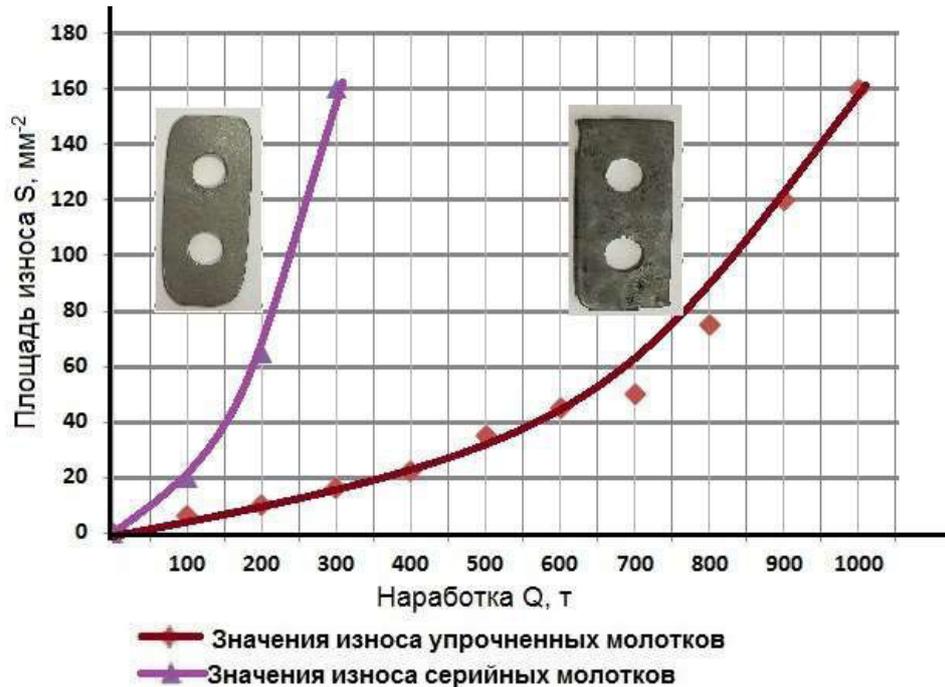


Рисунок 4.17 –Зависимость величины износа от наработки молотка

Таким образом, результаты производственных испытаний доказывают, что увеличение ресурса молотков, упрочненных твердым сплавом и FeC-припоем в 3...4 раза по сравнению с серийными.

4.5. Выводы по главе

Для реализации выполненных исследований по повышению эксплуатационного ресурса молотков зернодробилок, разработана и внедрена технология изготовления молотков комбинированным упрочнением рабочих кромок молотков пластинкой из твердого сплава, закрепленной индукционной пайкой с применением FeC-припоя.

Проведенные экспериментальные и производственные исследования показали:

1. результаты металлографических исследований FeC-припоя, твердого сплава и паяного соединения показали, что применяемый FeC-припой и установленные конструктивно-технологические параметры и режимы пайки обеспечивают теоретически обоснованное структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь»;

2. результаты исследований зависимости структурообразования от технологических режимов, позволили определить оптимальный технологический режим пайки обеспечивают структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь», которое гарантирует релаксацию напряжений при достаточно высокой прочности паяного соединения;

3. результаты исследований зависимости свойств паяного соединения от структуры шва паяного соединения, подтвердили наличие диффузионных зон в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» с достаточно высокой твердостью и прочностью, а также определили оптимальную толщину диффузионной зоны и толщину паяного шва для достижения максимальной прочности.

4. сравнивая эмпирические значения износа молотка $S_{эмп}$ с теоретическими $S_{теор}$, оценили адекватность модели прогнозирования ресурса молотков. Величина ошибки прогноза не превышает 5%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

5. результаты экспериментально-производственной испытаний доказывают, что увеличение ресурса молотков, упрочненных твердым сплавом и FeC-припоем в 3...4 раза по сравнению с серийными (сталь 65Г).

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет экономической эффективности с применением комбинированного упрочнения молотков зернодробилок проведен с учетом рекомендаций [83] и ГОСТ 34393-2018 для экономической оценки сельскохозяйственной техники в Российской Федерации, провели сравнение разработанной в данном исследовании технологии упрочнения молотков с серийно изготовленными молотками зернодробилки КДУ-2.

Сравнительные испытания проходили в производственных условиях производственной компании ООО «Агромаштехсервис» Алтайского края на производстве кормовых смесей. Испытания проводились на зернодробилки КДУ-2 и измельчаемым зерновым материалом.

Расчет экономической эффективности с использованием комбинированно упрочненных молотков произведен с учетом наработки зернодробилки 10000т. Сравнительные показатели зернодробилок с комбинированно упрочненными и серийными молотками представлены в таблице 5.1.

Условная экономия от наработки составит [83]:

$$\mathcal{E}_y = (C_c - C_y) \frac{T}{10000}, \quad (5.1)$$

где \mathcal{E}_y – условная экономия от наработки, руб.;

C_c , C_y – трудовые и материальные затраты на замену молотков зернодробилки серийных и упрочненных молотков, руб.;

T – наработка зернодробилки на каждые 10000т.

Трудовые и материальные затраты на замену молотков зернодробилки по достижении наработки 10000т серийных или упрочненных:

$$C = \left(\frac{C_\kappa}{m} - C_{\text{д.м}} \right) \cdot K_3 \quad (5.2)$$

где C_κ – стоимость одного комплекта молотков серийных или упрочненных, руб.;

$C_{\text{д.м}}$ – стоимость одного демонтажа-монтажа молотков на оси, руб.;

m – количество рабочих углов;

K_3 – среднее количество замен молотков зернодробилки по достижении наработки 10000т.

$$K_3 = \frac{N_p}{N_{cp}}, \quad (5.3)$$

где N_p и N_{cp} расчетная наработка на 10000т и средняя наработка по достижению предельного износа серийных или упрочненных молотков на один рабочий угол.

Снижение затрат труда на демонтаж-монтаж молотков на оси определим по формуле:

$$F = (K_{zc} - K_{zy}) \cdot A, \quad (5.4)$$

где K_{zc} – среднее количество замен серийных молотков зернодробилки по достижении наработки 10000т;

K_{zy} – среднее количество замен упрочненных молотков зернодробилки по достижении наработки 10000т;

A – трудоемкость демонтажа-монтажа молотков на оси.

Рассчитаем по формулам (5.1) и (5.2) условную экономию в сравнении с использованием при замене серийных и упрочненных молотков:

$$\mathcal{E}_y = \left[\left(\frac{9240}{4} + 420 \right) \frac{10000}{4} - \left(\frac{9600}{2} + 420 \right) \frac{10000}{2} \right] \frac{10000}{10000} = 259509 \text{ руб.}$$

Определим снижение затрат труда при работе зернодробилки с упрочненными молотками

$$F = \left(\frac{10000}{75} - \frac{10000}{500} \right) \cdot 1,1 = 124,63 \text{ чел.-ч}$$

Результаты расчетов экономии материальных и трудовых затрат при замене молотков зернодробилки приведены в таблице 5.1. По результатам расчетов установлено, что замена молотков зернодробилки с использованием комбинированного упрочнения целесообразна из-за их достаточного ресурса.

Таблица 5.1. – Сравнительные показатели зернодробилки КДУ-2 параметров от параметров молотка

Параметры	Единица измерений	Серийные молотки (сталь 65Г)	Упрочненные (сталь Ст3)
Средний ресурс на один угол молотка	т	75	500
Количество рабочих углов молотка	шт.	4	2
Коэффициент ресурса	-	1	3,3
Количество замены углов молотка по достижению предельного износа	-	4	2
Трудоемкость демонтажа-монтажа молотков на оси	чел.-ч	1,1	1,1
Количество молотков у КДУ-2	шт	90	90
В цена комплекта молотков	руб	9240	9600
Стоимость демонтажа-монтажа молотков на оси	руб	420	420
Затраты на каждые 10000т наработки КДУ-2	руб	1288000	200400
Снижение затрат труда на демонтаж-монтаж молотков на оси	чел.-ч	-	124,63
Экономический эффект зернодробилки при наработке 10000т	руб	-	259509

Основные показатели работы зернодробилки приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Основные показатели работы зернодробилки КДУ-2

Молоток	Показатели	
	производительность, т/ч	удельная энергоемкость, кВт·ч·т
Серийные: - новые - при наработке 300 т	2,1	2,89
	1,67	3,58
Упрочненные: - новые - при наработке 1000 т	2,1	2,89
	1,75	3,03

Реализация выполненных исследований в условиях производства обеспечивает решение проблемы повышения эксплуатационного ресурса молотков зернодробилки и позволяет достичь повышения производительность на 10...16%, снизить удельное энергопотребление на 15...20%. Экономический эффект от внедрения результатов выполненных исследований в условиях АПК может составить до 259509 рублей на каждые 10000т обработанного материала, то есть при обработке одной тонны обработанного материала экономический эффект составляет 26 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что одним из основных резервов повышения эффективности работы зернодробилок является применение разработанной технологии комбинированного упрочнения рабочей кромки молотков твердым сплавом с применением FeC-припоя, что приводит к изменению конструкции молотка и обеспечивает его длительную работоспособность в процессе эксплуатации.

2. Определено, что предельным износом рабочей кромки серийного молотка зернодробилок является износ до главной оси симметрии, который наступает по достижению наработки около 200т. Предельный износ молотков сопровождается скруглением рабочей кромки молотка по кривой близкой к параболе, что приводит к росту энергозатрат в 1,5...2,2 раза и к резкому снижению производительности зернодробилок более чем на 40%.

3. Разработана математическая модель для прогнозирования износа молотков, позволяющая определить предельные значения S_0 и Q_0 , оценить зависимости износа от наработки и отобразить результаты экспериментов. Результат прогноза не превышает 5%.

4. Установлены закономерности изнашивания экспериментальных молотков зернодробилок, упрочненных твердым сплавом с применением FeC-припоя от наработки. Предельный износ наступает при наработке в 1000т. При упрочнении рабочей кромки молотка, изготовленного из стали Ст3 с твердосплавной пластиной ВК8 с размерами 3×6×8мм при использовании 0,50...0,55г FeC-припоя проявляется эффект самозатачивания.

5. Выявлены закономерности структурообразования в паяном соединении «сталь – FeC-припой – твердый сплав», обеспечивающие высокопрочное соединение за счет формирования диффузионных зон. Определена зависимость механической прочности паяного соединения от величины диффузионной зоны. Исследованиями установлено, что максимальная прочность достигается при

толщине диффузионной зоны $h_d = 0,25\text{мм}$ и толщине паяного шва $h_{\text{п}} = 0,5 \dots 0,8\text{мм}$.

6. Обоснованы рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы изготовления молотков зернодробилок с применением твердосплавных пластинок ВК8 и FeC-припоя, обеспечивающие структурное состояние паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь»:

- скорость нагрева под пайку $V_{\text{н}} = 30 \dots 40^{\circ}\text{C}/\text{с}$;
- температура пайки не более $t = 1140 \dots 1190^{\circ}\text{C}$;
- время выдержки при температуре пайки (FeC-припоя в жидкой фазе) $\tau_{\text{в}} = 5 \dots 7\text{с}$;
- охлаждение на воздухе со скоростью $V_{\text{охл}} = 10 \dots 20^{\circ}\text{C}/\text{с}$ с последующим отпуском при $t = 200 \dots 250^{\circ}\text{C}$ в течение 3...6 ч.

7. Производственные испытания показали, что при замене серийного молотка, изготовленного из стали 65Г, на молоток, изготовленный комбинированным упрочнением, не снижаются усталостно-абразивная стойкость и ударная прочность, что приводит к увеличению ресурса молотка в 3...4 раза по сравнению с серийным.

8. Экономическая оценка проводилась в производственных условиях ООО «Агромаштехсервис». Реализация выполненных исследований в условиях производства обеспечивает решение проблемы повышения эффективности работы зернодробилок и позволяет достичь повышения производительности на 10...16%, снизить удельное энергопотребление на 15...20%. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения результатов выполненных исследований составил 26 рублей на каждую тонну обработанного материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. 119420 А1 СССР, МПК В23К 35/30, С22С 9/04. Припой для пайки твердосплавного инструмента / Н. Е. Будников. – №611639: заявл. 10.11.1958: опубл. 01.01.1959. Бюл. №14. – 1с.
2. А.с. 149022 А1 СССР, МПК В23К 35/30, С22С 9/06. Припой для пайки твердосплавного инструмента / Н. А. Буланов, В. И. Колесникова, С. Н. Лоцманов и др. – №741554: заявл. 12.08.1961: опубл. 01.01.1962. Бюл. №14. – 1с.
3. А.с. 1512742 А1 СССР, МПК В23К 35/30. Припой для пайки инструмента / И. Н. Иванов, Г. П. Кузнецова, В. И. Клоков и др. – №4254367: заявл. 07.04.1987: опубл. 07.10.1989. Бюл. №37. – 2с.
4. А.с. 335063 А1 СССР, МПК В23К 35/30, С22С 9/05. Припой для пайки твердосплавного инструмента / Ф. Н. Гинзбург, В. С. Каусев, О. С. Квурт и др. – №1497868/25-27: заявл. 03.12.1970: опубл. 11.04.1972. Бюл. №13. – 1с.
5. А.с. № 623683 А1 СССР, МПК В23К 35/30. Припой для пайки инструментов из быстрорежущей стали / П. И. Кривец, Г. Б. Дейч, А. Д. Сычев [и др. – №2482513: заявл. 04.05.1977: опубл. 15.09.1978. Бюл. №34 – 2с.
6. А.с. 1120575 А1 СССР, МПК В23К 35/30. Припой для пайки твердого сплава/ Глазачев С. У., 1983. – 1с.
7. А.с. 165059 А1 СССР, МПК В23В 27/18. Способ крепления твердосплавных пластинок к литым державкам / Капилевич Ю.Б. – №575075/25-8: заявл. 22.08.1955: опубл. 04.09.1964. Бюл. №17 – 1с.
8. А.с. 565775 А1 СССР, МПК В22D 19/06. Способ изготовления биметаллического твердосплавного инструмента / Михайлов А. А., Волощенко, М.В. Литовка В.И. – №2196868: заявл. 08.12.1975: опубл. 25.07.1977. Бюл. №27 – 3с.
9. Агафонова, Е.В. Методические вопросы исследований комбинированного упрочнения молотков кормодробилок армированием твердым сплавом с применением железоуглеродистого припоя / Е.В. Агафонова, В.В. Коноводов // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иваново, 30 ноября 2020 года. – Иваново:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, 2020 – с. 24-28

10. Агафонова, Е. В. Анализ способов повышения ресурса рабочих органов молотковых кормодробильных машин / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК: Материалы VIII Национальной научно-практической конференции с международным участием «Чтения И. П. Терских», посвященной 85-летию Иркутского ГАУ, Иркутск, 26–27 сентября 2019 года. – Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2019. – С. 73-81.

11. Агафонова, Е. В. Методы оценки износа рабочих органов кормодробильных машин молоткового типа / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов // Теория и практика современной аграрной науки: сборник национальной (Всероссийской) научной конференции, Новосибирск, 20 февраля 2018 года / Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск: ИЦ «Золотой колос», 2018. – С. 188-191. – EDN YULOQZ.

12. Агафонова, Е. В. Обоснование технологических свойств железоуглеродистого припоя для соединения твердосплавного элемента и основы молотка кормодробилки / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов, А. А. Малышко // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XII региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 11 ноября 2020 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, 2020. – С. 9-12.

13. Агафонова, Е. В. Образование структуры в соединениях твердого сплава и стали, паяных железоуглеродистым припоем (на примере твердосплавного инструмента) / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов // Технический сервис машин. – 2022. – № 3(148). – С. 50-59. – DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-3-50-59. – EDN ZPGDBV.

14. Агафонова, Е. В. Повышение эксплуатационной надежности молотков

кормодробильных машин конструктивно-технологическими методами / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов, С. В. Щелоков // Технический сервис машин. – 2018. – Т. 133. – С. 205-212. – EDN VRSZSK.

15, Агафонова, Е. В. Поиск параметров модели прогнозирования ресурса молотков кормодробильных машин / Е. В. Агафонова, О. В. Мамонов // Теория и практика современной аграрной науки: Сборник VII национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 26 февраля 2024 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2024. – С. 852-855. – EDN UEKATH.

16. Агафонова, Е. В. Способы повышения эксплуатационной надежности рабочих органов кормодробильных машин /Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы IX региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–10 октября 2017 года / Новосибирский государственный аграрный университет. Инженерный институт. – Новосибирск: ИЦ «Золотой колос», 2017. – С. 123-126.

17. Агафонова, Е. В. Модель прогнозирования ресурса упрочнённых молотков кормодробильных машин / Е. В. Агафонова, В. В. Коноводов, О.В. Мамонов // Технический сервис машин. – 2024. –Т.62, № 3. – С. 50-59.

18. Александров, В.М. Математические методы в контактных задачах с износом/ В.М. Александров, Е.В. Коваленко //Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела/ АН СССР, Ин-т машиноведения им. Благонравова. -М.: Наука, 1984. с.77-89

19. Алешкин, В. Р. Механизация животноводства: учебн. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений / В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – М.:Агропромиздат, 1985. – 136 с.

20. Амельчик, А.В. Ремонт, восстановление и испытание инструмента и технологической оснастки. – Киев: Техника 1981. – 200 с.

21. Андреев, П.В. Исследование износостойкости молотков дробилок при измельчении зерна // Зап. Ленингр. с-х. ин-та. – 1969. – с.143. – Вып.2. – с.30-34.

22. Асташкевич, Б.М. Износостойкость цилиндрического чугуна, легированного медью и бором/ Б.М. Асташкевич, А.С. Булюк // Литейное производство, №1, 1992. – С.14-15

23. Аулов, В.Ф. Новый способ упрочнения деталей сельхозмашин с большим износом // Аулов В.Ф., Лялякин В.П., Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т., Коваль Д.В., Соколов А.В., Щеголев А.В. /В сборнике: Аграрная наука – сельскому хозяйству сборник статей: в 3 книгах. Алтайский государственный аграрный университет. 2016. С. 5-7.

24. Балданов, М. Б. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках / М. Б. Балданов // Сб. тр. Бурятской с.-х. академии. – Вып. 38. – 1995. – С. 11-14

25. Балакир, Э. Повышение износостойкости молотков //Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. 1987, №2.

26. Балакир, Э.А. Повышение долговечности рабочих органов пищевых машин/ Надежность и техническая диагностика оборудования перерабатывающих отраслей АПК: Сб. статей. – М.: Инфор и агротех, 1990. С. 28-32.

27. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки / В. П. Барабашкин – 2-е изд., доп. и перераб. изд. – М: Наука, 1973. – 143 с.

28. Барашов, А.А. Рост чугуна и стали при термоциклировании / А.А. Барашов, К.П. Бунин, Э.Д. Глебова. – Киев: Техника, 1967. - 140 с.

29. Бобро, Ю.Г. Легированные чугуны. – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.

30. Бобро, Ю.Г. Повышение износостойкости углеродистых сталей электролитической закалкой/ Ю.Г. Бобро, В.В. Казарцев, П.Е. Подрядченко, Л.А. Платонова и др // Исследование и конструирование машин для животноводства и кормопроизводства. Сб. науч. трудов. Вып.12. – К. 1987 – С.217-218.

31. Бойко, А.И. Графоаналитический метод оценки износа молотковых рабочих органов. Исследование и конструирование машин и оборудования для животноводства: Сборник науч. трудов Вып. – 12 / А.И. Бойко, Н.И. Денисенко, А.В. Сизиненко. – Киев, 1987.

32. Бойко, А.И. Исследование долговечности упрочненных молотков

кормодробилок. Исследование и конструирование машин и оборудования для животноводства: Сборник науч. трудов Вып. – 12 / А.И. Бойко, Н.И. Денисенко, А.В. Сизиненко. – Киев, 1987.

33. Бойко, А.М. Повышение долговечности молотковых рабочих органов кормобрилок/ А.М. Бойко, А.В. Сизиненко// Исследование и состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования, конструирование машин и оборудования для животноводства. Сб. науч. трудов. Вып.14. – К. 1989 – С. 66-70.

34. Бойко, А.М. Повышение долговечности молотковых рабочих органов кормодробилок/ А.М. Бойко, А.В. Сизиненко//Исследование и конструирование машин и оборудования для животноводства 1989, вып. 14.

35. Борисов, Г.П. О классификации структурных зон кристаллизующихся сплавов/ Литейное производство, №2, 1987. - С.56-58

36. Братковский, Е. В. К вопросу повышения ударно-абразивной стойкости среднелегированных сталей / Е. В. Братковский, А. И. Турушева // Наука и производство Урала. – 2019. – № 15. – С. 10-12.

37. Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.

38. Валентов, А.В. Прогнозирование остаточных и эксплуатационных напряжений при пайке резцов для обработки наплавленных поверхностей/ А.В. Валентов, В.В. Коноводов, Е.В. Агафонова// Вестник НГАУ. 2013. № 1 (26). С. 107-110.

39. Валентов, А.В. Определение границ трещиностойкости при пайке безвольфрамового твердого сплава на железоуглеродистый припой/ А.В. Валентов, В.В. Коноводов, Е.В. Агафонова, Е.Г. Григорьева// Фундаментальные исследования. 2016. № 4-2. С. 244-248.

40. Виноградов, В. Н. изнашивание при ударе/ В.Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. – М.: Машиностроение, 1982. – 192с.

41. Власенко, Д. А. Математическое моделирование процесса изнашивания молотков при дроблении материала свободным ударом / Д. А. Власенко, Э. П.

Левченко, Г. А. Билан // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 1(15). – С. 8-16.

42. Власов, Ю.А. Допустимый износ молотков кормодробилок. Механизация и электрификация сел. хоз-ва. 1972. №2. с. 45-46.

43. Волченко, В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. – Москва: Металлургия, 1979. – 88 с.

44. Гадалов, В.Н. Восстановление и упрочнение молотка кормодробилок плазменными покрытиями с последующим печным оплавлением. / В.Н. Гадалов, Е.А. Филатов, П.А. Красных, И.А. Макарова /Успехи современной науки. – Белград: Том: 2 (6): 2017 - С104-108.

45. Глебов, Л. А. Скорость удара полного измельчения зерна при производстве комбикормов / Л. А. Глебов. // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. - 1979. - С. 29-30.

46. Гоева, В. В. Методика определения износа лопаток вентилятора дробилки зерна / В. В. Гоева // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 2. – С. 29-34.

47. Горенштейн, И.М. Упрочнение дробильных молотков кормоизмельчителей/ С. Л. Лернер, И.М. Горенштейн, М.Ф. Волков// Сельское хозяйство Молдавии. 1986. № 3. – С. 65-67.

48. Горячкин, В. П. Собрание сочинений: В 3 т. / [Под ред. действ. чл. Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В. И. Ленина проф. д-ра с.-х. наук Н. Д. Лучинского]. - Москва: Колос, 1968. - 3 Т. – 719с.

49. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов /Г. И. Грановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с.

50. Гржимальский, Л. Л. Использование пайки для нанесения композитных покрытий /Л. Л. Гржимальский, Г.Н. Капитонов, В.А. Коротков// Современные способы наплавки и их применение.: Сб. тр./ ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР. – Киев, 1982. – С.114–118.

51. Гулаев, А.П. Металловедение. 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1979. – 648 с.

52. Денисенко, Н. И. Повышение долговечности молотков дробилок

конструктивно технологическими методами/ Н. И. Денисенко, А. П. Потамошнев// Исследование и конструирование машин и оборудования для животноводства. 1988. – Т. 13. – С. 92-97.

53. Диагностика процесса металлообработки / В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, Г. С. Тымчик. – Киев: Техника, 1991. – 151 с.

54. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – Москва: Машиностроение, 1996 - 991 с.

55. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: Справ. изд. О. Кубашевски/ Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1985. – 184 с.

56. Дробилки молотковые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agrogrant.com/prodcategory.php?cat=1> (дата обращения: 23.10.2017).

57. Дробилки молотковые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agro-i.ru/drobilki-molotkovie> (дата обращения: 23.10.2017).

58. Дробилки универсальные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://защить-мешок.рф/p167362653-drobilka-molotkovaya-molot.html> (дата обращения: 17.11.2017).

59. Ершова, Т.П. Физика металлов и материаловедение. тД, №1–5. 1964

60. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Metallurgia, 1995. – 272с.

61. Жердева, Ю.А. Молотковая дробилка с износостойкими рабочими органами В книге: Сборник тезисов участников форума «НАУКА будущего - наука молодых», 2017. С. 199-200.

62. Жиров, Д. К. Физические процессы разрушения многокомпонентных структурно-неоднородных материалов и сравнительный анализ технических характеристик мельниц для их измельчения / Д. К. Жиров // Вестник Удмуртского университета. 2013. № 3 - С. 6-13.

63. Жуков, А.А. Что такое стабильно-половинчатый чугун /А.А. Жуков, Г.И. Сильман // Литейное производство. №2, 1993. - С.38-40

64. Зеленев, А.А. Обоснование размеров и форм молотка молотковой

зернодробилки. Сельхозмашина, №8. 1951. с. 14-16.

65. Золотова, А.А. Динамические исследования молотковых кормодробилки: Дис. канд. техн. наук. М.: 1968. 167 с.

66. Иванов, А. В. Исследование процесса измельчения единичных зерен / А. В. Иванов, Ж. В. Арбузова, Е. Ю. Сеница // Хранение и переработка сельхозсырья. 1999. – № 5. – С. 13-14.

67. Иванов, Д.П. Вопросы первичной кристаллизации в железоуглеродистых сплавах (чугунах). Авт....док. техн. наук. – М.: 1957. – 23с.

68. Иванов, И.Н. Возможности повышения эффективности производства паяного инструмента с твердыми сплавами. / Пайка в машиностроении. – Омск: ЦП НТО. «Машпром», 1980. – С.18-17

69. Иванов, И.Н. Исследование диффузионной зоны на границе припой - твердый сплав с целью выбора состава припоя. //Проектирование технологического процесса пайки... / ЦП и Лат. РП НТО. – М.: Машпром, 1978. – С. 27–31.

70. Избранные нелинейные задачи механики разрушения / под ред. В.А. Левина. – М.: Физматлит, 2004. – 408 с.

71. Износостойкая сталь HARDOX 450 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wearservice.ru/data/files/pdf/450.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).

72. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев, В.Н. Фиштейн и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.

73. Ионов, Ю.Б. Абразивное изнашивание бандажных сталей. «Вопросы рудничного транспорта» Вып. 2, Углетехиздат, 1957. – 65 с.

74. Ипатов, А.Г. Лазерное высокоскоростное спекание ультрадисперсных порошковых материалов / А.Г. Ипатов, С.М. Стрелков, Е.В. Харанжевский // Материалы научной конференции «Огаревские чтения». – Саранск, 2008. – Часть 3. – С. 7-8.

75. Казинцев, Н.В. Повышение износостойкости рабочих органов кормоизмельчителей ИРТ-165/Ж./ Н.В. Казинцев, В.А. Шумский, Э.И. Нимаев//

Техника в сельском хозяйстве. 1987. №11. – С. 15-18.

76. Каленчян, К.О. Структура и свойства соединений твердый сплав-сталь при контактной сварке твердосплавного инструмента. Авто-реф...канд. техн. наук. – М., 1984. – 18 с.

77. Капилевич, Ю.В. Краткое описание универсальных экономичных резцов и высокопроизводительных фрез. – Новосибирск, 1976. – 12с.

78. Кашеев, В.Н. Абразивное разрушение твердых тел, М.: Нука, 1970 – 248с.

79. Келоглу, Ю.П. Металлы и сплавы/ Справочник. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1977. – 264 с.

80. Кимстач, Г.М. Об образовании карбида в FeC-сплавах/ Г.М. Кимстач, А.А.Уртаев, Г.Д. Молодцов // Материаловедение и термическая обработка металлов, №4, 1988. - С9-12

81. Клименко, Н.И. Сравнительная износостойкость дробильных молотков. Исследование и конструирование машин и оборудования для животноводства: Сборник науч. трудов Вып. – 12 / А.И. Бойко, А.В. Тимановский, В.Ф. Журавель. – Киев, 1975.

82. Клочко, Н.А. Основы технологии пайки и термической обработки твердосплавного инструмента. – М.: Металлургия, 1981. – 200 с.

83. Сорокин, Н.Т., Табашников А.Т. Методика оценки экономической эффективности сельскохозяйственной техники/ Н.Т. Сорокин, А.Т. Табашников Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. №2. С.41-44.

84. Колобов, М. Ю. Износ рабочих органов центробежно-ударных мельниц / М. Ю. Колобов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2009. – № 8. – С. 41-43.

85. Кондратов, А.Ф. Механизация животноводства: учеб. пособие / А. Ф. Кондратов, В.П. Ожигов, И.Я. Федоренко, В.И. Земсков, Н.А. Петухов, М.Н. Мефодьев, П. А. Патрин и др.; Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. - Новосибирск: НГАУ, 2005. - 428 с.

86. Коноводов, В.В. Влияние напряжений на формирование структуры при кристаллизация промежуточного слоя биметаллических соединений/ В.В. Коноводов, Ю.В. Каллойда, А.А. Малышко, С.У. Глазачев, З.А. Лузянина//

Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий.: Тез. докл. IX Межд. конф. СМИ. – Новокузнецк, 1995. – 189 с.

87. Коноводов, В.В. Исследование влияния температурного нагрева на качество паяного инструмента/ В.В. Коноводов, А.В. Валентов, М.В. Копелев// В сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Национальный исследовательский Томский политехнический ун-т. – Томск, 2014. С. 132-135.

88. Коноводов, В.В. К вопросу о стойкости твердосплавного режущего инструмента/ В.В. Коноводов, Ю.В. Каллойда, А.А. Малышко, С.У. Глазачев, З.А. Лузянина //Анализ современных аграрных проблем.: Тез. докл. науч.-практ. конф. ученых НГАУ и Гумбольдтского ун-та. – Новосибирск, 1995. - С.115-117

89. Коноводов, В.В. Пайка твердосплавного режущего инструмента припоями на основе железа/В.В. Коноводов, С.У. Глазачев и др //Новые модели и технические решения в аграрном производстве: Сб. тр. /НГАУ. – Новосибирск, 1995.

90. Коноводов, В.В. Повышение эффективности процесса восстановления клапанных пружин двигателей внутреннего сгорания: автореферат дис. ... кандидата тех. наук: 05.20.03 / Новосибир. с. х. ин-т. – Новосибирск, 1990. – 16 с.

91. Коноводов, В.В. Прогнозирование ресурса дисков фрикционных передач/ В.В. Коноводов, Н.А. Кириллов, В.А. Головатюк//Машинно-технологическое и сервисное обеспечение сельхоз товаропроизводителей Сибири: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения акад. ВАСХНИЛ А.И. Селиванова. – Новосибирск, 2008. – С. 156-160.

92. Коноводов, В.В. Совершенствование технологии изготовления паяного твердосплавного инструмента / В.В. Коноводов, А.А. Малышко, С.У. Глазачев, Ю.В. Каллойда // Новые модели и технические решения в аграрном производстве.: сб. науч. тр./ НГАУ. – Новосибирск, 1995. - С.62-64

93. Коношин, И. В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна обоснованием конструктивно-режимных параметров измельчения / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Сборник статей по материалам Международной конференции. Орел: ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ», 2011. – С. 58-63

94. Коношин, И. В. Современные тенденции использования дробилок зерна/ И.В. Коношин, А. В. Черепков // Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства. Сборник материалов к Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Орел: ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ», 2012. – С. 87-92.

95. Крагельский, И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ /И.В. Крагельский, М.Н. Дробынин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение. 1977. - 526 с.

96. Кузнецов, Б.Л., Введение в литейное материаловедение чугуна. – М.: Машиностроение, 1995. – 167 с.

97. Лапшин, В.Б. Пути повышения долговечности рабочих органов ударно-центробежных измельчителей/ В.Б. Лапшин, А.М. Абаляхин, Н.В. Боброва, А.В. Богородский, М.Ю. Колобов // Ремонт, восстановление, модернизация. – Москва, 2008. – № 8. – С. 41-44.

98. Лернер, С. Л. Продлить срок службы молотковых дробилок/ С. Л. Лернер, И.М. Горенштейн, М.Ф. Волков //Сельское хозяйство Молдавии. 1985. №6. – С. 42-45.

99. Литой инструмент из высокопрочного чугуна/ Ин-т проблем литья АН УССР. – Киев, 1978. – 194с.

100. Малич, Н. Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов / Н. Г. Малич, В. С. Блохин, А. О. Дегтярев //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. – №1. – С. 365-380

101. Малышко, А.А. Повышение эффективности механической обработки восстановленных наплавкой деталей сельскохозяйственной техники/ Автореферат дис. ... кандидата технических наук / Новосибирский гос. аграрный ун-т. – Новосибирск, 1997. – 18с.

102. Материаловедение и термическая обработка. Справочник, т. 1,2. – М., Metallurgizdat, 1960. – 62с.

103. Машины и оборудование в животноводстве. Механизация и автоматизация животноводства: учеб. пособие / П. А. Патрин, А. Ф. Кондратов;

Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск: НГАУ, 2013. – 120 с.

104. Медь в черных металлах/ Пер.с англ. под ред. Банных О.И. – М.: Металлургия, 1988.

105. Мельник, Б.А. Рентгенографическое исследование процесса кристаллизации чугунов/ Б.А. Мельник, А.В. Черновал // Структура и свойства чугуна: Об. науч. тр./ АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1989. - С.294-296.

106. Мельников, С.В. Классификация молотковых кормодробилок. Зап. Ленинг. с-х ин-та. 1972. т.199. с. 3-8.

107. Мельников, С.В. Технологическое оборудование животноводческих ферм. – Л.: Агропромиздат, 1985. – 640 с.

108. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С.В. Мельников – Л.: Колос. 1978. – 560 с.

109. Металловедение и термическая обработка стали: Справ, изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т, Т. II. Основы термической обработки /Под ред. Бернштейна М. Л., Рахштадта А. Г. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.

110. Металлография сварных соединений чугуна/ Под ред. Грецкого Ю.Я. – Киев: Наук. думка, 1987. – 192 с.

111. Морфология слоистых металлокомпозиов, полученных различными способами / А. А. Бердыченко, А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, А. А. Ситников // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18, №2. – С. 216-223.

112. Мудрук, А. С. Повышение износостойкости деталей машин для животноводства и кормопроизводства за счет лазерной закалки/ А. С. Мудрук, В. И. Лаврук, Т. И. Бородина// Исследование и конструирование машин для животноводства и кормопроизводства. Сб. науч. трудов. Вып.11. – К. 1986 – С.112-116.

113. Надежин, А.В. Исследование износа молотков рабочего органа измельчителя ИРМ-50//Механизация и электрификация производственных процессов в животноводстве: Сб. науч. тр./ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1989. – С.139-143.

114. Неижко, И.Г. Графитизация и свойства чугуна// АН УССР. Ин-т пробл. литья. – Киев: Наук.думка, 1989. – 208 с.

115. Оборудование для комбикормовой промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sovocrim.ru/products/kombikorm> (дата обращения: 13.09.2018).

116. Оборудование для производства комбикорма [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.smsz.ru/products/g_kombikorm/ (дата обращения: 15.10.2017).

117. Овчинников, В.И. Влияние меди на структуру и свойства серого чугуна/ В.И. Овчинников, А.В. Тюнин, А.С. Зволинский // Литейное производство. №1, 1992. – С.7-8

118. Пат. 2076795 RU С1, МПК6 В23К035/30. Припой для пайки инструмента/ Глазачев С. У., Каллойда Ю. В. Коноводов В. В., Малышко А. А.; заявитель и патентообладатель Глазачев С. У. – №5036802/08 заявл. 10.04.1992: опубл. 10.04.1997. – 5с.

119. Пат. 2202441 С2 Российская Федерация, МПК В22D 19/06. Способ соединения твердого сплава с литой основой инструмента / Каллойда Ю. В., Батаев А. А., Батаев В. А.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. – №2001113333/02: заявл. 14.05.2001: опубл. 20.04.2003. – 5с.

120. Пат. 2550471 С2 Российская Федерация, МПК В23К 35/02, В23К 35/30, С22С 38/20. Твердый припой на железохромовой основе / Перссон У.; заявитель и патентообладатель ХЕГАНЕС АБ. – №2012115461/02: заявл. 17.09.2010: опубл. 10.05.2015 Бюл. №13 – 11с.: ил.

121. Пат. 166614 U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/28. Молоток дробилки / Елисеев М. С., Рыбалкин Д. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». – №2016110503/13: заявл. 22.03.2016: опубл. 10.12.2016. – 4с.: ил.

122. Пат.192763 U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/28. Молоток

дробилки / Агафонова Е. В., Коноводов В. В. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет». – №2019122754: заявл. 15.07.2019: опубл. 30.09.2019. №28 – 5с.: ил.

123. Пахомов, В.С. К вопросу теории молотковых кормодробильных машин / В.С. Пахомов// Тр. Кишинёв. СХИим. М.В. Фрунзе. 1956. – Т. IX. – С.39-55.

124. Петров, А. А. Повышение надежности рабочих органов кормодробилок молоткового типа: диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.03 / Петров Алексей Анатольевич. – Оренбург, 2007. – 153 с.

125. Петров, А.А. Повышение производительности кормодробилки за счёт оптимизации конструктивных параметров молотка // Петров А.А., Алямов И.Д., Козловцев А.П., Стеновский В.С., Наумов Д.В. / Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1(57). – С. 43-45. – EDN VPFCNS.

126. Петров, А. А. Способ оптимизации повышения износостойкости молотков кормодробилок / А. А. Петров, В. С. Стеновский, Н. В. Белоусова // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6, № 1(21). – С. 185-193. – DOI 10.12737/18741. – EDN VSZFWN.

127. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. АН УССР. Ин-т проблем прочности. – Киев. Наукова думка, 1976. – 415 с.

128 Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии /Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев// АН УССР. Ин-т проблем прочности. – Киев. Наукова думка,1976. – 415 с.

129. Повышение долговечности молотковых рабочих органов кормодробилок / А.Н. Ардышев, В.В. Коноводов / Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы VIII региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной 80-летию НГАУ-НСХИ, Новосибирск, 10–11 ноября 2016 года / Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск: «Золотой колос», 2016. – С. 90-93. – EDN XCXXAX.

130. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента/ Л. Г. Куклин, В. И. Сагалов, В. Б. Серебровский и С. П. Шабашов; Под ред. канд. техн. наук С. П. Шабашова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1968. – 140 с.

131. Повышение ресурса рабочих органов молотковых кормодробильных машин / А.Н. Ардышев, Т.В. Лафетова / Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы VII региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 10–11 ноября 2015 года / Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск: Издательский центр «Золотой колос» Новосибирского государственного аграрного университета, 2015. – С. 193-196. – EDN VCCQNZ.

132. Повышение эксплуатационной надежности молотков кормодробильных машин конструктивно-технологическими методами / В. В. Коноводов, Е. В. Агафонова, С. В. Щелоков, В. Ф. Аулов // Труды ГОСНИТИ. – 2018. – Т. 132. – С. 216-224. – EDN YNKKJV.

133. Прокат высокопрочных марок стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mmkk.ru/catalogs/metal_products/magstrong/#8 (дата обращения: 15.01.2019).

134. Разработка и исследование нового материала для упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин индукционной наплавкой / В. Ф. Аулов, В. В. Иванайский, А. В. Ишков [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6(200). – С. 106-111. – EDN AXHIXS.

135. Сабиев, У. К. Показатели эффективности измельчителей фуражного зерна / У. К. Сабиев, В. В. Садов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6(200). – С. 93-99. – EDN BSZFPO.

136. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.

137. Сидашенко А.И. Упрочнение молотков дробилок зерновых кормов типа ДДМ и А1-ДДП/ А.И. Сидашенко, В.М. Москалев// Методы восстановления

изношенных деталей сельскохозяйственных машин. – Москва: МИИСП, 1986. С. 83-86.

138. Ситников, А. А. Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями / А. А. Ситников, А. В. Собачкин, Ю. Н. Камышов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – № 2(92). – С. 29-36.

139. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений /Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – 3-е изд., стер. – Москва: Наука, 1969. – 511 с.

140. Сокол, А.И. Повышение износостойкости кормодробилок/ А.И. Сокол, А.С. Клеван, Ю.А. Власов// Технология и организация производства: науч.-прозв. Журнал. – Киев: УкрНТИ. 1970. №2. – С. 41-43.

141. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий: по хранению и переработке зерна / А.Я. Соколов. М.: Колос, 1967. - 495с.

142. Соппротивление материалов: Учебник для вузов/ Под общ. ред. акад. АН УССР Г.С. Писаренко. – 4-е изд. перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с.

143. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия Власенко Д.А., Левченко Э.П., Вишневский Д.А., Красовский С.А. Современные материалы, техника и технологии. 2016. – № 2 (5). – С. 63-68.

144. Справочник по практическому металловедению /В.Л. Пилюшенко, Б.Б. Винокур, С.Е. Кондратюк и др. – К.: Техника, 1984. – 135 с.

145. Старк, Дж. П. Диффузия в твердых телах/ Пер. с англ. под ред. Л.И. Трусова. – М. Энергия, 1980. – 240 с.

146. Статистическая обработка результатов механических испытаний инструментальных материалов: Метод. рекомендации /Всесоюз. н.-и. инструм. ин-т./ М.И. Зюльков, Б.П. Прибылов. – Москва: ОНТИ ВНИИ, 1977. – 44 с.

147. Степанов, В.В. Некоторые результаты исследований рабочего процесса молотковых дробилок. Сб. науч. тр. Рязанский с-х ин-тут. 1958. Вып.7. с. 73-81.

148. Степанов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степанов, А. В. Шаврин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005 (ГУП ППП Тип. Наука РАН). – 399 с.

149. Сундеев, А. А. Работа молотковой дробилки в замкнутом цикле / А. А. Сундеев, А. П. Барбицкий, С. В. Мерчалов // Совершенствование средств механизации в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1987. – С. 30-40.

150. Сундеев, А. А. Процесс измельчения зерна и его развитие / А. А. Сундеев // Механизация подготовки кормов в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1984. – С. 3-17.

151. Сундеев, А. А. Экспериментальные исследования работы сепаратора с эластичными рабочими органами / А. А. Сундеев // Совершенствование технологий и технических средств для механизации процессов в растениеводстве: Сб. науч. тр. ВГАУ. Воронеж, 1994. – С. 169-172.

152. Тененбаум, А.В. и др. Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев. 1970, вып. №5.

153. Тененбаум, М.М. Износостойкость конструкций и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.

154. Тененбаум, М.М., Бернштейн Д.Б. Вопросы теории и абразивного изнашивания. - в КН.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев: УКР НИИНТИ, 1970, Вып. 1, с. 181-183.

155. Технологические процессы пайки твердосплавного инструмента: Метод. рекомендации /Всесоюз. н.-и. инструм. ин-т; [Исполнитель Г. П. Кузнецова]. – М.: ВНИИ информ. и техн.-экон. исслед. по машиностроению и робототехнике, 1987. – 90 с.

156. Технологические процессы пайки твердосплавного инструмента. Метод. рекомендации ВНИИинструмент. – М., 1987. – 21с.

157. Тимановский А. В. Определение влияния износа молотков на кинематику движения частиц измельчаемого материала // Исследование и конструирование машин для животноводства и кормопроизводства: Сб. науч. трудов. Вып. 8 /ВНИИживмаш – К, 1983.

158. Тимановский, А.В. Обоснование рациональной формы молотка для измельчения зерновых материалов // Исследование и конструирование машин для животноводства кормопроизводства: Сборник науч. Трудов Вып 10 /

ВНИИживмаш – К, 1985.

159. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия/ Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. - 631 с.

160. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – Л., 1975. - 592с.

161. Хаэт, Г.Л. Прочность режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1975, – 167 с.

162. Хлынин, П. П. Совершенствование конструктивно-режимных параметров дробилки молоткового типа: т автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Хлынин Петр Петрович – Оренбург: 2003. – 19 с.

163. Хрущов, М. М. «Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения)». – М.: КРАСАНД. 2012. – 512с.

164. Хусид, С.Д. изнашивание зерна на молотковых мельницах. М.: Заготиздат.1947. - 126 с.

165. Чугуны: Справочник. Под ред. А.Д. Шермана и А.А.Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

166. Чуркин, В.С. Влияние меди на структурообразование и свойства чугуна/ В.С. Чуркин, В.П. Половинчук // Структура и свойства чугуна: Сб.науч. трудов/ АН УССР. – Ин-т проблем литья. – Киев, 1989. – С. 28-33.

167. Ширококов, В.И. Повышение износостойкости молотков зерновых дробилок // В.И. Ширококов, А.Г. Ипатов, Е.В. Харанжевский / Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 1 (34). – С. 69-71.

168. Шуб, И.Г. Исследование технологического процесса измельчения зерна комбикормового производства на молотковой мельнице: дис. канд. техн. наук. М., 1966. – 207 с.

169. Ялпачик, Ф.Е. К расчету оси подвеса молотков кормоизмельчающих аппаратов / Ф.Е. Ялпачик, Г.С Ялпачик //Механизация и электрификация с-х. – Киев, 1987. Вып.65. – С. 46-51.

170. Ялпачик, Ф.Е. Экспериментальные исследования колебаний модели

молотка кормодробилки / Ф.Е. Ялпачик, Г.С. Ялпачик, Г.А. Алексеенко // Актуальные вопросы исследований технологического оборудования в животноводстве. Киев. 1991. – С. 9-17.

171. Ястребенецкий, М. А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами/ М. А. Ястребенецкий, Г. М. Иванова. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 263с.

172. Analysis of the retailoring methods and the workability of deposited surfaces / V. V. Konovodov, A. V. Valentov, E. G. Grigoryeva, K. A. Abdrasulov // Materials treatment: current problems and solutions, Yurga, 26–28 ноября 2015 года / National Research Tomsk Polytechnic University. Vol. Volume 125. – Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016. – P. 12035. – EDN VXXGXD.

173. Dowson D. Progress in tribology: an historical perspective. - In: New Directions in Tribology/Ed by I. M. Hutchings. Buru. St. Edmunds and London, MEP., 1997. D 4-20

174. Goncharenko, V. V. The creation of high-impact permanent connection (of steel and hard alloy) with the soldering, properties and characteristics of this type of connection / V. V. Goncharenko, I. G. Shkurin, Yu. L. Mikhaylova // Traktori i pogonske mašine. – 2017. – Vol. 22. – No 1-2. – P. 82-85. – EDN YHRFQI.

175. Grinding Machine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://muyanggroup.en.ec21.com/Grinding_Machine--6580566.html (дата обращения: 23.10.2017).

176. Grinding units [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.aarsen.com/HOME/PRODUCTS_&_PROCESSES/Grinding_units/849 / (дата обращения: 10.10.2018).

177. Gruber Hammermühlen der Serie Xtreme [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.getreidetechnik.com/p/getreide-mahlen-quetschen-mischen/mahlmischtechnik/hammermuehle-xtreme> (дата обращения: 10.10.2018).

178. Hammer Mill DFZC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.buhlergroup.com/global/en/products__hammer-mill-dfzc.htm (дата обращения: 04.10.2018).

179. Hammer mills [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.andritz.com/products-en/group/feed-biofuel/hammer-mills> (дата обращения: 25.10.2017).

180. Kolečák, R. Investigation of flux-less soldering of metal matrix composite and ceramics by use of Zn solder / R. Kolečák, I. Kostolný // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 759 KEM. – P. 29-34. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.759.29. – EDN YGJGQH.

181. Kruger W.S. Basic Principles involved in design of the feed gringer / W.S. Kruger // Agricultural Engineering. 1972. – №7. – P. 25-26.

182. Maeda K., Childs T.H.C. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings // Journal of Materials Processing Technology – 149 (2004) – P. 609–615

183. Meiji Machine Co, LTD. СНИО-КИ, Tokio 104. Japan 1995

184. Milling & Grinding [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dinnissen.nl/process-technology/milling-a-grinding/s/3097> (дата обращения: 20.09.2018).

185. On the Problem of Wear Resistant Coatings Separation from Tools and Machine Elements / S. I. Petrushin, R. H. Gubaidulina, A. V. Likholat, S. V. Gruby // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yurga, 21–23 мая 2015 года. Vol. 91. – Yurga: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012048. – DOI 10.1088/1757-899X/91/1/012048. – EDN VALBLP.

186. Research of weight and linear wear from resource indicators of cultivator paws hardened by combined method / M. O. Vasilenko, I. L. Rogovskii, S. A. Voinash [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Vol. Volume 677. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 32025. – DOI 10.1088/1755-1315/677/3/032025. – EDN JGPPVO.

187. Silyakov, S. L. Surface Cladding by Combined Use of Metallurgy and Induction Heating / S. L. Silyakov, V. I. Yukhvid, V. F. Aulov // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. – Vol. 28. – No 3. – P. 213-

215. – DOI 10.3103/S1061386219030154. – EDN HLVCEJ.

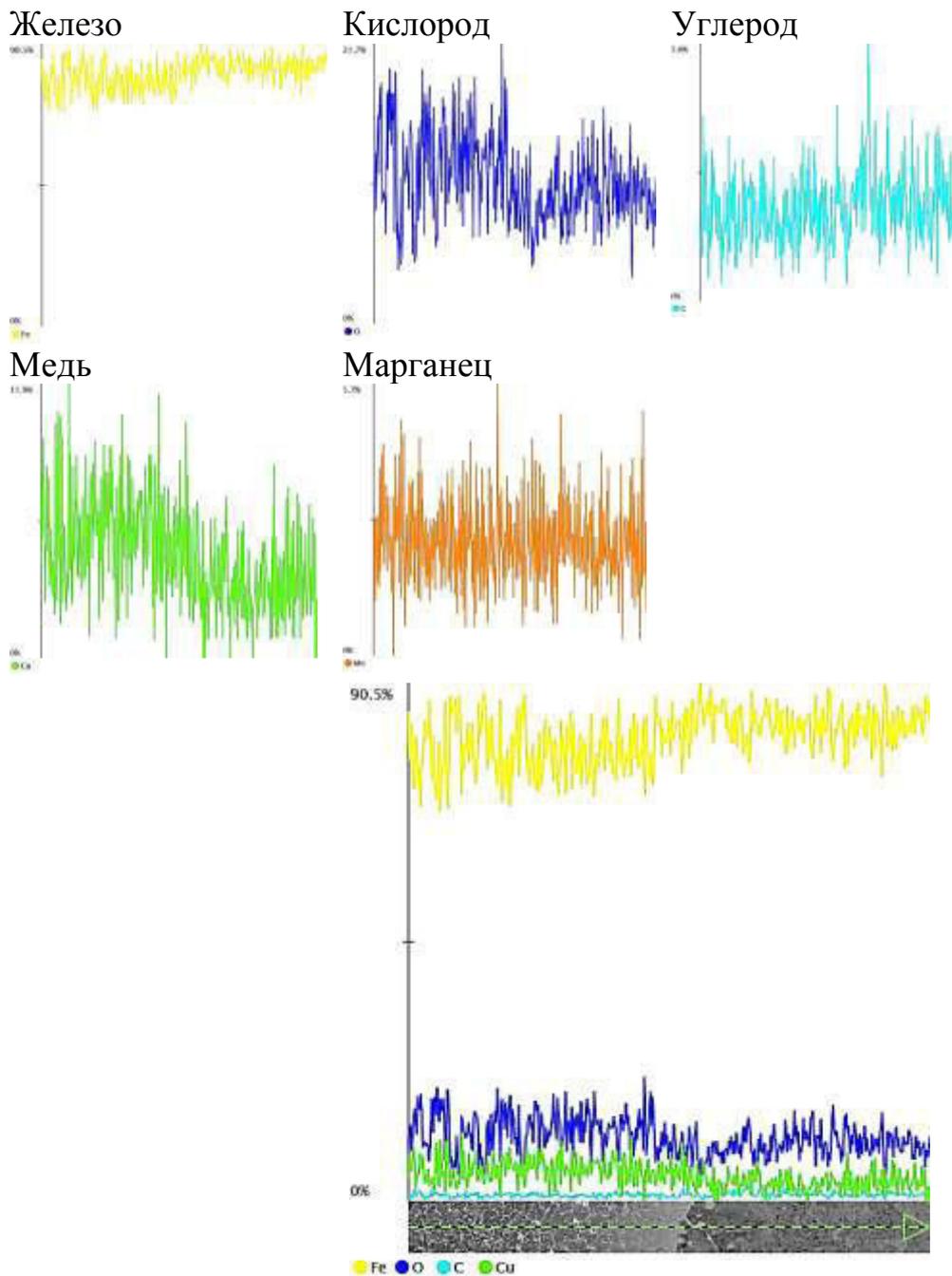
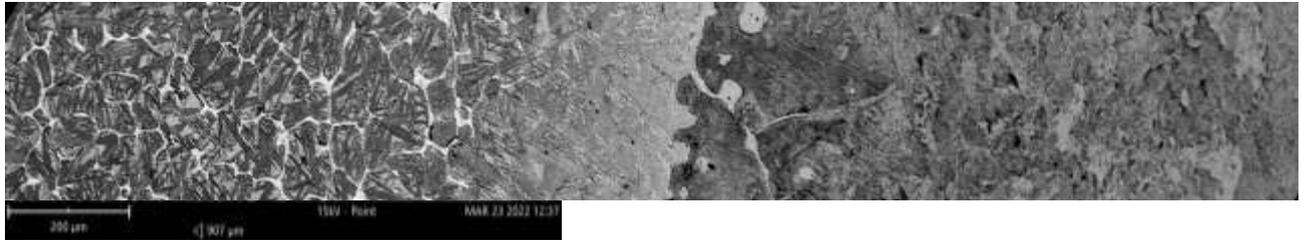
188. Technological improvement of surfacing of parts of hammer crushers used in coke-chemical industry / N. N. Malushin, D. V. Valuev, D. P. Ll'yaschenko [et al.] // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927 MSF. – P. 168-175. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.168.

189. Valentov, A. V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts / A. V. Valentov, V. V. Konovodov, E. V. Agafonova // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 28-31. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.28. – EDN RFOYXV.

Распределения химических элементов в диффузионных зонах

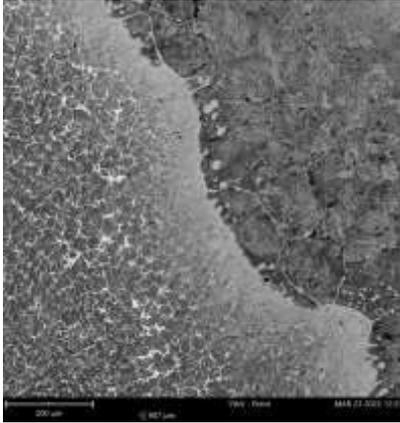
Распределение химический элементов в диффузионной зоне

«сталь Ст3– FeC-припой»



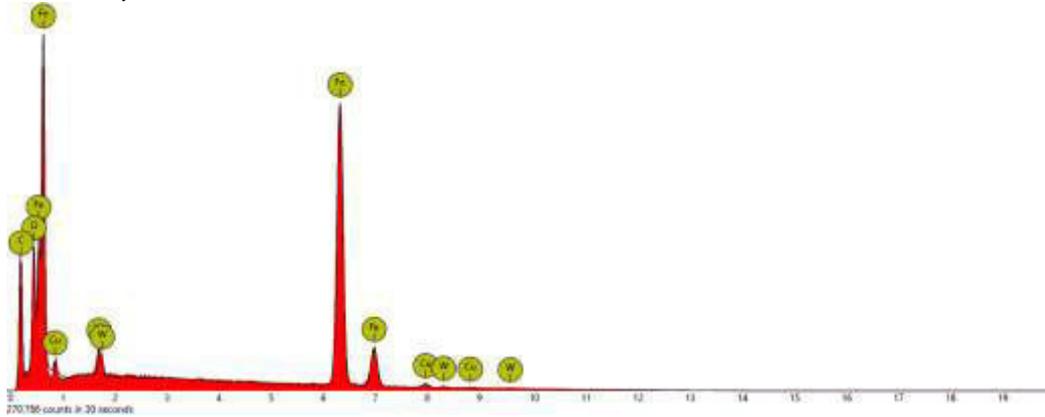
Комбинированная линейная развертка «сталь Ст3– FeC-припой»

Точка 1

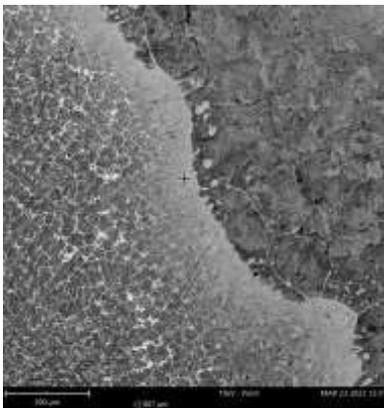


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	59.57	81.29
8	O	Oxygen	29.74	11.63
6	C	Carbon	8.69	2.55
29	Cu	Copper	1.51	2.34
74	W	Tungsten	0.49	2.19

FOV: 907 μm

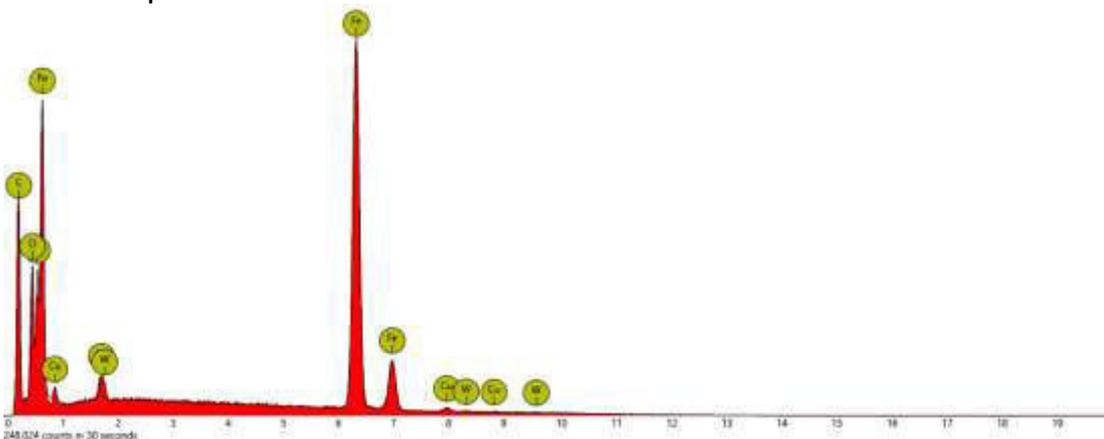


Точка 2

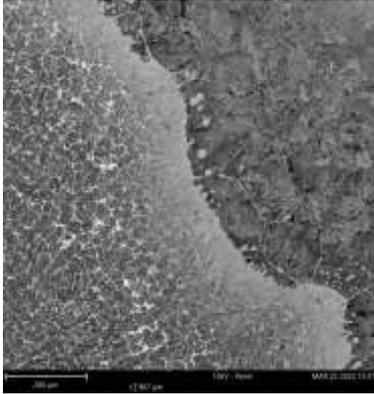


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	61.45	83.94
8	O	Oxygen	25.45	9.96
6	C	Carbon	11.78	3.46
29	Cu	Copper	1.12	1.75
74	W	Tungsten	0.20	0.89

FOV: 907 μm

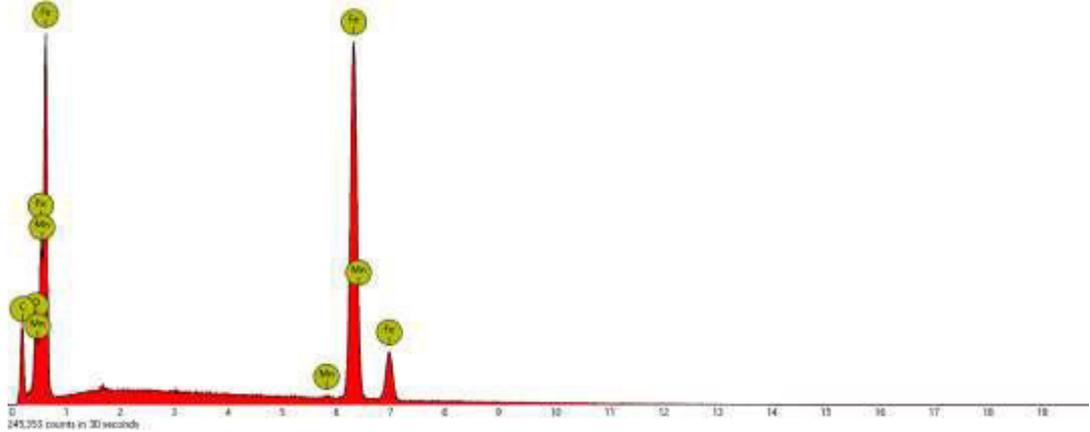


Точка 3

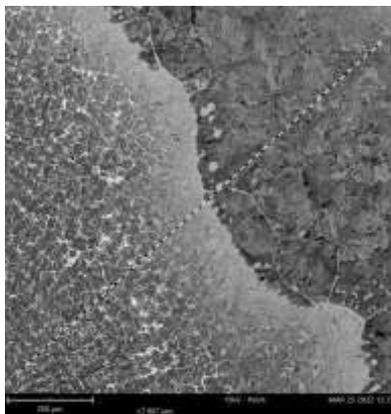


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	77.51	92.37
8	O	Oxygen	16.70	5.70
6	C	Carbon	5.30	1.36
25	Mn	Manganese	0.49	0.57

FOV: 907 μm

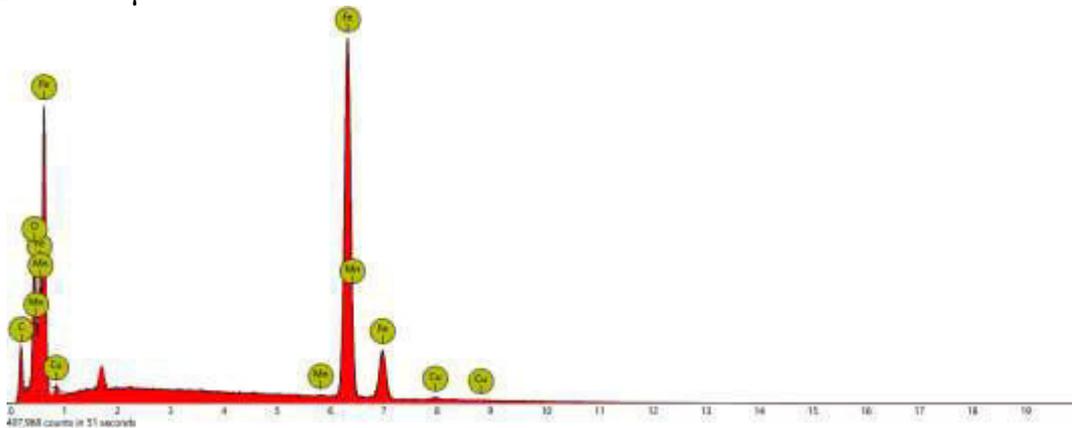


Линейное измерение

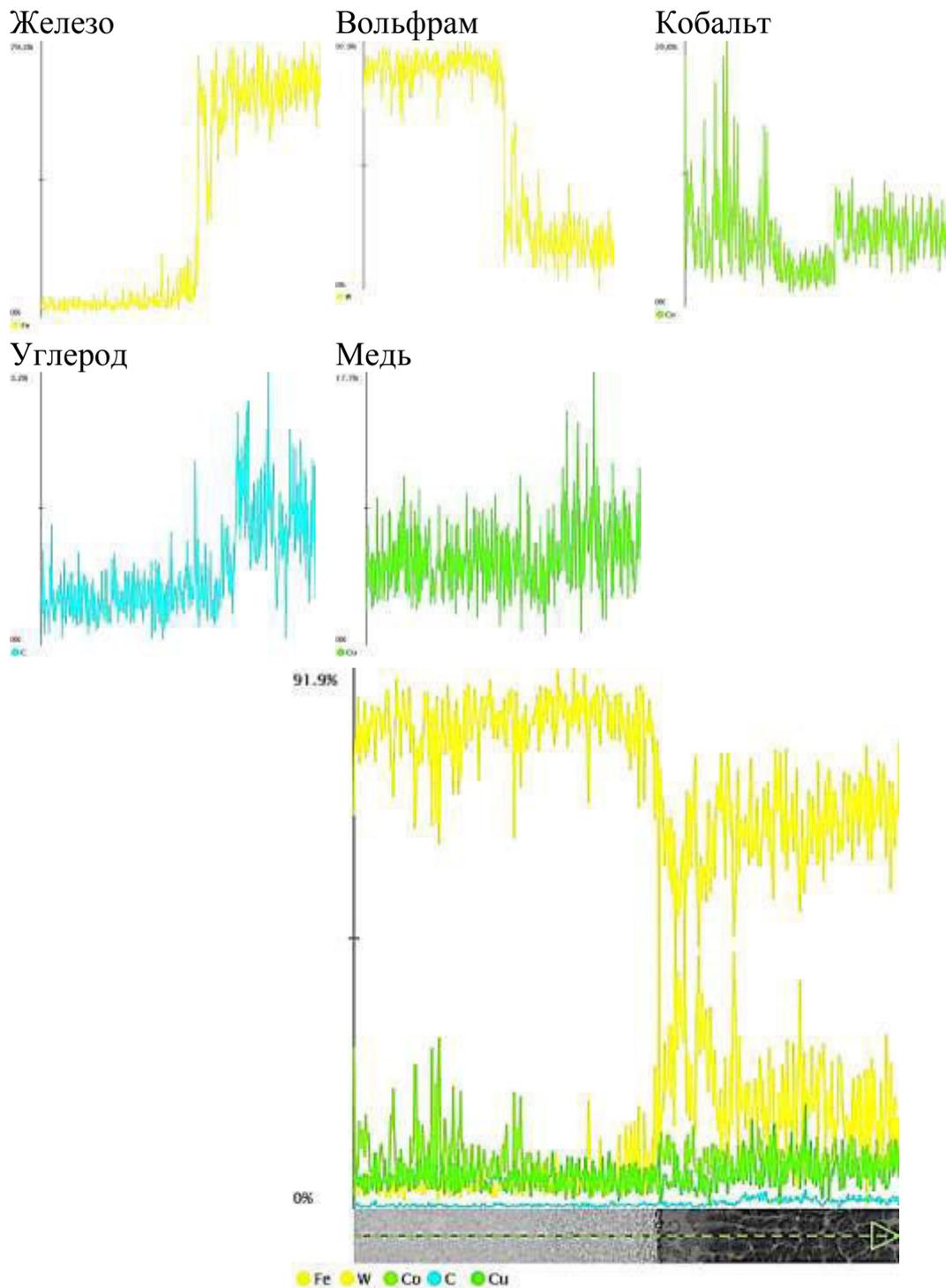
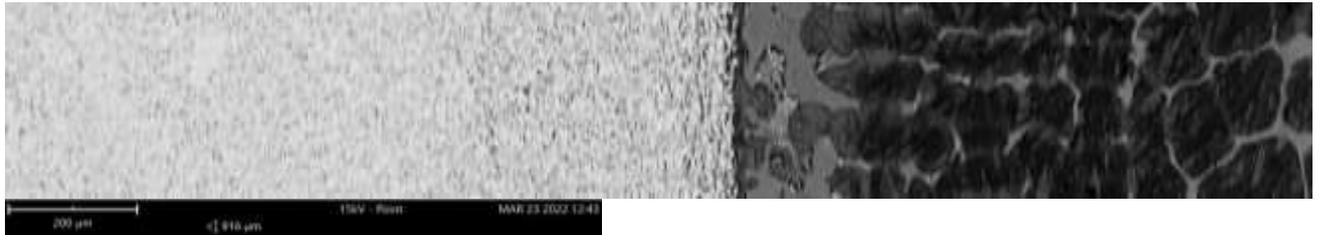


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	67.90	87.42
8	O	Oxygen	28.05	10.34
29	Cu	Copper	0.77	1.13
6	C	Carbon	3.08	0.85
25	Mn	Manganese	0.20	0.25

FOV: 907 μm



Распределение химических элементов в диффузионной зоне
«твердый сплав ВК8 – FeC-припой»

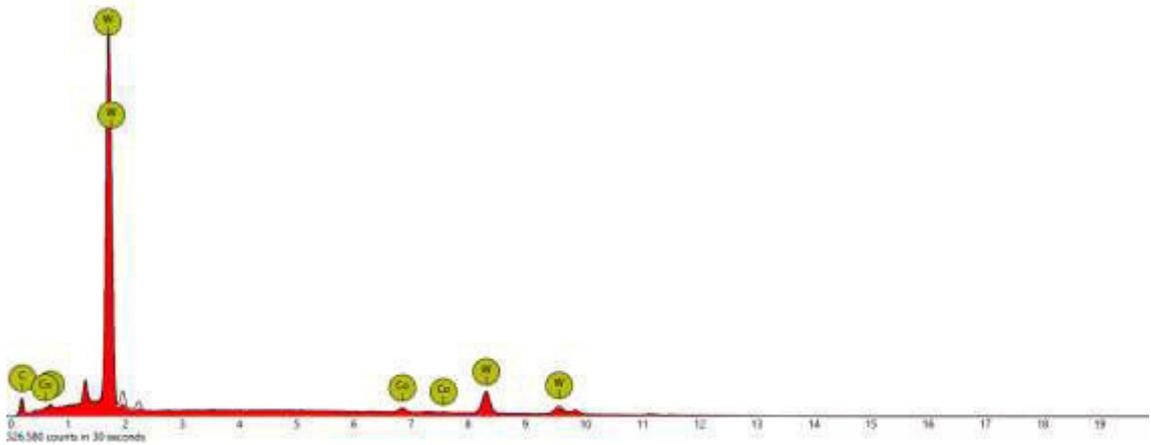


Комбинированная линейная развертка «твердый сплав ВК8 – FeC-припой»

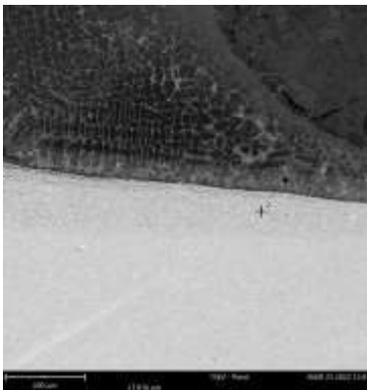
Точка 1



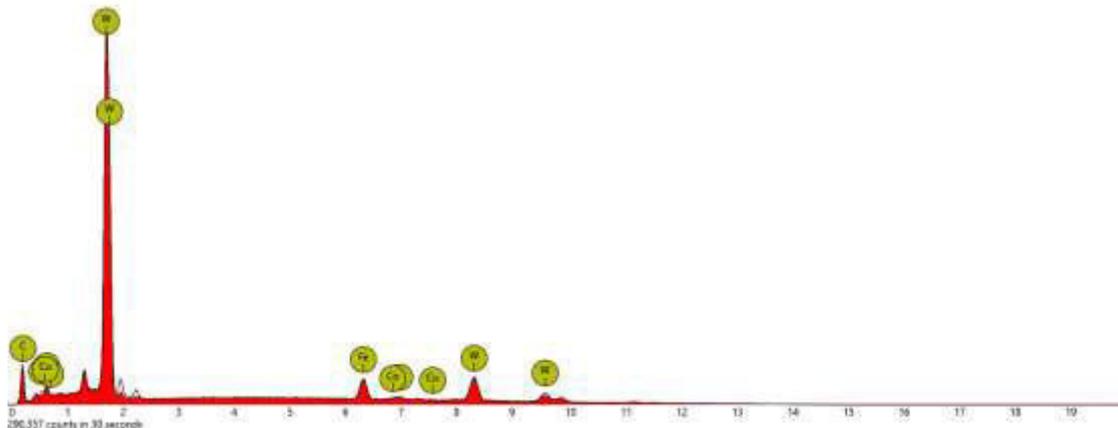
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
74	W	Tungsten	79.87	96.12
27	Co	Cobalt	7.49	2.89
6	C	Carbon	12.64	0.99

FOV: 916 μm 

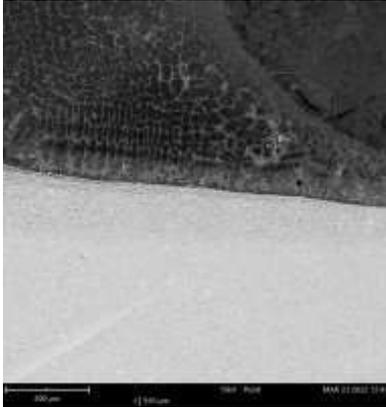
Точка 2



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
74	W	Tungsten	58.34	87.50
26	Fe	Iron	21.85	9.96
6	C	Carbon	18.25	1.79
27	Co	Cobalt	1.56	0.75

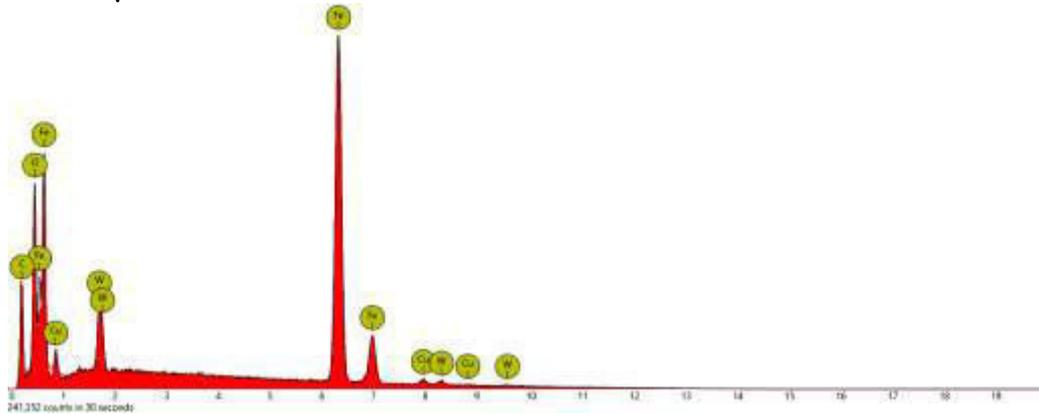
FOV: 916 μm 

Точка 3

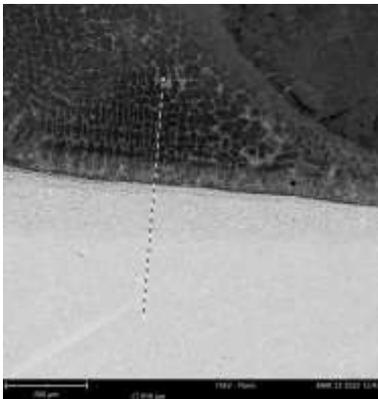


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	56.38	76.70
8	O	Oxygen	35.52	13.84
74	W	Tungsten	1.29	5.76
29	Cu	Copper	1.35	2.10
6	C	Carbon	5.46	1.60

FOV: 916 μm

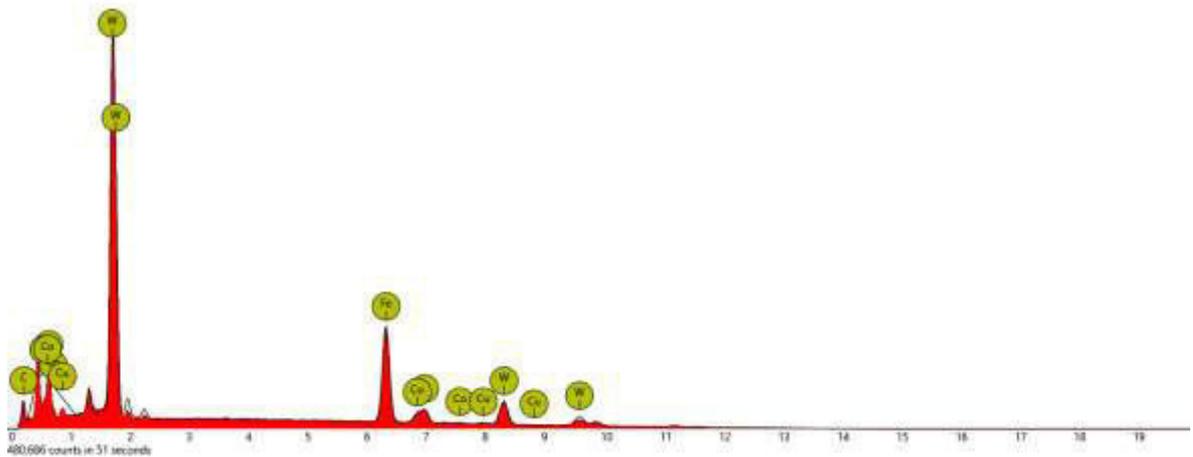


Линейное измерение



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
74	W	Tungsten	32.16	62.29
26	Fe	Iron	54.95	32.34
27	Co	Cobalt	5.73	3.56
29	Cu	Copper	1.67	1.12
6	C	Carbon	5.49	0.69

FOV: 916 μm



**Измерение микротвердости паяного соединения
«твердый сплав – FeC-припой – сталь»**

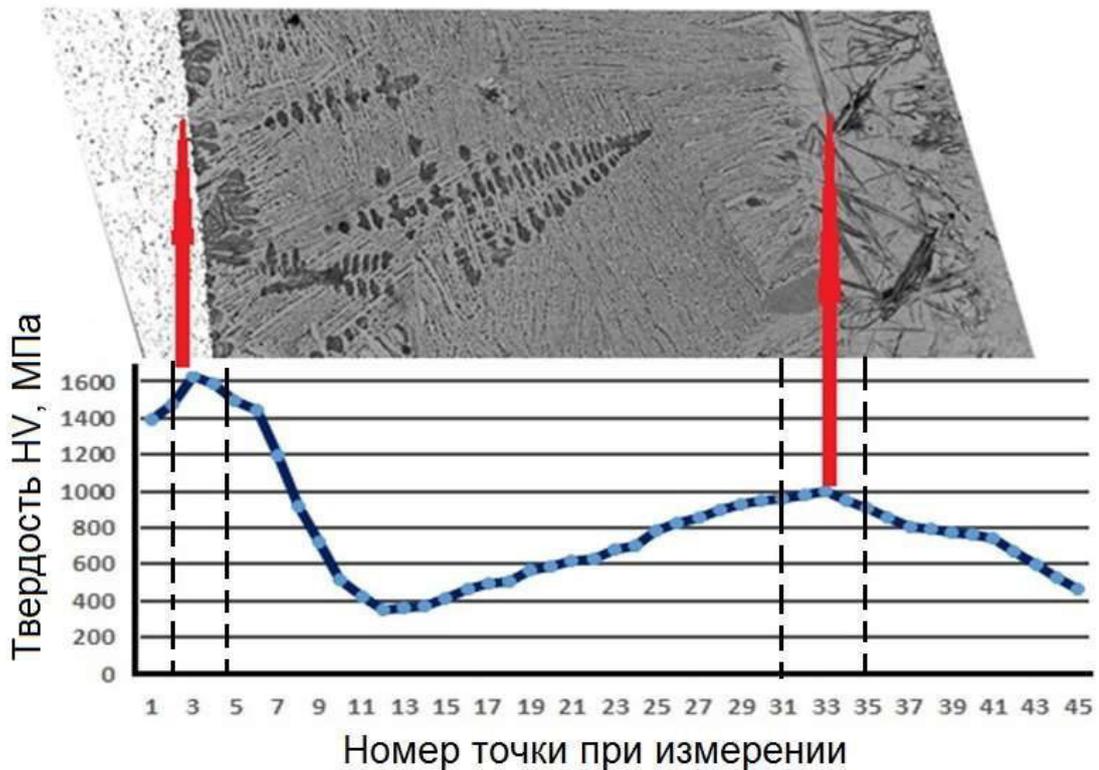


График зависимости микроструктуры и микротвердости

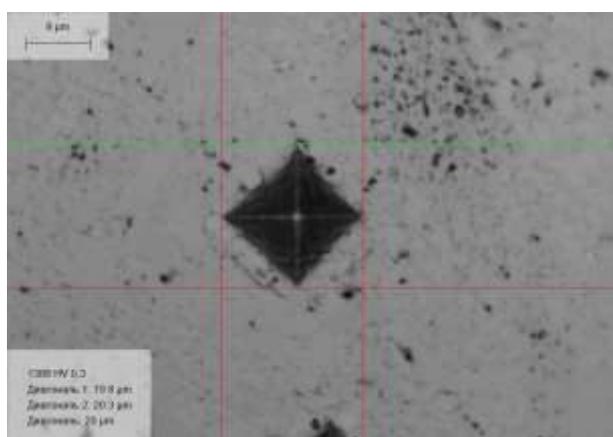
Номер точки при измерении	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Микротвердость, МПа	1388	1471	1626	1592	1492	1439	1200	923	726

Номер точки при измерении	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Микротвердость, МПа	512	425	352	357	370	410	461	490	510

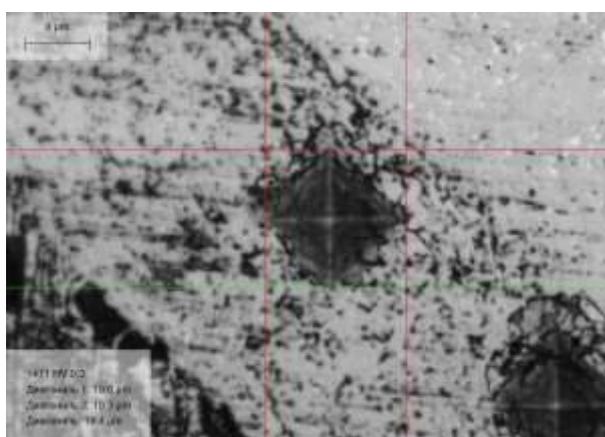
Номер точки при измерении	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Микротвердость, МПа	570	586	614	630	679	705	788	823	858

Номер точки при измерении	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Микротвердость, МПа	893	927	945	964	983	1002	953	904	855

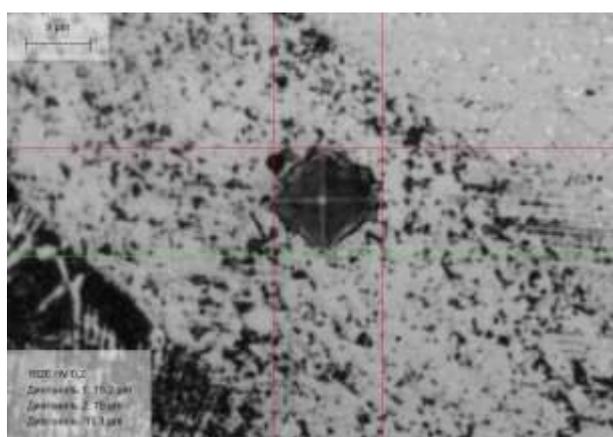
Номер точки при измерении	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Микротвердость, МПа	806	790	775	759	744	673	602	531	459



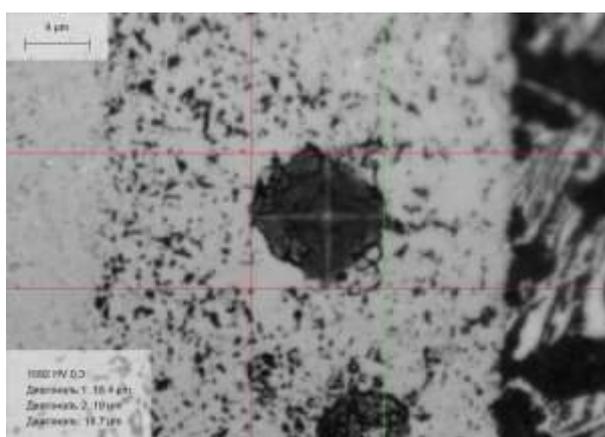
Точка 1 – Твердый сплав



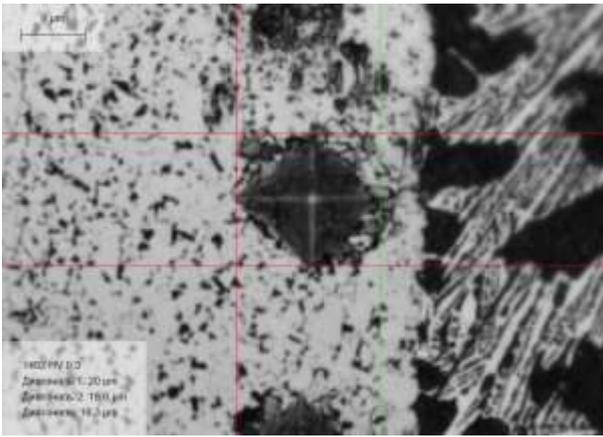
*Точка 2 – Диффузионная зона
«твердый сплав – FeC-припой»*



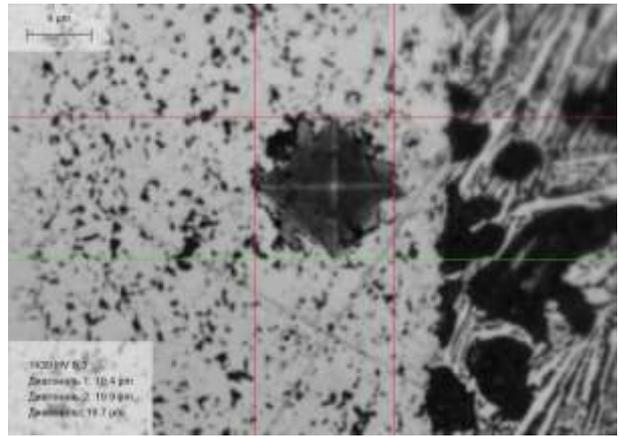
*Точка 3 – Диффузионная зона
«твердый сплав – FeC-припой»*



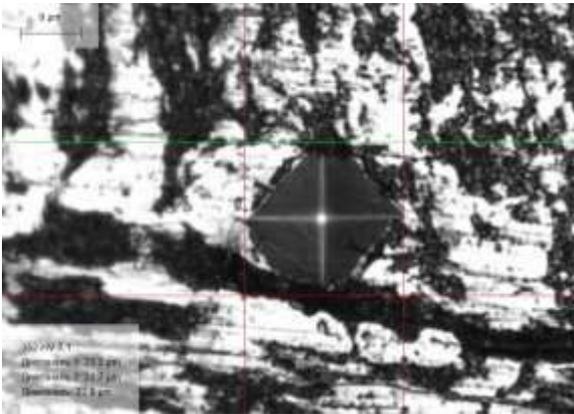
*Точка 4 – Диффузионная зона
«твердый сплав – FeC-припой»*



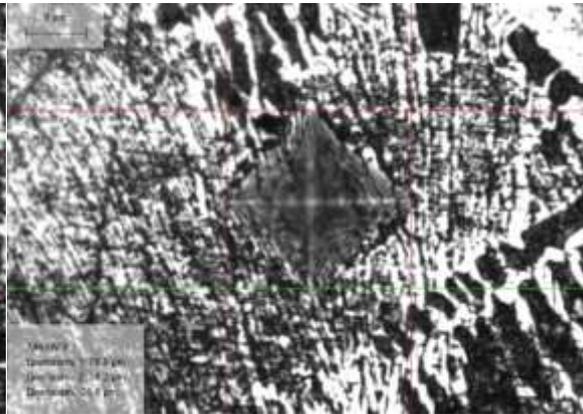
Точка 5 – Диффузионная зона
«твердый сплав – FeC-припой»



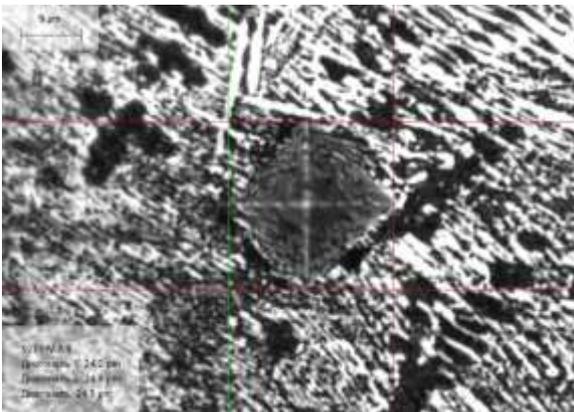
Точка 6 – Диффузионная зона
«твердый сплав – FeC-припой»



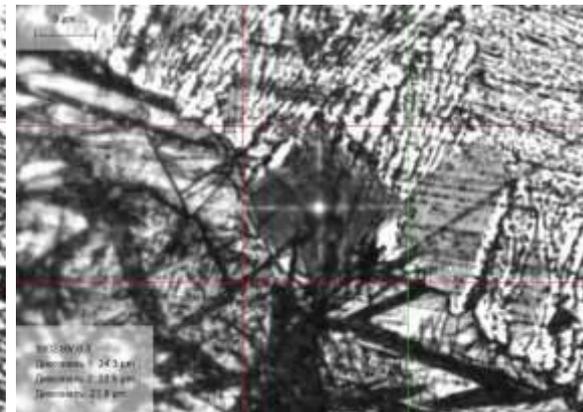
Точка 12 – FeC-припой



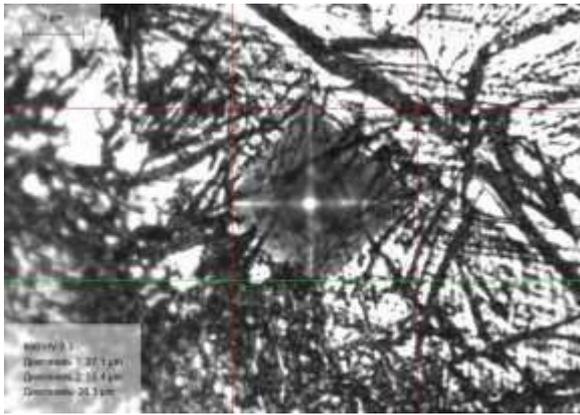
Точка 25 – FeC-припой



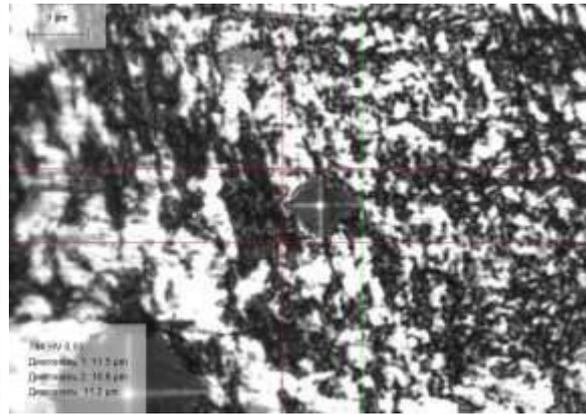
Точка 29 – FeC-припой



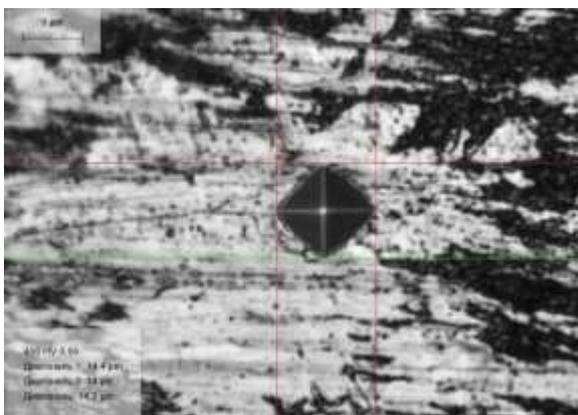
Точка 33 – Диффузионная зона
«FeC-припой – сталь Ст3»



*Точка 34 – Диффузионная зона
«FeC-припой – сталь Ст3»*



Точка 41 – Сталь Ст3



Точка 45 – Сталь Ст3

Определение коэффициентов предельного износа S_0 и предельной наработки Q_0

Номер наблюдения	S, мм ²	Q, т	S ²	Q ²	SQ	QS ²	SQ ²	S _{теор}	S - S _{теор}	(S - S _{теор}) ²	Отн. погр	B %
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	4	100	16	10000	400	1600	40000	3,766589	0,233411	0,054481	0,061969	6,196872
3	10	200	100	40000	2000	20000	400000	8,244299	1,755701	3,082488	0,212959	21,29595
4	12	250	144	62500	3000	36000	750000	10,81587	1,184126	1,402155	0,10948	10,94804
5	13	300	169	90000	3900	50700	1170000	13,65551	-0,65551	0,429688	0,048003	4,800303
6	20	400	400	160000	8000	160000	3200000	20,3261	-0,3261	0,106341	0,016043	1,604339
7	32	500	1024	250000	16000	512000	8000000	28,75364	3,246361	10,53886	0,112903	11,29026
8	38	600	1444	360000	22800	866400	13680000	39,73753	-1,73753	3,019025	0,043725	4,372526
9	50	700	2500	490000	35000	1750000	24500000	54,64888	-4,64888	21,61207	0,085068	8,506814
10	75	800	5625	640000	60000	4500000	48000000	76,05273	-1,05273	1,108242	0,013842	1,384211
11	120	900	14400	810000	108000	12960000	97200000	109,3695	10,63055	113,0085	0,097199	9,71985
12	160	1000	25600	1000000	160000	25600000	1,6E+08	168,3796	-8,37965	70,21847	0,049766	4,976638
среднее значение			4285,167	326041,67	34925	3871391,667	29745000	301,4581				
								883,0654				

Построение зависимости величины износа от наработки молотка

Номер наблюдения	Q, т	Упрочненные молотки		Серийные молотки	
		$S_{\text{факт}}$	$S_{\text{теор}}$	$S_{\text{завод}}$	$S_{\text{серий}}$
1	0	0	0	0	0
2	100	6	3,766589	23,37079	20
3	200	10	8,244299	65	65
4	300	16	13,65551	160	160
5	400	22	20,3261	594,2857	-
6	500	35	28,75364	-	-
7	600	45	39,73753	-	-
8	700	50	54,64888	-	-
9	800	75	76,05273	-	-
10	900	120	109,3695	-	-
11	1000	160	168,3796	-	-
12	1100	-	301,4581	-	-
13	1200	-	883,0654	-	-

Примечание.

$S_{\text{серий}}$ – значения износа серийных молотков по результатам производственных испытаний;

$S_{\text{завод}}$ – теоретические значения серийных молотков;

$S_{\text{факт}}$ – значения износа упрочненных молотков по результатам производственных испытаний;

$S_{\text{теор}}$ – теоретические значения упрочненных молотков.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 192763

Молоток дробилки

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)*

Авторы: *Агафонова Екатерина Васильевна (RU), Коноводов Виталий Васильевич (RU)*

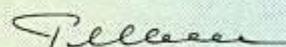
Заявка № 2019122754

Приоритет полезной модели 15 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 30 сентября 2019 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 15 июля 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



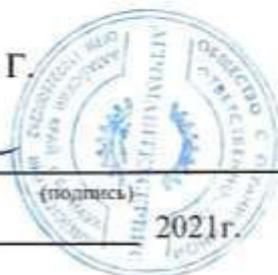
УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
международной деятельности
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
д.б.н., доцент Камалдинов Е. В.

« » _____ 2021г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Агромаштехсервис»,
г. Барнаул
Желтунов М. Г.

« » _____ 2021г.

Акт

внедрения результатов научно-исследовательской работы

Мы нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ к.т.н., профессор Коноводов Виталий Васильевич, старший преподаватель Агафонова Екатерина Васильевна с одной стороны и ООО «Агромаштехсервис» в лице директора Желтунова Михаила Григорьевича составили настоящий акт о результатах испытания и внедрения молотков кормодробильной машины (патент RU 192763) при измельчении зерновых материалов (ячмень, пшеница, овес, кукуруза).

По результатам испытаний получен положительный экономический эффект производительность процесса кормоприготовления увеличилась на 20...28%, удельное энергопотребление снизилось на 25...30 кВт/т.ч, а долговечность молотка увеличилась в 3...4 раза.

По результатам проведенных испытаний предложенная ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ конструкция молотка кормодробильной машины рекомендована к внедрению.

ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

к.т.н., профессор

(подпись)

В.В. Коноводов

старший преподаватель

(подпись)

Е.В. Агафонова

ООО «Агромаштехсервис»,
г.Барнаул

директор

(подпись)

М.Г. Желтунов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и международной деятельности ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
д.б.н., доцент Камалдинов Е. В.


(подпись)
« _____ » 2021г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО НПП
«СИБЭЛЕКТРОТЕРМ»
г. Новосибирск

Карпов А.А.

(подпись)
« _____ » 2021г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы

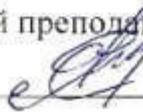
Мы нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ к.т.н., профессор Коноводов Виталий Васильевич, старший преподаватель Агафонова Екатерина Васильевна с одной стороны и ООО НПП «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» в лице генерального директора Карпова Анатолия Александровича и начальника производства Жабина Александра Васильевича, составили настоящий акт о том, что технология изготовления (восстановления) дробильных молотков с упрочнением рабочих углов армированием твердосплавными вставками (патент RU 192763) и пайкой-наплавкой легированным железоуглеродистым сплавом (патент RU 5036802) принята к внедрению в ООО НПП «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ».

ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

к.т.н., профессор


(подпись) В.В. Коноводов

старший преподаватель


(подпись) Е.В. Агафонова

ООО НПП «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ»

г. Новосибирск
начальник производства


(подпись) А.В. Жабин
(ФИО)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
канд. техн. наук, доцент

В.Н. Бабин
« 04 » июня 2024 г.

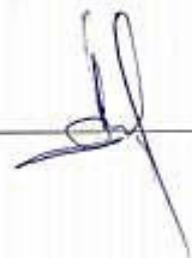
А К Т

о внедрении в образовательный процесс ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ результатов диссертационного исследования

Результаты диссертационного исследования на соискание учёной степени кандидата технических наук Агафоновой Екатерины Васильевны по теме «Повышение эффективности работы зернодробилок комбинированным упрочнением молотков» внедрены в учебный процесс для студентов Инженерного института, обучающихся направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия при чтении лекций и проведении лабораторно-практических занятий по курсу «Материаловедение и технология конструкционных материалов» по темам «Формирование структуры металлов при кристаллизации. Макро- и микродефекты» и «Технология конструкционных материалов».

Настоящий акт составлен на основании рабочих программ и тематических планов лекций и лабораторно-практических занятий по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

Директор Инженерного института
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ,
д-р техн. наук, доцент



Ю.А. Гуськов

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ
ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЦЕССУ
ПАЙКИ МОЛОТКОВ ЗЕРНОДРОБИЛОК

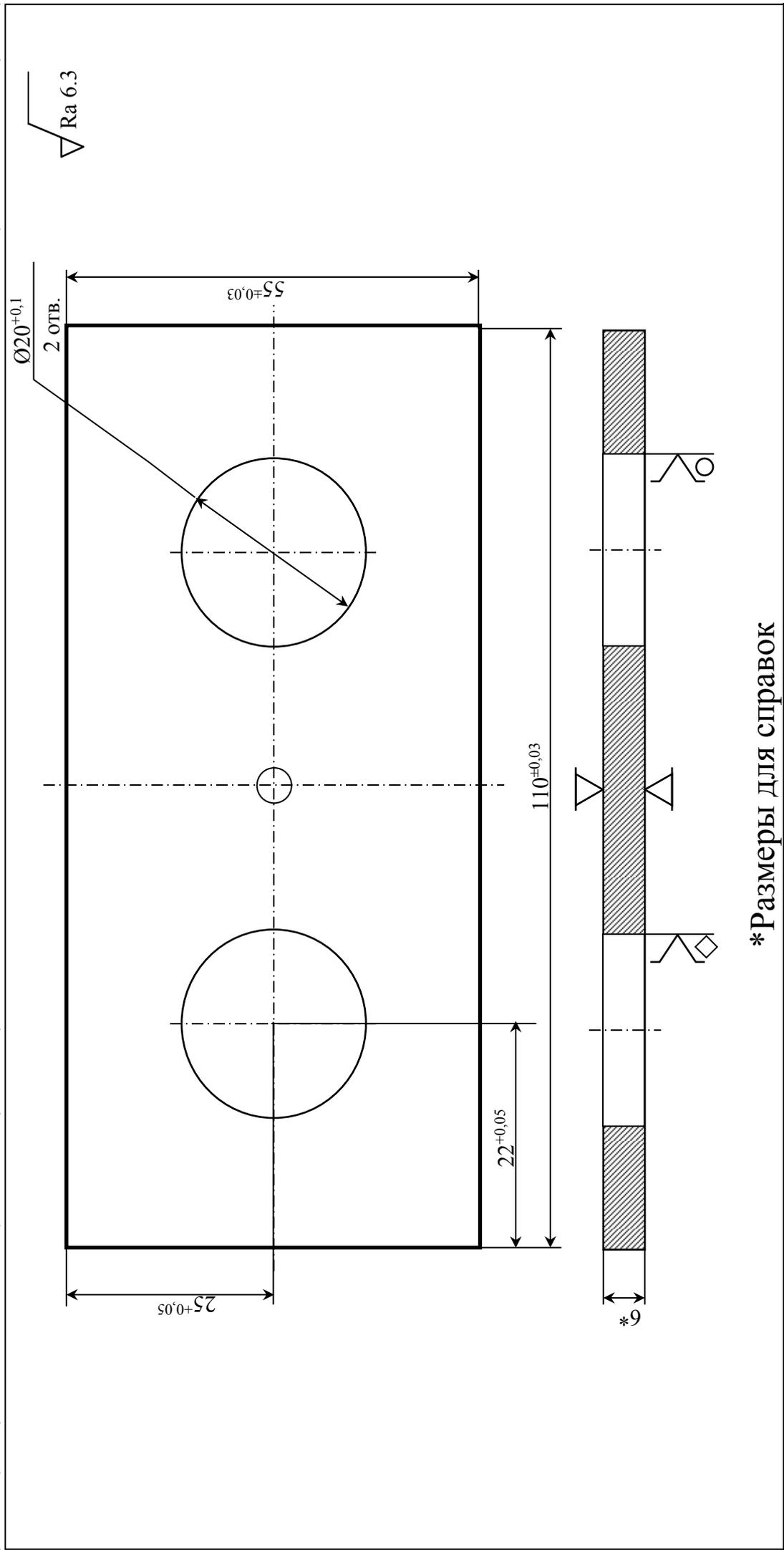
Дубл.			
Взам.			
Подл.			

Разраб.	Агафонова Е.В.
Н. контр.	Коноводов В.В.

НИГАУ
кафедра НИИРМ

НИИРМ 000015КЭ

Молоток



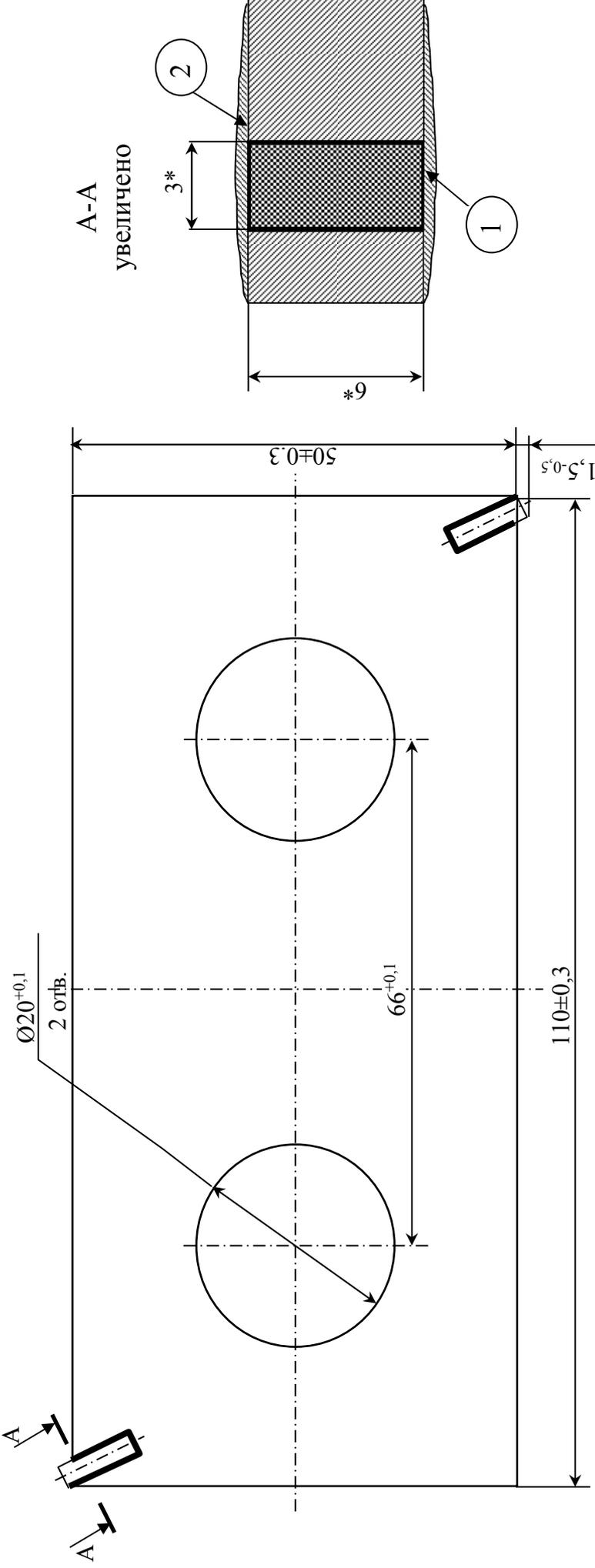
Дубл.	
Взам.	
Подл.	

Разраб.	Агафонова Е.В.
Н. контр.	Коноводов В.В.

НГАУ
кафедра НИРМ

НИРМ 000000

Молоток



1. Выступание твердосплавных пластин из корпуса молотка не более 1,5 мм.
 2. Непропад более 20% не допускается.
 3. Наличие трещин в паяном соединении не допускается.
 4. Допускается на даковых поверхностях 1 и 2 налив припой до 0,2 мм.
 5. Паяный молоток очистить от окалины.
 6. Твердость наплавленных поверхностей НРС 50...56
- *Размеры для справок

Дубл.	Взам.	Подл.											НИРМ 000003МК								
			НИГАУ кафедра НИРМ																		
			Обозначение документа																		
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код. наименование операции		СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	К шт.	Т пз	Т шт.				
Б	К/М		Наименование детали, сб. единицы или материала		Обозначение код												ЕН	ЕВ	ЕН	КИ	Н. пасх.
А 01			030	Контрольная							1		40	1000		5,2	16,9				
Б 02					Контролер-упаковщик 4																
Т 03				Твердомер ТК-2, штангенциркуль ШЦ-П, весы																	
О 04				Контролировать отверстия и линейные размеры, контролировать паяные соединения																	
05																					
А 06				040 Упаковочная																	
Б 07					Контролер-упаковщик 4						1	80	40	1000		2,9	5,1				
О 08				Упаковывать молотки в комплекты по 40 шт., разница по массе молотков в комплекте не более 5г.																	
09																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
			МК																		