

На правах рукописи



АГАФОНОВА ЕКАТЕРИНА ВАСИЛЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗЕРНОДРОБИЛОК
КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ МОЛОТКОВ**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ).

Научный руководитель: профессор, кандидат технических наук
Коноводов Виталий Васильевич

Официальные оппоненты: **Ситников Александр Андреевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
Иванайский Виктор Васильевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Защита состоится « 24 » декабря 2024 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, СФНЦА РАН

Отзыв на автореферат, заверенный печатью вашего учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, СФНЦА РАН (ДС 24.1.211.01), а/я 463. Телефон (факс): 8(383) 348-12-09; e-mail: sibi-me@sf sca.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://www.sf sca.ru>, <https://vak.minobr nauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вахрушев Владимир Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 сплавам 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 эффективности работы

зернодробилок, возможно путем повышения ресурса молотков, с комбинированным упрочнением 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 ресурса. Это позволяет повысить производительность зернодробилок в процессе кормоприготовления и снизить удельное энергопотребление.

Методология и методы исследования. Основой для проведения теоретических и экспериментальных исследований являлся подход, обеспечивающий анализ изменений в структуре паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь» в процессе изнашивания рабочих кромок молотков зер-

нодробилок. 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, упроченных 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.

Реализация результатов исследования. 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 инженер-

но-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 Раднаева 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, указана степень разработанности темы в научной литературе, сформулированы цель, объект и предмет диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные конструкции зернодробилок молоткового типа, проведен анализ условий работы рабочих органов и факторы, влияющие на их изнашивание, приведен анализ материалов, технологий изготовления молотков, сделан обзор основных способов повышения эффективности работы зернодробилок.

В процессе работы зернодробилок частицы измельчаемого продукта ударяются о молотки, а также скользят по их поверхностям. В течение часа молоток воспринимает 10...50 млн. ударов с силой 10...20 кг, что приводит к пластической деформации и усталостным разрушениям.

Взаимодействие молотка на высоких скоростях (в современных конструкциях зернодробилок окружная скорость молотков колеблется в пределах 40...120 м/с) с дробимой средой приводит к быстрому изнашиванию передней (лобовой) грани молотка. Износу подвержены вершины углов, в результате чего поверхность принимает вид кривой переменного радиуса. Из-за износа увеличивается зазор между молотком и декой, что сильно сокращает зону воздействия молотков на обрабатываемый материал и приводит к снижению произво-

длительности зернодробилок на 30...45% и увеличению энергопотребления на 25...35%.

Проведенные ранее исследования молотков, выполненных из различных материалов (сталей 65Г, 30ХГСА, У8А, 110Г13Л, 30ХГСА, 12Х13А, HARDOX500, конструкционных сталей с цементацией на различные глубины, закалкой в электролите, наплавкой и напылением, а также применение трехслойного проката и т. д.) не выявили реальных путей значительного повышения ресурса молотков зернодробилок. Предлагаемые до настоящего времени способы повышения ресурса молотков не нашли широкого применения на практике, по причинам их недостаточной эффективности и технологичности.

Опираясь на ранее проведенные исследования была выдвинута гипотеза, о возможности повышения ресурса молотков зернодробилок конструктивно-технологическим методом за счет комбинированного упрочнения рабочих кромок молотков твердым сплавом, закрепленного индукционной пайкой с применением специального FeC-припоя. FeC-припой разработан коллективом кафедры «Ремонта машин и технологии металлов» Новосибирского ГАУ под руководством В.В. Коноводова (патент RU 2076795 С1).

Во второй главе проведен теоретический анализ изменения профилей молотков зернодробилок в процессе изнашивания и установлены закономерности изнашивания молотков от наработки.

Теоретический анализ изменения профилей молотков зернодробилок 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 преобладающий износ наблюдается только в направлении уменьшения длины молотка.

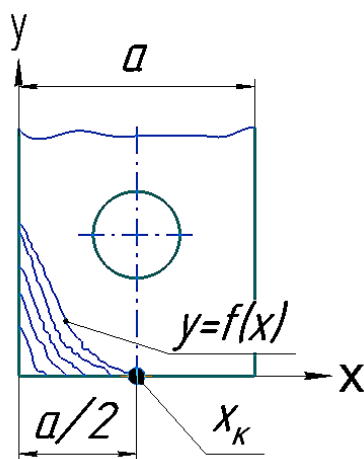


Рисунок 1 - Профильные кривые изменения формы ударной части молотка

$y = f(x)$). При этом площадь определяется уравнением:

Определение износа молотка проводили графоаналитическим методом путем построения профильных кривых для определения площади изношенного участка молотка. Количественная оценка при таком методе определения износа молотков производится по потере площади, образованной первоначальным профилем (прямыми $x = 0$, $y = 0$, представленными на рисунке 1) и профилем, полученным в результате изнашивания (кривая

$$S = \int_0^{x_k} f(x) dx \quad (1)$$

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

Для разработки конструктивно-технологических мероприятий с целью повышения ресурса молотков необходимо определить связи между параметрами, описывающими процесс изнашивания молотков от наработки. Зависимость между величиной износа S и наработкой Q может быть представлена математической моделью прогнозирования предельного износа от наработки молотков.

Для построения математической модели зависимости износа от наработки зададим коэффициент предельного износа S_0 при приближении, к которому устремляется к минус-бесконечности параметр Q и коэффициент предельной наработки Q_0 , при приближении к которому к бесконечности устремляется параметр S . В этом случае, используя уравнение гиперболы, можем записать уравнение в общем виде:

$$(S + S_0)^{a_s} (Q_0 - Q)^{a_Q} = A, \quad (2)$$

где a_s , a_Q и A – показатели, характеризующие свойства молотка и измельчаемого продукта, а также взаимодействие между ними.

При $a_s = a_Q$ из уравнения (2) можно получить зависимость S от Q :

$$(S + S_0)(Q_0 - Q) = A. \quad (3)$$

При нулевом значении наработки можно считать износ нулевым $S(0) = 0$, то есть $S = Q = 0$ находим значение $A = -S_0 Q_0$, тогда формулу (3) можно представить в виде:

$$SQ = SQ_0 - S_0 Q. \quad (4)$$

Для получения линейной зависимости введем вспомогательную величину $Z = SQ$ и получим линейную модель зависимости Z от S и Q :

$$Z = Q_0 S - S_0 Q, \quad (5)$$

в которой можно найти по методу наименьших квадратов значения коэффициентов S_0 , Q_0 .

Для оптимизации модели с учетом результатов наблюдений определим функцию $L(S_0, Q_0)$ как сумму квадратов разности фактических значений Z_i и теоретических, рассчитанных по формуле (5):

$$L(S_0, Q_0) = \sum_{i=1}^n (S_i Q_i - (Q_0 S_i - S_0 Q_i))^2. \quad (6)$$

Вычислим частные производные функции $L(S_0, Q_0)$ по неизвестным S_0 и Q_0 и приравняем их к нулю. Обозначая $\overline{SQ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i)$, $\overline{S^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2$, $\overline{Q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2$, $\overline{S^2 Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i^2 Q_i)$, $\overline{S Q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i Q_i^2)$.

получим систему уравнений:

$$\begin{cases} -S_0 \overline{Q^2} + Q_0 \overline{SQ} &= \overline{SQ^2} \\ -S_0 \overline{SQ} + Q_0 \overline{S^2} &= \overline{S^2 Q} \end{cases} \quad (7)$$

Из которой находим коэффициенты:

$$S_0 = \frac{\overline{SQ^2} \cdot \overline{S^2} - \overline{S^2 Q} \cdot \overline{SQ}}{-\overline{Q^2} \cdot \overline{S^2} + (\overline{SQ})^2}, \quad (8)$$

$$Q_0 = \frac{9}{\frac{-Q^2 \cdot \overline{S^2 Q} + \overline{S Q} \cdot \overline{S Q^2}}{-Q^2 \cdot \overline{S^2} + (\overline{S Q})^2}}. \quad (9)$$

В результате определяем значения коэффициентов S_0 и Q_0 , при которых достигается минимум квадратов отклонений фактических от теоретических значений величины $Z = SQ$ в моделях (4) и (5).

Для расчета коэффициентов S_0 и Q_0 использовали средние значения \bar{S} , \bar{Q} , $\overline{S Q}$, $\overline{S^2}$, $\overline{Q^2}$, $\overline{S^2 Q}$, $\overline{S Q^2}$ в результате математическая модель (3) можно представить графиком зависимости износа от наработки (рисунок 2) и будет приведена к виду:

$$S = \frac{S_0 Q}{Q_0 - Q}. \quad (10)$$

Таким образом, с помощью полученной математической модели можно будет прогнозировать наработку молотка, по достижению которой наступит его предельный износ.

В результате теоретических и предварительных экспериментов установлено, что для уменьшения износа рабочей кромки молотков зернодробилок целесообразно применить комбинированное упрочнение, которое существенно изменит конструкцию молотка (рисунок 3). Молоток изготавливается из стали Ст3 и упрочняется твердосплавными пластинками ВК8, которые располага-

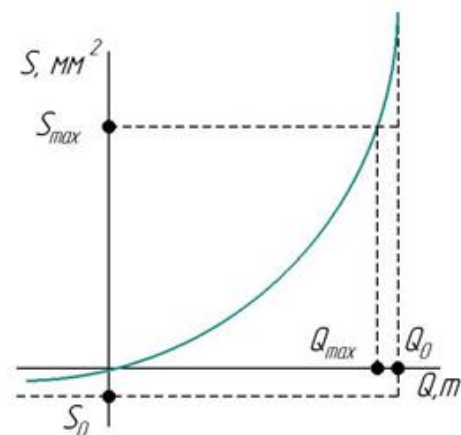


Рисунок 2 – Теоретический график зависимости износа от наработки

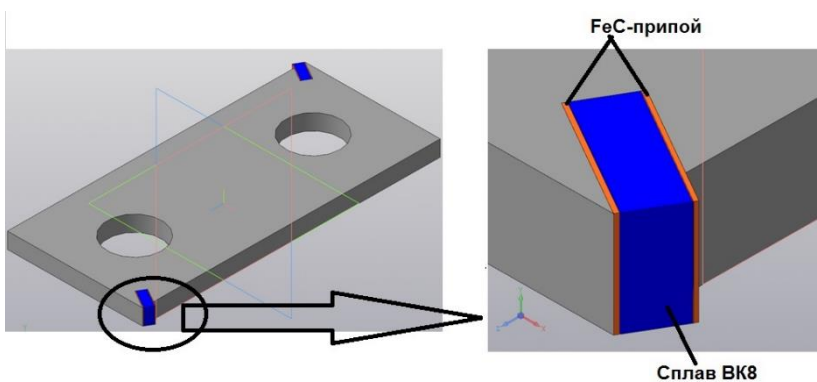


Рисунок 3 – Модель упрочненного молотка

ются под острым углом к рабочим граням и закрепляются посредством индукционной пайки на FeC-припой. 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.

В третьей главе изложена программа экспериментальных исследований и методика их проведения.

Экспериментальные методы использованы при выборе способа упрочнения и оценке износа молотков. Сравнительные методы использованы при установлении эксплуатационных показателей серийных молотков и упрочненных молотков в лабораторных и производственных условиях.

Программа исследований включала:

- 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.

Для реализации разрабатываемой технологии комбинированного упрочнения требовалась предварительная подготовка рабочих кромок молотка размером 110×50мм и толщиной 6мм. Подготовка паяемых поверхностей заключалась в формировании паза на рабочей кромке молотка для твердосплавной пластинки на горизонтально-фрезерном станке, а также зачистки, удалении заусенцев и макронеровностей.

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

Пайка производилась с использованием индукционного нагрева высокочастотными установками ЛПЗ-67М и ЛНВ-Е0202. Скорость нагрева варьировалась в пределах оптимизации технологической операции формирования паяного шва с ограничением максимально допустимой скорости нагрева твердых сплавов в зависимости от марки и размеров пластинок.

Учитывая повышенную температуру плавления FeC-припоя, пайка осуществлялась с применением специального флюса. Оценка активности флюса производилась по технологической пробе растекания FeC-припоя по поверхности твердого сплава. На зачищенную поверхность пластинки ВК8 размером 3×6×8мм помещалась пластинка FeC-припоя массой 0,50...0,55г, затем порошок соответствующего флюса. Пластинка помещалась в индуктор и нагревалась до расплавления FeC-припоя. 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%.

Нагрев осуществлялся в соответствующих типоразмеру молотков индукторах. Скорость, равномерность и температура нагрева подбирались путем изменения размеров и конструкций индуктора; положением паяемого элемента в индукторе; режимами работы генератора и его периодическими отклонением.

При проведении экспериментальных исследований паяного соединения и твердого сплава осуществлялся контроль параметров: скорость нагрева и охлаждения, температура и время нагрева, выдержки и охлаждения. При

комбинированном упрочнении молотков также отслеживались время и температура. Контроль времени осуществлялся секундомером, температурный интервал плавления и кристаллизации фиксировался пирометром ТЕТРОН-Т1300 и хромель-алюминиевой термопарой с потенциометром ПП-63.

Для определения поверхностных дефектов (трещин) в паяном шве после пайки осуществлялся контроль молотков методом красок. Контролируемые поверхности очищались от флюса и излишков FeС-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 на поверхности проявлялись их следы.

Для проведения металлографических исследований и определения механических свойств изготавливались микрошлифы образцов молотка с упрочненной рабочей кромкой. При-

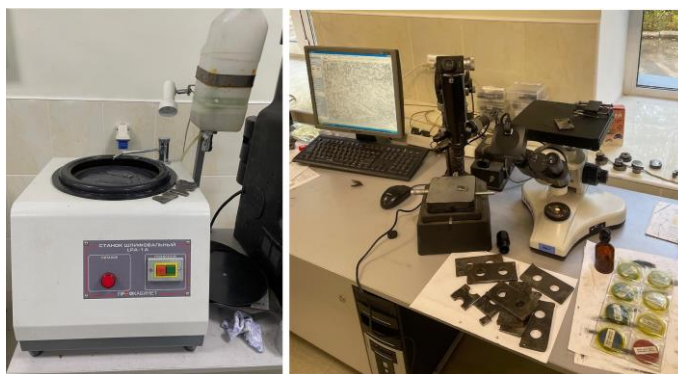


Рисунок 4 – Оборудование для приготовления микрошлифа упрочненного молотка

готовление шлифов осуществлялось по известной методике, включающей: вырезка темплета, шлифование на установке LPA-1А, механическую полировку и травление (рисунок 4). Микроструктуры исследовались до и после травления. Травление шлифов для выявления микроструктуры проводилось по ГОСТ 9391-80.

Для металлографического анализа микрошлифы изучались на металлографическом микроскопе ВМ-1 и МИМ-7, а также на электронном микроскопе Phenom X, на которых исследовали микроструктурные изменения в твердом сплаве, в стали и в FeС-припое.

Определение микротвердости элементов рабочей кромки упрочненного молотка проводилось на микротвердомере ПТМ-3 и DuraScan. Количество отпечатков на каждом образце и значения микротвердости принималось в соответствии с ГОСТ9450-76. Погрешность измерения диагоналей составила $\pm 3\%$. Определение механической прочности паяного соединения «твердого сплава – стали» и соединения «сталь – FeС-припоя» предусматривало испытания на срез по известным методикам в соответствии с ГОСТ28830-90.

Производственные испытания производились с использованием сравнительного метода, при этом испытанию подвергались серийные молотки (сталь 65Г) и молотки, упрочненные по разработанной технологии (сталь Ст3 упрочненные твердым сплавом ВК8 с применением FeС-припоя). Экспериментальные молотки с комбинированным упрочнением и серийные устанавливались на зернодробилку КДУ-2 (рисунок 5). Замеры величины износа производились через каждые 100т наработки. Изменение профилей молотков оценивалось

графоаналитическим методом путём построения профильных кривых (для серийных и упрочненных молотков).

В четвертой главе приведены результаты выполненных экспериментальных исследований и проведен их анализ.

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния конструктивно-технологических параметров и режимов на структурообразование паяного соединения «твердый сплав – FeС-припой – сталь» позволил установить скорость нагрева $V_H = 30...40^\circ\text{C}/\text{с}$, температуру нагрева $t = 1140...1190^\circ\text{C}$, время выдержки $\tau_B = 5...7\text{с}$, скорость охлаждения на воздухе $V_{\text{охл}} = 10...20^\circ\text{C}/\text{с}$ с последующим отпуском при температуре $t = 200...250^\circ\text{C}$ в течение 3...6ч. В результате был изготовлен экспериментальный молоток (рисунок 6).

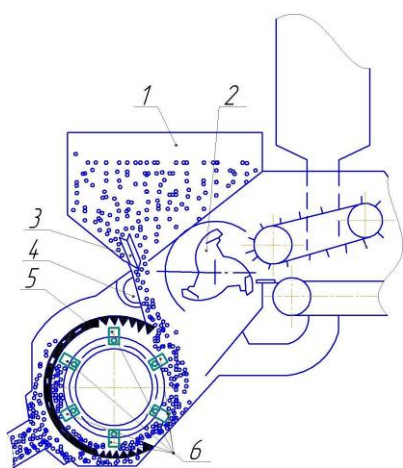


Рисунок 5 – Схема работы экспериментальной зернодробилки КДУ-2 с упрочненными молотками:

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

Проведенные металлографические исследования показали, что используемый при пайке FeС-припой, позволяет получить паяное соединение твердого сплава с материалом молотка с сохранением высокой прочности, за счет формирования диффузионных зон (рисунок 7), это происходит вследствие того, что в сталь диффундирует углерод из FeС-припоя формируя повышенную жесткость в данном соединении, а в твердый сплав из FeС-припоя диффундирует железо, это соединение формирует прочную и мало-напряженную границу (формируется графитно-перлитно-цементная структура, где графит – компенсирует напряжения, гасит высокочастотные вибрации, перлит – дает прочность и вязкость, цементит – дает жесткость).

Микроструктурный анализ образцов позволил установить, что взаимодействие «FeС-припой – твердый сплав» обусловлено двумя процессами:

- объемное диффузионное взаимодействие твердого сплава и FeС-припоя, при котором формируется фронт диффузии, приводящий к увеличению объемного содержания металлической связки и железа (рисунок 8, а);

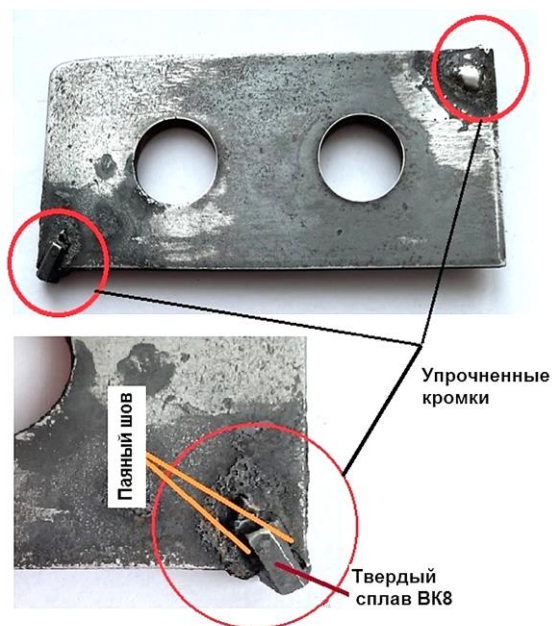


Рисунок 6 – Образец молотка с упрочненной рабочей кромкой

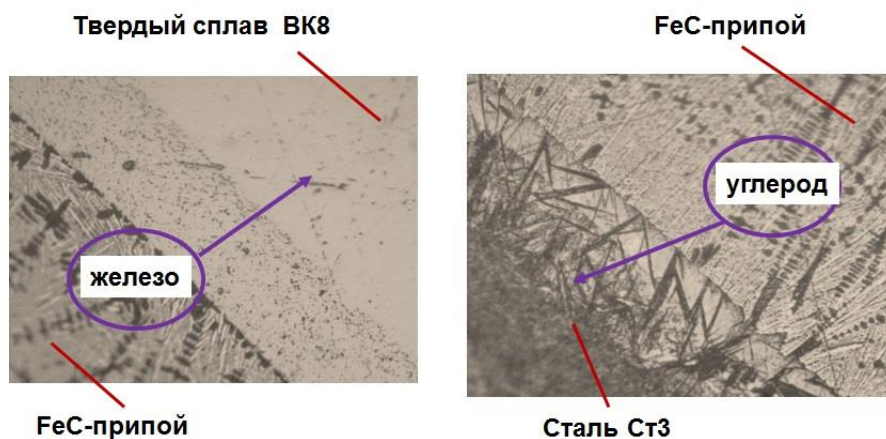


Рисунок 7 – Микроструктура диффузионных зон упрочненных молотков:
а – диффузионная зона «VK8 – FeC-припой», ($\times 1200$); б – диффузионная зона «FeC-припой – сталь Ст3», ($\times 580$)

- поверхностное растворно-диффузионное взаимодействие твердого сплава и FeC-припоя, когда 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» (рисунок 8,

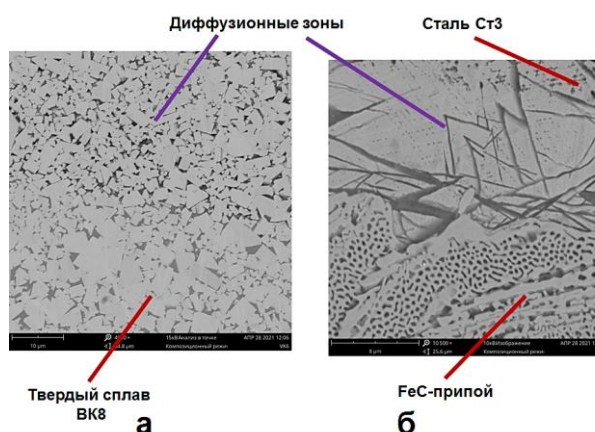


Рисунок 8 – Микроструктурное взаимодействия твердого сплава и припоя: а – объемное диффузионное взаимодействие; б – поверхностное растворно-диффузионное взаимодействие

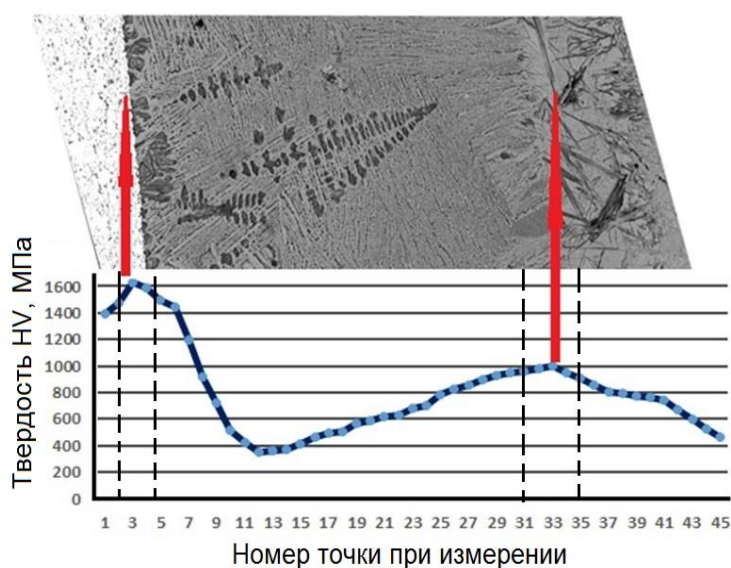


Рисунок 9 – Микроструктура и микротвердость паяного соединения «твердый сплав – FeC-припой – сталь»

б) показывает, что первоначально диффузия протекает по границам зерен с образованием жидкой фазы в стали, а затем микронеровностям паяемой поверхности стали. 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 проведенным экспериментальным исследова-

ниям были получены зависимости микроструктуры от микротвердости в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» (рисунок 9). В диффузионных зонах микротвердость высокая, так в зоне «твердый сплав – FeC-припой» свыше HV1600 и в зоне «FeC-припой – сталь» HV1000.

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.

В результате 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 $h_d = 0,25\text{мм}$ и толщине паяного шва $h_{II} = 0,5...0,8\text{мм}$ (рисунок 10 и 11). Исследования подтвердили наличие диффузионных зон в паяном соединении «твердый сплав – FeC-припой – сталь» с высокой твердостью (HRC56...61) и прочностью.

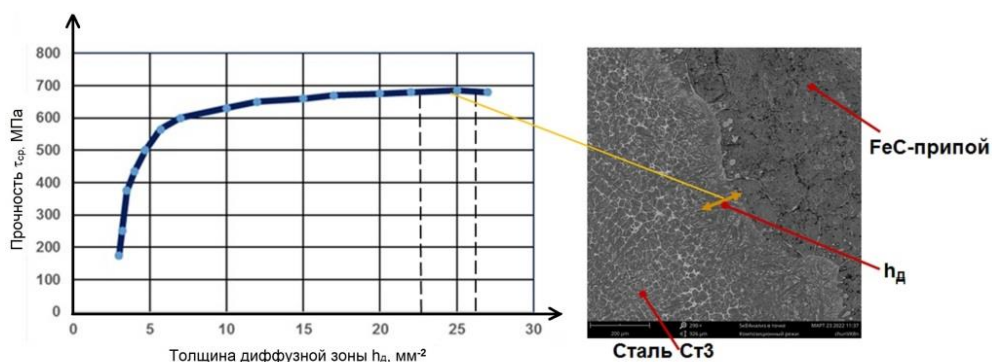


Рисунок 10 – Зависимость прочности соединения от величины диффузионной зоны

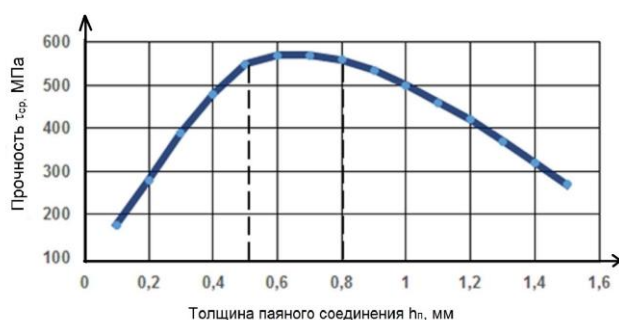


Рисунок 11 – Зависимости прочности соединения от толщины паяного шва

Металлографические исследования установили, 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.

Производственные испытания опытных партий молотков в количестве 1000шт позволили определить величины износа упрочненных молотков путем построения профильных кривых. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – 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

Для установления функциональной зависимости величины износа упрочнённых молотков от их наработки используем полученную математическую модель (10), для которой методом наименьших квадратов находим средние значения: \overline{SQ} , $\overline{S^2}$, $\overline{Q^2}$, $\overline{S^2Q}$, $\overline{SQ^2}$ и определяем коэффициенты S_0 и Q_0 .

Подставляем значения S_0 и Q_0 в модель (10), получаем зависимость износа S молотка от его наработки Q :

$$S = \frac{53026}{1250-Q} - 42,4. \quad (11)$$

Сравнивая эмпирические значения износа молотка $S_{\text{эмп}}$ с теоретическими $S_{\text{теор}}$, оценили адекватность модели. Величина ошибки прогноза не превышает 5% (рисунок 12).

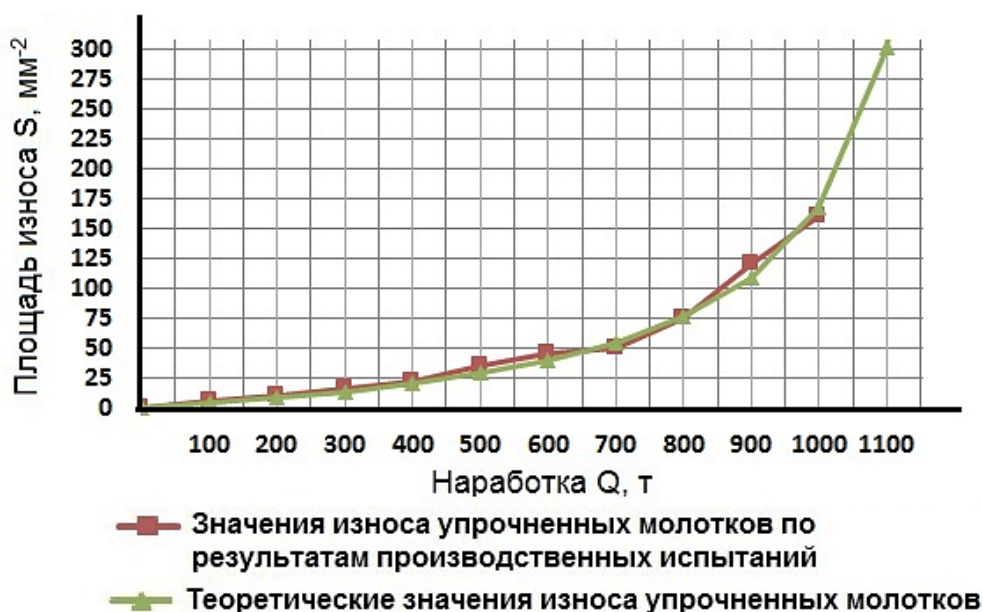


Рисунок 12 – Теоретические значения и результаты производственных испытаний величины износа от наработки молотка

По результатам производственных испытаний опытных партий упрочненных молотков установлено, что ресурс молотков с комбинированным упрочнением твердым сплавом ВК8 с применением FeC-припоя увеличивается в 3...4 раза по сравнению с серийными (сталь 65Г). Наработка упрочненных молотков по достижению ими предельного состояния составила 1000т (рисунок 13).

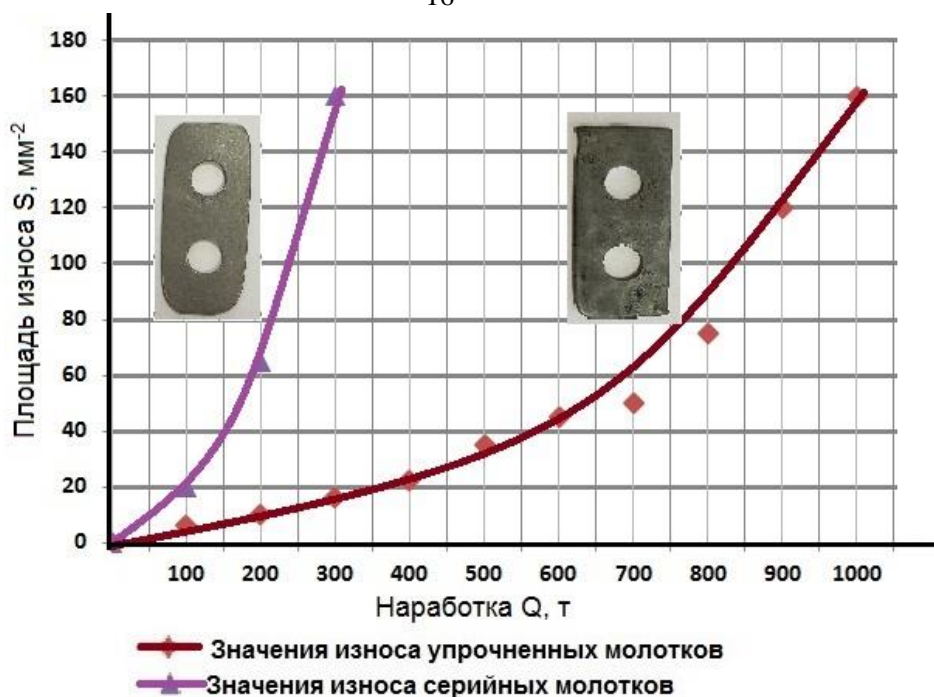


Рисунок 13 –Зависимость величины износа от наработки серийных и упрочненных молотков

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

В пятой главе выполнена оценка экономической эффективности от внедрения предлагаемой разработки, из которой следует, что применение предлагаемой технологии комбинированного упрочнения рабочих кромок молотков зернодробилок обеспечивающей повышение ресурса молотков в 3...4 раза, позволяет увеличить производительность зернодробилок в процессе кормоприготовления на 10...16%, снизить удельное энергопотребление на 15...20%, получить экономический эффект при внедрении в производство 26 рублей на каждую тонну обработанного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 $h_d = 0,25$ мм и толщине паяного шва $h_p = 0,5...0,8$ 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 $V_n = 30...40^\circ\text{C}/\text{с}$;
- температура пайки не более $t = 1140...1190^\circ\text{C}$;
- время выдержки при температуре пайки (FeC-припоя в жидкой фазе) $\tau_b = 5...7$ с;
- охлаждение на воздухе со скоростью $V_{\text{охл}} = 10...20^\circ\text{C}/\text{с}$ с последующим отпуском при $t = 200...250^\circ\text{C}$ в течение 3...6ч.

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.

Рекомендации производству

Результаты выполненных исследований рекомендуется использовать

предприятиям, изготавливающим молотки для зернодробилок с целью повышения их ресурса за счет использования комбинированного упрочнения рабочих кромок молотка индукционной пайкой твердого сплава с применением специального FeC-припоя, а также учебным заведениям, осуществляющим подготовку и повышение квалификации технических специалистов для АПК.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением дальнейших научных исследований является исследование технологии комбинированного упрочнения твердым сплавом и FeC-припоем при изготовлении рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, а также при изготовлении металлообрабатывающего инструмента в машиностроении.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Агафонова Е.В. Модель прогнозирования ресурса упрочненных молотков кормодробильных машин/ Е.В. Агафонова, О.В. Мамонов, В.В. Коноводов // Технический сервис машин. – 2024. – Т.62. №3. – С. 65-71
2. Агафонова Е.В. Образование структуры в соединениях твердого сплава и стали, паяных железуглеродистым припоем (на примере твердосплавного инструмента) / Е.В. Агафонова, В. В. Коноводов // Технический сервис машин. – 2022. – № 3(148). – С. 50-59.
3. Агафонова Е. В. Состав железуглеродистого припоя для соединения «сталь-твердый сплав» с обоснованием его технологических свойств (на примере упрочнения рабочих органов кормодробильных машин) / Е.В. Агафонова, В.В. Коноводов, В.Н. Хрянин// Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 11. – С. 39-45.
4. 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.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования:

1. 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.

Патент Российской Федерации:

1. Пат. № 192763 РФ, МПК В02С 13/28. Молоток дробилки/ Е.В. Агафонова, В. В. Коноводов. - № 2019122754; заявл. 15.07.2019; опубл. 30.09.2019, Бюл. № 28.

Публикации в других изданиях:

1. 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.

2. Агафонова Е.В. Технология армирования рабочих углов молотков кормодробилок твердым сплавом с применением железоуглеродистого припоя / Е.В. Агафонова // Современные тенденции технологического развития АПК: Сборник международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Радаева Д.Н. Улан-Удэ, 8 июня 2023 года. – Улан-Удэ: Бурятская государственная се/х академия им. В.Р. Филиппова, 2023. – С 49-55.

3. 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.

4. 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.

5. Структурообразование соединений твердого сплава и стали, паяных железоуглеродистым припоем (на примере твердосплавного инструмента) / В.В. Коноводов, Е.В. Агафонова, В.Н. Хрянин, Е.С. Губин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2020. – № 3-4. – С. 31-37. – EDN GTJIMV.

6. Агафонова Е. В. Математическая модель прогнозирования ресурса упрочненных молотков / Е.В. Агафонова, В.В. Коноводов // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XI региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 75-летию Инженерного института, Новосибирск, 11–12 ноября 2019 года. – Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2019. – С. 11-16.

7. 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 конферен-

ции 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.

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

9. Коноводов В.В. Способы повышения эксплуатационной надежности рабочих органов кормодробильных машин / В.В. Коноводов, Е.В. Агафонова // 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.