

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти
Освітньої програми «Агроінженерія»
За спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Науковий керівник:

_____ к.т.н., доц. Сергій УМИНСЬКИЙ

Рецензент: д.т.н., проф. Петро ОСАДЧУК

Виконав здобувач денної форми навчання

Владислав КРИШТАЛЬ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ **Владислав КРИШТАЛЬ**

ОДЕСА – 2025

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра Агроінженерії

Рівень вищої освіти другий магістерський

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 Агроінженерія

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Владиславу КРИШТАЛЮ

(ім'я та ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

« Технологія зміцнення робочих поверхонь переробного обладнання сільськогосподарської техніки »,

науковий керівник кваліфікаційної роботи:

к.т.н., доцент Сергій УМИНСЬКИЙ

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРИЗВИЩЕ)

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 124 від «27» червня 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи : 15 грудня 2025 року3. Об'єкт дослідження: Зносне зношеністьробочих кромок зміцнених молотків зернодробилок4. Предмет дослідження: Економічність зношеностіробочих кромок зміцнених молотків зернодробилок

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: Аналіз стануматеріалу. Класифікація зернодробилокмолоткового типу для приготування кормів.Аналіз умов роботи робочих органів зернодробилокта фактори, що впливають на їх зношення5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: Визначення ресурсумолотків комбінованим зміцненням.Методи визначення зносу молотків зернодробилокобґрунтування структурного складу матеріалунашого мка

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: Методика напне
мологів зернодробилок ГЕС - принос
Методика виробничих виробувань зміцнен
мологів. Результатич методологічного дослідн
наккї сполуки. Результатич досліднонь
закінності структуриформени від режим

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Аналіз умов робочих фронтів зернодробилок
та факторів, що впливають на їх продуктив
Аналіз матеріалів та технологій вироблення
та зміцнен мологів. Методи підвищення
експлуатаційного ресурсу мологів зернодробилок.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Розробка технологій комбінованого зміц-
нен мологів.

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу: Динаміка

зміцнен мологів під час вимірювань зуси
1 - масовим методом, 2 - графічним методом

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи :

Встановлені закономірності зміц-
нен мологів зернодробилок та вплив
зуси зміцнювальних елементів робото
крім мологів від напруження.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Технологія зміцнен робочих поверхонь
переробного обладнання сільськогосподарської
техніки. Тех. доповідь, V Міжнародної
науково-практичної конференції. 2-3 жовтня 2025.

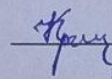
9. Дата видачі завдання: «29» червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Травень 2025	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи	Червень 2025	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку	Липень 2025	0,5	

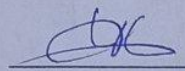
	з підготовки кваліфікаційної роботи			
4.	Написання першого (теоретико-методичного) розділу кваліфікаційної роботи	Вересень 2025	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Вересень 2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницько-аналітичного) розділу кваліфікаційної роботи	Жовтень 2025	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи	Листопад 2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Листопад 2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Листопад 2025		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Листопад 2025	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Грудень 2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	16 грудня 2025		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Грудень 2025		
14.	Попередній захист на кафедрі	Грудень 2025		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Грудень 2025		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 грудня 2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС «Магістр»


підпис

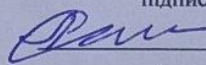
Владислав КРИШТАЛЬ

Науковий керівник


підпис

Сергій УМИНСЬКИЙ

Гарант ОП


підпис

Анатолій ЯКОВЕНКО

РЕФЕРАТ

Метою роботи є – підвищення ефективності роботи зернодробилок за рахунок комбінованого зміцнення молотків.

Об'єкт дослідження – процес зношування робочих кромek зміцнених молотків зернодробилок під час експлуатації.

Предмет дослідження – закономірності зношування робочих крайок зміцнених молотків зернодробилок при експлуатації.

Обґрунтовано технологію комбінованого зміцнення робочих крайок молотків зернодробилок для управління зміною їх геометричних параметрів у процесі зносу.

Встановлено закономірності зношування молотків зернодробилок та величини зносу зміцнювальних елементів робочої кромки молотків від напрацювання.

Обґрунтовано структурний склад, показники міцності паяної сполуки та раціональні конструктивно-технологічні параметри та режими паяння твердосплавної пластинки до молотка;

Ключові слова: ЗНОС, ЗМІЦНЮЄМИЙ ЕЛЕМЕНТ, ТВЕРДИЙ СПЛАВ, ЗМІЦНЕННЯ, ВІДНОВЛЕННЯ.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	2
РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ.....	8
1.1. Класифікація зернодробилок молоткового типу для приготування кормів.....	8
1.2. Аналіз умов роботи робочих органів зернодробилок та фактори, що впливають на їх зношування.....	11
1.3. Аналіз матеріалів та технологій виготовлення та зміцнення молотків.....	15
1.4. Огляд основних способів підвищення ресурсу молотків зернодробилок.....	17
1.5. Розробка технології комбінованого зміцнення молотків.....	26
2. ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ МОЛОТКІВ КОМБІНОВАНИМ ЗМІЦНЕННЯМ.....	28
2.1. Методи визначення зносу молотків зернодробилок.....	28
2.2. Обґрунтування технологічних властивостей FeC-припою для зміцнення робочих крайок молотка твердим сплавам.....	33
2.3. Обґрунтування структурного складу матеріалу паяного шва молотка.....	38

2.4. Умови утворення структури шва, паяного FeC-припоєм.....	41
2.5. Структурування паяного шва та обґрунтування технологічних режимів паяння зміцненого молотка.....	43
3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	51
3.1. Методика паяння молотків зернодробилок FeC-припоєм.....	51
3.2. Методика виробничих випробувань зміцнених молотків.....	55
3.3. Результати металографічних досліджень паяної сполуки.....	57
3.4. Результати досліджень залежності структурування від технологічних режимів.....	64
3.5. Результати досліджень залежності властивостей паяної сполуки від структури шва.....	66
3.6. Результати експериментально-виробничих випробувань.....	68
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	73
5. БІЗНЕС-ПЛАН НА РЕКОНСТРУКЦІЮ РЕМОНТНОЇ МАЙСТЕРНІ	87
ВИСНОВКИ.....	107
Література.....	108
ДОДАТКИ.....	112

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Аналіз умов роботи робочих органів зернодробилок та фактори, що впливають на їх зношування

2. Аналіз матеріалів та технологій виготовлення та зміцнення молотків.
3. Методи підвищення експлуатаційного ресурсу молотків зернодробилок.
4. Розробка технології комбінованого зміцнення молотків
5. Динаміка зношування молотків під час вимірювання зносу: 1 – масовим методом; 2 – графоаналітичним методом
6. Обґрунтування технологічних властивостей FeC-припою для зміцнення робочих крайок молотка твердим сплавам.
7. Умови утворення структури шва, паяного FeC-припоєм.
8. Методика паяння молотків зернодробилок FeC-припоєм.
9. Устаткування для паяння зміцнених молотків.
10. Методика виробничих випробувань зміцнених молотків.
11. Мікроструктура зміцнених зон молотків
12. Мікроструктура та мікротвердість паяної сполуки «твердий сплав – FeC-припій – сталь».

ВСТУП

Розвиток сільського господарства характеризується зростанням ролі кормовиробництва як системотворчої ланки Агропромислового комплексу, що визначає стан тваринництва. У структурі собівартості тваринницької продукції корми становлять близько 60 %, тому система кормовиробництва має ґрунтуватися на оптимальному балансі якості корму та економічних показниках його виробництва. Більшість операцій технологічного процесу кормоприготування виконується комплексами комбінованих машин, частиною яких є зернодробилки молоткового типу (типу ДМ, ДБ, ДМП, КД, Molot, ДМА, ДПА та ін.). Їхня тривала експлуатація показала, що при загальних позитивних якостях (надійність, простота обслуговування, висока продуктивність) вони не позбавлені недоліків, один з яких – швидке зношування і як наслідок низький ресурс основних робочих органів – молотків. У процесі експлуатації молотки, виготовлені з високолегованих сталей (65Г, 30ХГСА, 18ХГНМФР, ШХ15 та ін.), зношуються та втрачають масу не більше 10...15%, це призводить до збільшення енерговитрат та зниження продуктивності. Все це визначає доцільність розробки нової технології зміцнення молотків зернодробилок з метою підвищення їх ефективності роботи. Перспективним рішенням підвищення ресурсу нових молотків є розробка та впровадження технології на основі зміцнення робочих крайок твердим сплавам із застосуванням залізовуглецевого припою (FeC-припою), що дозволяють вирішувати проблему зниження зносу за рахунок збільшення твердості робочих крайок молотка.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ.

1.1. Класифікація зернодробилок молоткового типу для приготування кормів.

Для підготовки зерна до вигодовування у комбікормової промисловості, а також у сільськогосподарських підприємствах широкого поширення набув спосіб руйнування матеріалу механічним впливом з боку робочих органів [3, 5]. Розрізняють кілька способів руйнування зернового матеріалу: стиснутий удар; роздавлювання; сколювання; різання; стирання; вільний удар [1].

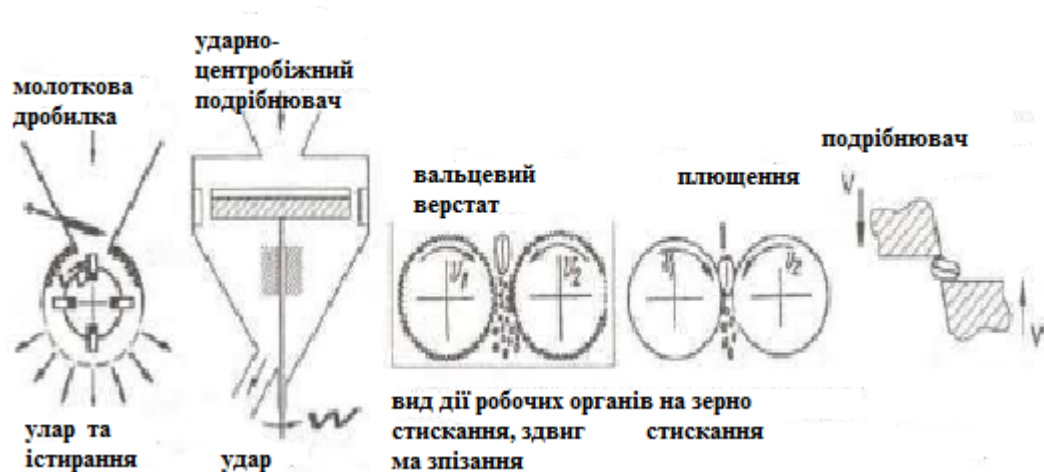


Рис. 1.1. – Робочі органи, які застосовуються для подрібнення зерна.

У жодному з типів подрібнювачів наведені способи (рисунок 1.1) не зустрічаються у «чистому» вигляді, тим щонайменше, у кожному їх можна назвати переважаючий [8].. Найбільш поширеним в даний час є спосіб руйнування зерна вільним ударом, де руйнування зерна відбувається завдяки впливу на нього робочого органу, що швидко рухається. Розглянувши способи руйнування зерна, а також результати робіт з визначення їхньої енергоємності можна зробити висновок, що вибір зернодробилок молоткового типу для подрібнення зерна є обґрунтованим та актуальним. Так, наявність двох отворів та симетричність форми плоского молотка дозволяють збільшити термін їхньої служби. При зношуванні однієї сторони

можна повернути молоток іншою стороною, а при зношуванні обох сторін з одного кінця повернути протилежним. Величину подрібнення корму можна відрегулювати різними методами, найбільш простий спосіб – зміна решіт [3]. Зернодробилки молоткового типу широко використовуються у багатьох галузях промисловості та у сільському господарстві. Їх використовують у гірничорудній промисловості при подрібненні основних компонентів, при виробництві цементу та азбесту, а енергетичній та деревообробній промисловості [2, 6,]. Зернодробилки молоткового типу широкого застосування знайшли в агропромисловому комплексі. Вони є універсальними подрібнюючими машинами різного типу (рис. 1.2) [8].

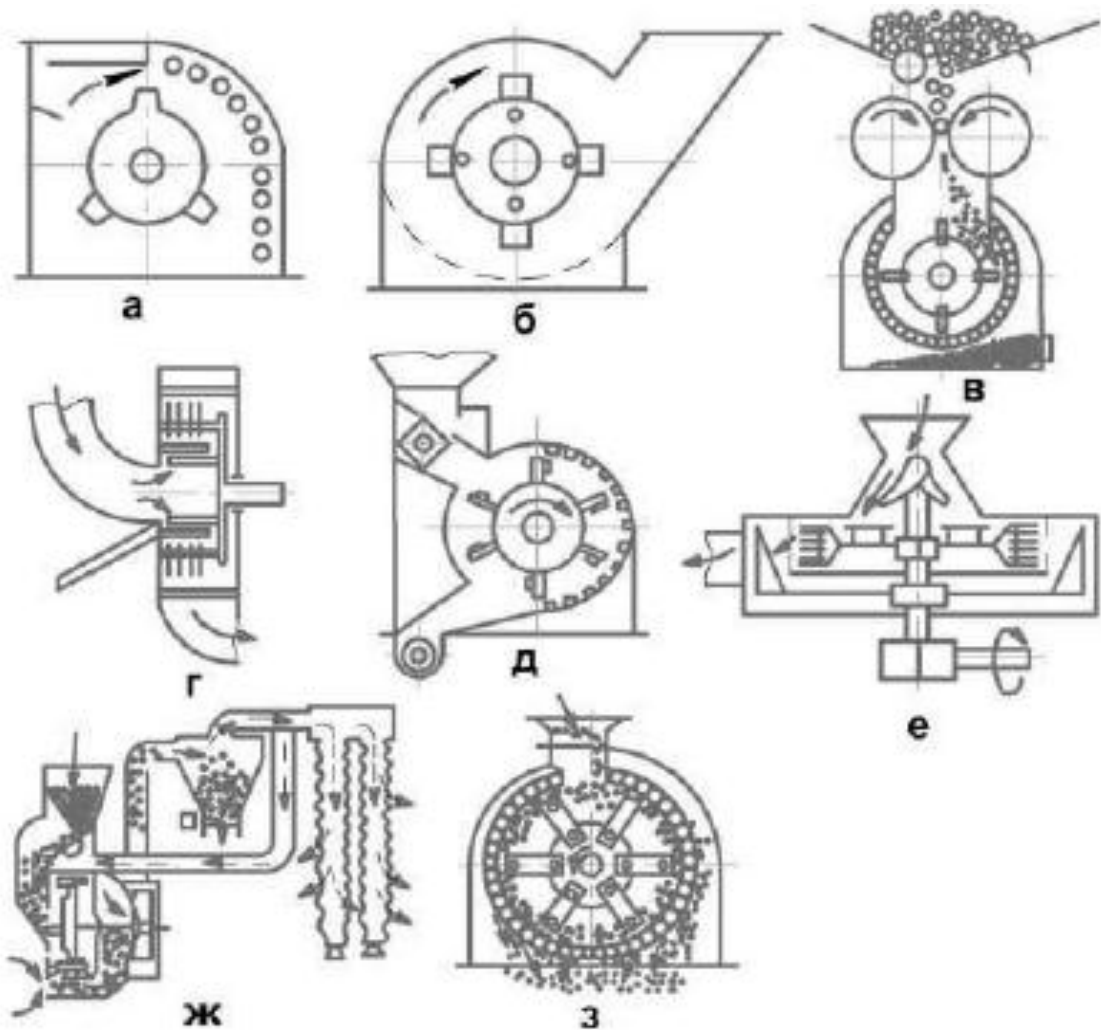


Рис. 1.2. - Схеми зернодробилок молоткового типу сільськогосподарського призначення: а - відкритого типу; б – закритого типу; і г - двостадійні; д - з жорстким кріпленням робочих органів; е – горизонтальна; ж - із замкнутим повітряним потоком; з - із шарнірним кріпленням молотків.

Зернодробилки молоткового типу представлені як вітчизняними виробниками, і іноземними (наприклад, «Dinnissen», «Bühler», «VanAarsen», «Gruber», «Muyang», «ANDRITZ» та інших.) [1,6]. Асортимент представлений як особистих підсобних господарств, так великих комбикормових заводів. Вони відрізнятимуться потужністю, продуктивністю, кількістю робочих органів – молотків, можуть бути використані як самостійно, так і у складі технологічної лінії чи агрегату.

Основним робочим органом є решета та молотки, які регулюють ступінь подрібнення зерна.

Під час експлуатації таких машин виявили, що мінімальний ресурс із усіх робочих органів мають молотки. Найбільше зношування молотків викликане природним процесом ударного руйнування зерна. Підвищення ресурсу робочих органів, зокрема молотків, у поєднанні з простотою та надійністю зернодробилок молоткового типу зробило б цей тип подрібнювачів одним із досконалих.

1.2. Аналіз умов роботи робочих органів зернодробилок та фактори, що впливають на їх зношування.

Процес подрібнення у зернодробилках молоткового типу відбувається наступним чином (рис. 1.3), зерна матеріалу, потрапивши в зону дії молотків отримують перший удар і відкидаються до периферії, де відбиваються поверхнею від деки або решета. Відбиваючись від них, частки уповільнюють свій рух, але в зоні дії молотків вони знову прискорюються від їх ударів та потоку повітря. При встановленому процесі по всьому внутрішньому колу корпусу зернодробилки утворюється шар матеріалу, що безперервно

перемішується. Від багаторазових зіткнень із молотками, решетом та декою зерна подрібнюються. При досягненні заданого розміру частинки матеріалу проходять через отвори решета і видаляються із зернодробилки. На їхнє місце надходять нові порції неподрібненого матеріалу [7].

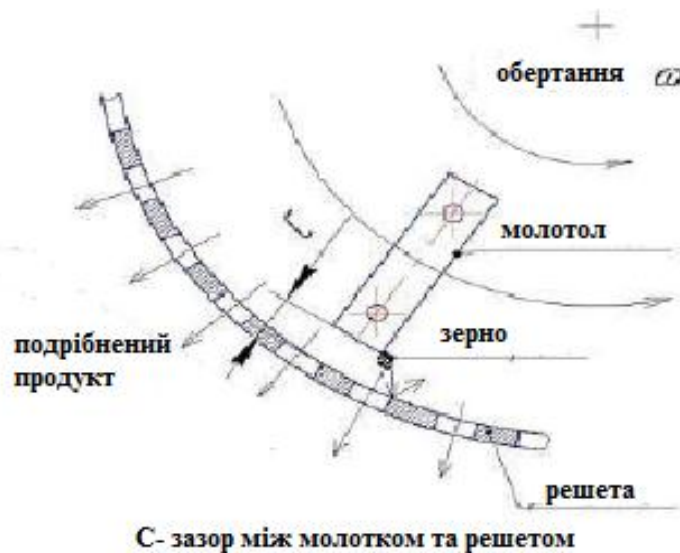


Рис. 1.3. - Схема процесу подрібнення в зернодробилки молоткового типу.

Зернодробилки молоткового типу піддаються зносу. основні робочі органи: молотки, грати та деки, що призводить до збільшення витрати потужності на подрібнення, зниження продуктивності, а також зниження якості одержуваного продукту. Опис процесу зношування присвячена велика література [1, 4, 6], але, незважаючи на це єдиної теорії цього процесу не створено через його складність і багатоплановість фізичних аспектів. Причиною абразивного зносу можуть бути частинки розміром у десятки мікронів, за своїм мінералогічним складом близькі до кварцу, які вдалося виділити із зерна, а також пісок та каміння, які є постійними домішками зерна.

Абразивне зношування є механічним процесом, при цьому, перебіг цього процесу та її найважливіші особливості більшою мірою залежить від характеру взаємодії абразивних частинок з поверхнею деталі. Мікрорізання,

пластичне деформування поверхні деталі, удар частинок по поверхні деталі - всі ці різні механічні на матеріал деталі, що визначають відмінність зовнішніх чинників, які впливають швидкість зношування, і відмінність властивостей матеріалів, відповідальних за опір абразивному впливу. В даний час ще немає єдиної точки зору на абразивну природу. Проте ніхто з дослідників не заперечує, що провідним процесом в абразивному зносі при роздавлюванні та стиранні є мікрорізання, пластичне відтискання і втомне руйнування [3, 4, 6]. поверхневого шару. Однак процес зношування настільки складний, а різноманітність факторів, що впливають на знос, настільки велике, що, незважаючи на велику кількість досліджень в галузі трибології, надійні методи захисту обладнання від інтенсивного зносу відсутні.



Рис. 1.4. – Схема впливу сил тертя на робочу поверхню молотка при зіткненні з часткою матеріалу.

Основними факторами, що впливають на ступінь зношування робочих

органів (молотків) зернодробилок, є кут відхилення та конструкція молотка. Зношування виникає внаслідок зіткнення частинки матеріалу з робочою поверхнею, яка знаходиться в положенні, відмінному від радіального (рис. 1.4) [143], що, у свою чергу, призводить до виникнення інтенсивного стирання під впливом сили тертя при ковзанні матеріалу по молотку. На величину зношування також впливають такі фактори [4]:

- матеріал, з якого виготовлено деталі;
- шорсткість їхньої поверхні;
- характер та рід мастила;
- режим та умови роботи деталей;
- антикорозійні покриття;
- забруднення поверхні деталей;
- ступінь справності та наявність ущільнень.

Внаслідок зносу, замість лобових ударів подрібнений матеріал сприймає удари з ковзанням, що значно погіршує його взаємодія із декою. В результаті зносу збільшується зазор між молотком та решетом, що сильно скорочує зону впливу молотків. Все це позначається на падінні продуктивності зернодробилки на 30...45% і збільшення енергоспоживання на 25...35% [11, 15].

Також можна сказати, що основами дефектів молотка є:

1. знос лобової грані молотка зернодробилки;
2. зношування настановних отворів молотка;
3. погнутість молотка;
4. вибоїни на поверхні молотка.

Вивчивши результати досліджень вчених можна дійти невтішного висновку, що питання зносу робочих органів, зокрема молотків, та умови роботи їх роботи вивчені все ще не повністю. Деякі результати мають суперечливий характер. Прогнозуванню ресурсу молотків та його зносу практично не приділялося уваги. Все це свідчить про те, щоб продовжити дослідження в галузі прогнозування підвищення ресурсу робочих органів зернодробилок. Тому нами висунуто припущення про те, що як Основними заходами, що дозволяють керувати зміною геометричних параметрів молотка в процесі зносу є його зміцнення. Прогнозуванню ресурсу молотків та його зносу практично не приділялося уваги. Все це свідчить про те, щоб продовжити дослідження в галузі прогнозування підвищення ресурсу робочих органів зернодробилок. Тому нами висунуто припущення про те,

що як Основними заходами, що дозволяють керувати зміною геометричних параметрів молотка в процесі зносу є його зміцнення.

1.3. Аналіз матеріалів та технологій виготовлення та зміцнення молотків.

Матеріали, що застосовуються для обладнання у переробному виробництві агропромислового комплексу, повинні бути стійкими до електрохімічної та хімічної корозії, до абразивного зношування, оцінюватись та регламентуватись нормативними документами з охорони здоров'я споживача. До обладнання переробних виробництв відносять, наприклад, зернодробилки молоткового типу, в яких продукт піддається механічному впливу, що призводить до зміни їх форми та розмірів за збереження початкових властивостей. До робочих органів, що змінює якісний стан матеріалу, що переробляється, відносяться молотки, решета і деки. Як сказано раніше, знос молотків має переважно ударно- втомний та абразивний характер. Причинами прискореного зносу молотків є недостатня твердість та динамічна міцність у зоні максимальних тисків, що сприймаються від повітряно-продуктивного шару. При цьому для забезпечення достатньої продуктивності та помірного енергоспоживання процесу дроблення необхідно забезпечувати умови самозаточування робочих улов молотків. Ця умова виконується при різноміцності передньої та задньої та бічних поверхнях молотка. Для виготовлення молотків зернодробилок застосовують різні сталі. дорогі високоякісне, леговані та дешеві вуглецеві зі зміцнюючими гранями. Молотки дробарок, призначених для дроблення твердих матеріалів (гірничо-білки), виготовляють литими з марганцевистої сталі 110Г13Л, що має високу ударну в'язкість серцевини 500 ... 600 НВ на поверхні.

Молотки зернодробилок виготовляються із зносостійких легованих сталей, таких як сталь 30ХГСА з наступним загартуванням. твердістю 45 ... 50 HRC, сталь 65Г з наступним гартуванням твердістю 50 ... 55 HRC, сталь

40Х з подальшим гартуванням твердістю 50 ... 55 HRC [10]. Застосовують вуглецеві сталі з міцними гранями, наприклад, сталь 45 наплавляють електродами Т-590. Можна використовувати сталь Ст3 із взаємозамінною робочою гранню зносостійкої сталі У8А, сталі 40Х, сталі 65Г [4]. Для виготовлення молотків застосовується шведська зносостійка сталь HARDOX 450 твердістю 425...475HBW [7], аналогом зарубіжної сталі HARDOX 450 є високоміцна зносостійка сталь MAGSTRONG 450 твердістю 420...470 HBW [13] У таблиці 1.2 представлені характеристики сталей виготовлення молотків зернодробилок.

Таблиця 1.1 – Характеристики сталей для виготовлення молотків зернодробилок.

Сталь	Вид зміцнення / виготовлення	Переваги	Недоліки	Модель машини	Габаритні розміри/ товщина, мм
30ХГСА	Загартування 45...50 HRC	Рівномірність зносу крайок	Округлення бічних граней, невисокий ресурс	ДКМ КД КДУ ДМ ДДМ	110? 50? 6 136? 50? 3
65Г	Загартування 50...55 HRC Без загартування	Рівномірне зношування	Слабко флокеночув справжня і схильна до відпускний крихкості. «сира» швидко зношується, розбиває гніздо кріплення	КД ДМ	160? 50? 5
HARDOX 500 HARDOX 400 (аналог 18ХГНМ ФР)	Загартування з відпусткою / плазмова або лазерна різання 425...530HB W (47...51 HRC)	Мінімальний знос без сколів, висока зносостійкість, ресурс у 5 разів вище, ніж у сталі 10ХСНД	Висока вартість стали	ММ, ДДМ-5 КДУ СМД	110? 50? 6 565? 230? 1 30? 52
110Г13Л	Лиття 500 ... 600HB	Дешеві виливки, не вимагають механічною обробки, висока якість поверхні	Флокеночув дійсності і внутрішні напруги; низький ресурс; утворюються сколи; При сколі на одному молотці, доводиться замінювати усі молотки	СМД	565? 230? 1 30? 52

Таким чином, для виготовлення молотків зернодробилок застосовуються в здебільшого дорогі сталі, тому ми припускаємо, що можливо використовувати дешеві вуглецеві марки сталей із зміцненими робочими крайками молотків.

1.4. Огляд основних способів підвищення ресурсу молотків зернодробилок.

Ресурс молотків визначається чотирма групами факторів: конструктивними, технологічними, конструктивно-технологічними та організаційно-технологічними (рис. 1.5).

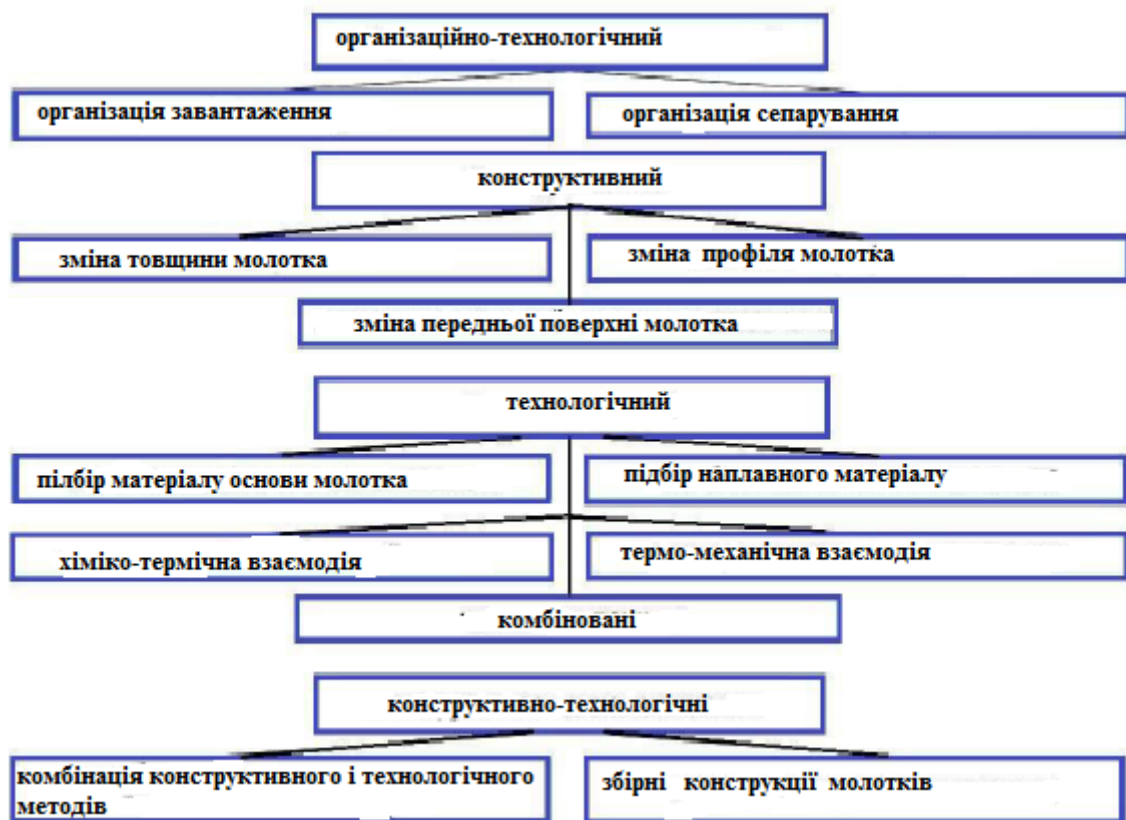


Рис. 1.5. – Методи підвищення експлуатаційного ресурсу молотків зернодробилок.

Конструктивні фактори повинні: забезпечити ресурс молотків при високі техніко-економічні показники процесу подрібнення, повинні відповідати наступним вимогам: максимальному використанню маси матеріалу молотка протягом терміну служби; мінімальній зміні або періодичному відновленню профілю робочих граней при зносі, максимально допустимій товщині молотка з вимог ефективного руйнування матеріалу, що подрібнюється; переважання прямих ударів при взаємодії з матеріалом, що руйнується. Даному методу переважно відповідає зміна форми молотків: ступінчастий профіль, відхилення передньої поверхні по

відношенню до напрямку руху молотка, зміна геометричних розмірів ударної частини молотка та ін. Для виключення прослизання зерна по молотку пропонується нова конструкція молотка. Він виготовляється із заздалегідь відомим кутом нахилу бічної (робочої) грані, оскільки сам молоток під час роботи відхиляється саме на цей кут.

Пропонована конструкція молотка складена з двох різновеликих трапецій, розташованих уздовж поздовжньої осі симетрії молотка та спрямованих меншими основами до поперечної осі симетрії. При цьому кут нахилу граней трапеції дорівнює куту відхилення молотка від радіального становища. Молотки з переважаючими прямими ударами, призводять до збільшення продуктивності та значного зниження споживання електроенергії [12, 15]. Найбільший ресурс мають модернізовані молотки, у яких робоча грань виготовлена із сталі У8 порівняно з пластинчастим молотком, виготовленим із сталі 65Г, у 3,7 раза [12]. Молоток робоча поверхня, якого виконано як трьох виступів, радіуси від вершин, яких до точки підвісу рівні, тобто.

$r_0 = r_1 = r_2 = r$ оптимальне. збільшує ефективність подрібнення кормів [11].

Технологічні фактори (термообробка, наплавлення та ін.) повинні враховувати вибір матеріалів, які застосовуються для виготовлення молотків. Складність у виборі матеріалу визначається умовами роботи молотків. Оскільки робочі органи піддаються одночасному впливу потоку абразивних частинок і ударних навантажень, то матеріал повинен мати суперечливі властивості – підвищені твердість і ударну в'язкість. До кардинального вирішення питання підвищення ресурсу молотків може призвести створення та дослідження нових, зокрема спечених матеріалів. Основною вимогою в цьому напрямку залишається вибір матеріалу, що має високу стійкість до абразивного зношування та ударних навантажень. Підвищення ресурсу молотків технологічними методами зміцнення, є лазерна обробка, нанесення порошкових матеріалів дискретним легуванням

та мікроплазмою, індукційна наплавка псевдосплавів та евтектичних покриттів. Загартування при нагріванні в електроліті - спосіб термічної обробки на підвищення зносостійкості вуглецевих сталей. Для отримання зносостійких структур сталі 45 (мартенситнокарбідна фаза) необхідно проводити загартування сталей в електроліті з наступними технологічними параметрами: сила струму до 100А, напруга 220...250В, температура електроліту 40...70°C, час нагрівання 5...6,5с.

Охолодження після нагрівання проводиться електролітом. Торці деталі екрануються вогнетривкою шамотною цеглою. Твердість загартованої поверхні становить 55...59 HRC [3]. Молотки зернодробилки, виготовлені із сталі 30ХГСА, насичують хромом. Процес дифузії хрому в сталь добре протікає у вакуумі близько 110-5 мм. рт. ст. У порівнянні з іншими методами, вакуумний метод дифузії ефективніший і в багатьох випадках економічно вигідний, хоча поки що у виробничих умовах він мало доступний. У процесі дифузії може бути небажані явища (спікання, прилипання). Для їх усунення в шихту хрому зазвичай додають оксид алюмінію. Процес дифузії триває протягом трьох годин за температури 1100°C. Після цього для усунення усіляких дефектів проводиться відпал протягом трьох годин при температурі 800...900 °C. Залишковий тиск у печі не повинен перевищувати 110-3 мм. рт. ст. [13].

Товстошарові зміцнення, виконані методами цементації, стали на різну глибину (0,7...1,8 мм) та нітроцементації на глибину 0,7...1,1 мм. показують підвищену довговічність (у 2 рази, порівняно зі стандартними молотками) Поряд з підвищенням терміну служби, молотки з товстими шарами зміцнення краще за гомогенні подрібнюють зерноsumіші і дають економію у витраті електроенергії (з 6,5 до 4,9 КВт-ч/т₀). несучого шару HV225...250. Довговічність цементованих молотків у межах 1,78...1,26 разів вище за серійні молотки. Дозволяє забезпечити зниження енергоємності процесу на 20...25% [14]. Лазерне загартування деталей машин та зразків матеріалів здійснюється з використанням установок «Катунь», «Латус-31», ЛТ-1, ЛТ-

100 і їм подібним. зміцнення, відстань між доріжками, фокусна відстань, струм розряду. коливається в межах 62...68 HRC залежно від вихідного матеріалу та режимів лазерної обробки. робочих граней молотків дає незначне підвищення зносостійкості в порівнянні з серійними зі сталі 65Г. деталей їхня довговічність збільшується в 1,5...3 рази [12].

У практиці зміцнення деталей сільськогосподарських машин найбільше поширення набула наплавка. Наплавлення шаром легуючого порошку (суміш зерноподібних феросплавів, карбідів, металевих порошоків або литих твердих сплавів) має ряд позитивних якостей.

В даний час розроблено та

запропоновано безліч складів легуючих сумішей для наплавлення. Наприклад, сталініт, сормайт, борідна суміш БХ, шихта ВІСХОМ-9, механічна суміш подрібненого вольфраму з вуглецем (вокар) та ін. Технологія виготовлення наплавлення високохромистим спеціальним чавуном без нагріву розроблено авторами [9], вони визначили основні напрями підвищення якості наплавлення молотків зернодробилок, за рахунок заміни ручного дугового зварювання на плазмове наплавлення з використанням високошвидкісних твердих наплавних матеріалів. Технологія зміцнення наплавленням полягає в наступному. Механічна обробка робочих граней. На фрезерному або наждачному верстаті знімають шар металу, замість якого наносять зносостійке покриття. Нанесення обмазки з суміші, що легує, на бічні грані молотка. Склад компонентів суміші має відповідати умовам роботи молотка. Просушування обмазки на повітрі (24 год) і печі чи ковальському горні при температурі 250...300°С протягом 1,5...2ч. Наплавлення вугільним або вольфрамовим електродом діаметром 10...12 мм, при силі зварювального струму 250...280 А. Після наплавлення бічних граней повторюють усі попередні операції для торцевих граней. Механічна обробка наплавлених поверхонь (за потребою) на обдирочно-заточному верстаті та припасування молотків по масі. Для наплавлення використовується електродний дріт марки Св08Г2С діаметром 1,6 мм.

Технологічні параметри наплавлення: сила зварювального струму 220...240А; швидкість подачі електродного дроту 18 м/год; висота шару легуючого порошку 4...5 мм; швидкість наплавлення 20 м/год. Довговічність молотків при такому зміцненні збільшується у 2...2,5 рази [4]. Дещо інша технологія наплавлення робочого контуру молотків зі сталі 35 електродів Т-590. Товщина наплавленого шару 1,5-2,0 мм, твердість 50-55 HRC. Після наплавлення молотки піддають об'ємній термічній обробці до твердості 36...42 HRC. Однак вони мають невисокий ресурс довговічності через недостатню товщину покриття. Більше зносостійке з'єднання виходить при індукційній напавці молотків сплавом ПР-С27 ГОСТ 21449-75. Індукційну напавку молотків проводять у холодному тиглі. Товщина наплавленого шару - 6 ... 8 мм, твердість - 57 ... 61 HRC [75]. Технологія підвищення ресурсу молотків за допомогою електрошлакової Наплавлення порошкових зносостійких матеріалів складається з кількох етапів. На зношену та підготовлену для наплавлення сторону молотка надягається мідний кристалізатор, в якому передбачена порожнина для ванни, що охолоджує. Зверху знаходиться пластинчастий вугільний (графітовий) електрод. Перед початком наплавлення кристалізатор засипається флюс (наприклад. АН-22). Торканням електрода на деталь (молоток) при включеному джерелі постійного струму збуджується електрична дуга, яка розплавляє флюс. Після повного розплавлення в зону наплавлення рівномірно засипається зносостійка шихта (суміш феросплавів або гранульований сормайт). Шихта розплавляючись утворює рідку ванну, а флюс спливає її поверхню. Процес продовжується до повного відновлення початкової форми молотка. Зносостійким матеріалом для наплавлення може бути гранульований сормайт, сталініт або суміш феросплавів. Джерело постійного струму для даного способу служить зварювальний генератор або випрямляч із силою струму не менше 500 А. Плоский вугільний електрод круглого перерізу діаметром 10...12 мм. Ресурс молотків при цьому способі зміцнення, наплавлених сормайтом, зростає у 1,5...2 рази, а сумішшю феросплавів – у

2...2,5 разу [9]. Однією з високопродуктивних технологій зміцнення деталей є точкове дугове наплавлення, запропоноване інститутом електрозварювання ім Патона. В якості зносостійкого матеріалу, що наплавляється, для молотків використовувався серійно випускається промисловістю порошковий дріт ПП-АН170 параметри зміцнюючого шару розроблені [3]. Ресурс зміцнених молотків в 1,8...2 рази вищий за серійні. Як конструктивне рішення, покращує ефективність та зносостійкість, пропонується формування ударної робочої частини молотка, а саме: створення триметалічного прокату, периферійна частина якого виконана із зносостійкого матеріалу за допомогою наплавлення зносостійкими матеріалами – евтектичними покриттями, сплавом ПР- С27,37, 35, ПП-АН2. Найбільш перспективним напрямком є дослідження з застосування металокерамічних, мінералокерамічних, композиційних матеріалів та шаруватих металокомпозитів [11], а також розробку конструкцій принципово нових молотків, що використовують високу зносостійкість матеріалів, переваги технології пресування спікання та спаювання деталей, а також нові доступні для масового виробництва варіанти кріплення зносостійких пластин.

Технологія створення зносостійких покриттів на робочій поверхні молотків методом високошвидкісного лазерного напікання порошкових матеріалів, коли він формуються градієнтні покриття [7]. Однією з технологій, що забезпечують нанесення градієнтних покриттів, є селективне лазерне спікання (SLS) [18]. Для отримання зносостійких покриттів застосовується порошкова композиція марки ПГ-СР4 (ГОСТ 21448-95). Покриття наносили двома різними способами: на поверхню торця прямокутного молотка, а також на бічну поверхню молотка. Як джерело енергії використовували лазерне випромінювання, що генерується твердотільний лазерний генератор «Булат». Швидкість нанесення покриття 25 мм/с. Процес обробки виробляли у захисному середовищі аргону. Використання градієнтних покриттів вирішує проблеми низької міцності

адгезії покриття до молотка. Метод дозволяє отримувати покриття із складних порошкових композицій з адгезійною міцністю, наближеною до міцності матеріалу підкладки з товщиною від 0,5 до 1 мм [13]. Задовільні результати щодо зносостійкості молотків отримані при зміцненні робочих граней сплавом, що самофлюсується, системи Ni-Cr-B-Si-C. На зношену частину молотка зернодробилки зі сталі 65Г, а також на робочі поверхні нового молотка, виготовленого зі сталі 30, після дробоструминної обробки способом плазмового напилення наносився самофлюс ПГ-12Н-03 з 5% WC з подальшим пічним оплавленням при 1050...1100°C з. Для напилення використовували установку УПУ-3Д, укомплектовану джерелом живлення ІСН 160/600. Як плазмоутворюючий газ використовували аргон, гранулометричний склад порошку – 100...150 мкм, температура просушування порошку – 100...150°C протягом двох годин, попередня підготовка основи – дробоструминна обробка чавунної крихтою, дистанція напилення - 70 ... 80 мм, температура попереднього підігріву підкладки - 100 ... 120 ° С. Таке зміцнення покриттів за рахунок подрібнення їх структури та цілеспрямованого формування значної кількості евтектики та зміцнювальних фаз забезпечує підвищення зносостійкості сплавів 65Г та сталі 30 з плазмовим покриттям ПГ-12Н-03 з добавкою WC та без неї в 1,5...2 рази [14].

Одним з нових способів є зміцнення молотка зернодробилки індукційною наплавкою. високолегованого хромистого чавуну марки ПГ-УС25 (ГОСТ 21448-95). Підвищення терміну служби деталі досягається тим, що перед зміцненням по периметру одного або обох кінців однієї зі сторін пластини, на відстані 2...2,5 мм від її країв, виконують отвори або пази на глибину 1/2...1/3 товщини зміцнюваного молотка, при цьому розміщення отворів повторює обриси. зернодробилки, зміцнених цим способом, показали, що зносостійкість і ресурс деталі збільшилися на 18...20% [2, 13]. Інститутом проблем лиття та Інститутом надтвердих матеріалів, був створений спеціальний молоток-модуль, на який кріпилися зносостійкі

матеріали методом зварювання, паяння або склеювання за допомогою смоли «Спрут». виготовлялися із зносостійких матеріалів КХНФ-15 та КХЖ-70, базальтового кам'яного лиття, матеріалів на основі карбідів титану та пластинки з різних полімерів. Отримано підвищення зносостійкості молотків у 2...3 рази за рахунок застосування матеріалів КХНФ-15 та КХЖ-70. У таблиці 1.2. представлена коротка характеристика матеріалів і технологій зміцнення молотків технологічним і конструктивно-технологічним методами. Під групою організаційно-технологічних факторів, що впливають на ресурс молотків, маються на увазі: особливості організації технологічного процесу подрібнення матеріалу, що зменшується; [9, 18].

Таблиця 1.2. - Коротка характеристика матеріалів та технологій зміцнення молотків технологічним та конструктивно-технологічним методами.

Матеріал і технологія зміцнення	Товщина робочої частини, мм	Зміцнює травня поверхня	Матеріал зміцнення	Спосіб зміцнення	Глибина (Товщина) зміцнюємого шару, мм	Твердість зміцненій зони, HRC	Напрацювання досягненні граничного зносу, т
Сталь 65Г (серійний)	4			загартування		54	200
Сталь 65Г, лазерна обробка	5	бокова		лазерна обробка	0,4...0,5	по HV	250...300
Ст3, дискретне легування	4	бокова	ПП-АН170	електродуговий контактний	до 4	59...61	400...450
Сталь 65Г, евтектичне покриття	4		система Fe- Mn- C-B	індукційна наплавлення	0,1...2,5		400
Сталь 65Г, евтектичне покриття	4		система Fe- Mn- C-B	індукційна наплавлення	0,1...2,5		400
Ст3, модуль на платівка КХЖ-70	8	модуль на платівка	КХЖ-70	припаювання зносостійкої платівкою	8	60...65	400...420
Сталь 65Г, мікроплазма	4	бічна та торцева	ПП-АН148	мікроплазмова зварювання	2...3	60...62	430
Сталь 45, мікроплазма	5	збоку			2...3	60...62	550
Графітیزована сталь, лиття	12		125СРЛ	ливарна технологія	12	56...72	1000

Проаналізувавши різні фактори, що впливають на зношування молотка, Різні методи зміцнення, ми дійшли висновку про створення принципової нової конструкції молотка, яка дозволить усунути недоліки попередніх моделей та принципово змінить характер зношування, а також суттєво підвищує експлуатаційний ресурс молотків за рахунок ефекту самозагострення.

1.5. Розробка технології комбінованого зміцнення молотків.

Причиною абразивного зносу є частинки розміром десятки мікрон, за своїм мінералогічним складом близькі до кварцу (у зерновий масі мінеральних домішок міститься до 5%), а також пісок та каміння, які є постійними домішками зерна. Крім того, до 3% молотків виходить з ладу при зіткненні про не подрібнені матеріали, що випадково потрапляють в дробильну камеру [12]. Аналіз зміни профілів у процесі зношування показує, що максимальний знос спостерігається у зоні максимальних тисків, тобто. у вершині кута робочої частини молотка. При цьому молоток швидко втрачає прямокутну форму, а замість ребра, що виступає, утворюється деяка поверхня тертя. У міру зношування істотно змінюється геометрія торцевої поверхні, що поступово набуває опуклий криволінійний профіль. Надалі форма торцевої поверхні стабілізується, а превалюючий знос спостерігається лише у напрямку зменшення довжини молотка (рис. 1.6) [11].

Внаслідок зносу молотків, що супроводжується заокругленням лобової грані, замість лобових ударів подрібнений матеріал сприймає удари з прослизанням, що значно погіршує його взаємодію з декою (решіткою).

В результаті зношування збільшується зазор між молотком і решетом (декою), що сильно скорочує зону впливу молотків. Усе це позначається падінні продуктивності зернодробилки на 30...45% і збільшення енергоспоживання на 25...35% [12].

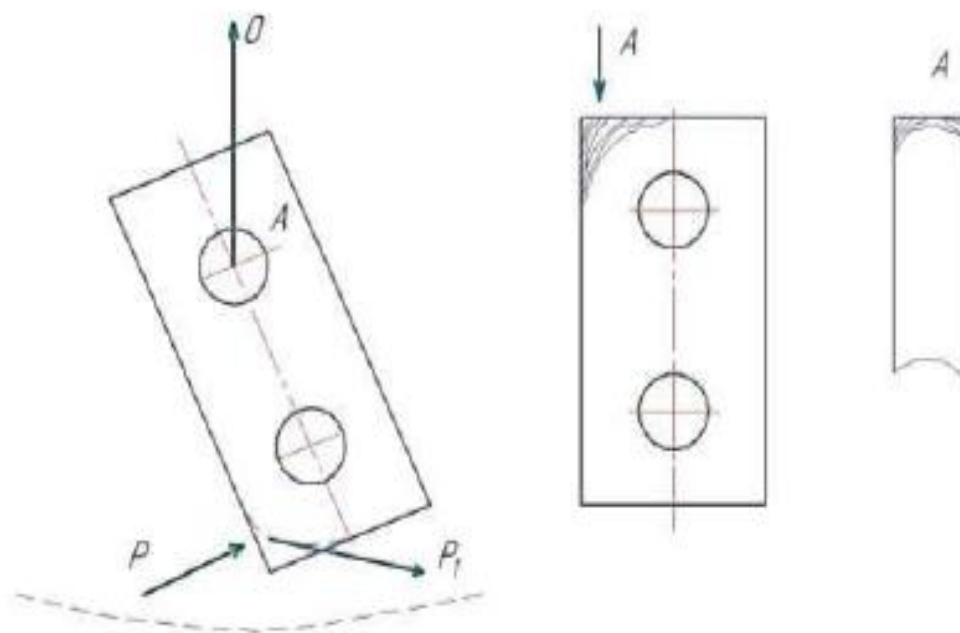


Рис. 1.6 – Умовна схема роботи та характер зносу серійних молотків.

Багаторічна експлуатація зернодробилки показала, що пропоновані в даний час способи підвищення ресурсу молотків не знайшли широкого застосування в практиці агропромислового комплексу, очевидно, з причин їх недостатньої ефективності та технологічності.

Для реалізації ідеї самозаточення у процесі експлуатації молотків пропонується зміцнення робочої кромки вольфрамокобальтовими твердосплавними пластинками (ВК8) індукційною пайкою із застосуванням спеціального високоміцного залізовуглецевого сплаву (рис. 1.7).

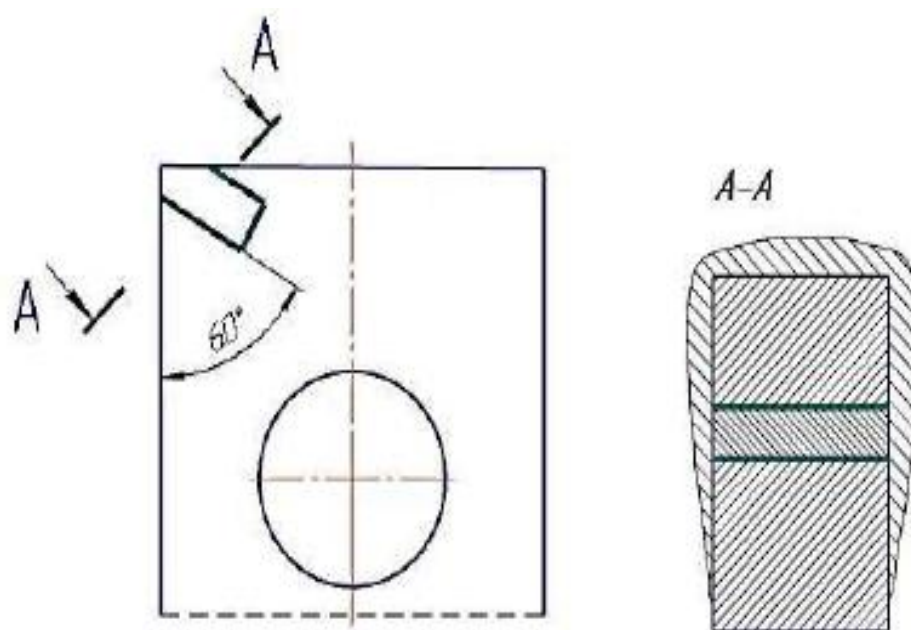


Рис. 1.7 –Комбіноване зміцнення молотків.

2. ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ МОЛОТКІВ КОМБІНОВАНИМ ЗМІЦНЕННЯМ.

2.1. Методи визначення зносу молотків зернодробилок.

Теоретичний аналіз зміни профілів молотків зернодробилок у процесі зношування показує, що найбільше зношування спостерігається у зоні максимальних тисків, тобто. у вершині кута робочої частини молотка. При цьому молоток швидко втрачає прямокутну форму, а замість ребра, що виступає, утворюється деяка поверхня тертя. У міру зношування істотно змінюється геометрія торцевої поверхні, що поступово набуває опуклий криволінійний профіль близький до параболічної поверхні. Надалі форма торцевої поверхні стабілізується, а превалюючий знос спостерігається лише у напрямку зменшення довжини молотка. Граничним зносом робочої грані вважається знос до головної осі симетрії молотка. Подальша його експлуатація можлива після перестановки молотка на осі ротора новою робочою гранню у бік продукту, що подрібнюється. Отже, для забезпечення високої ефективності виробництва кормів – необхідне застосування робочих органів – які мають достатній запас експлуатаційного ресурсу та зносостійкості за рахунок конструктивно-технологічних заходів, на досягнення чого і спрямована технологія комбінованого зміцнення робочих органів зернодробилок робочої кромки твердосплавною пластинкою із застосуванням FeC-припою. Оцінка зносу молотків, незважаючи на їх просту форму, представляє експериментальні проблеми. Широке застосування в практиці знайшов метод визначення зносу втратою маси, коли після певного напрацювання молоток повинен бути ретельно очищений, зважений, а потім для збереження балансування встановлений на роторі в попередньому положенні. Даний метод трудомісткий і дозволяє визначити знос тільки у вигляді втрати маси, не даючи інформації про форму зношеного молотка, що обмежує можливості його застосування монометалічними однорідними молотками, коли параболічна форма

профілю, що зношується, відома [8]. У процесі обробки дослідних даних за методом визначення зносу втрати маси знаходяться такі показники:

1) абсолютне зношування молотка, г.

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

де m - маса нового молотка, р.;

m' – маса зношеного молотка, р.

2) відносний знос молотка, %.

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

де Δm_q – гранично допустиме абсолютне зношування однієї робочої грані молотка, г.;

3) питомий знос молотка, г/т:

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

де $\Sigma \Delta m$ - абсолютний знос партії молотків, р.; G – кількість переробленого матеріалу, тобто.

Залежність абсолютного зносу молотків за втратою маси від кількості подрібненого матеріалу зернодробилок представлена на рис. 2.1.

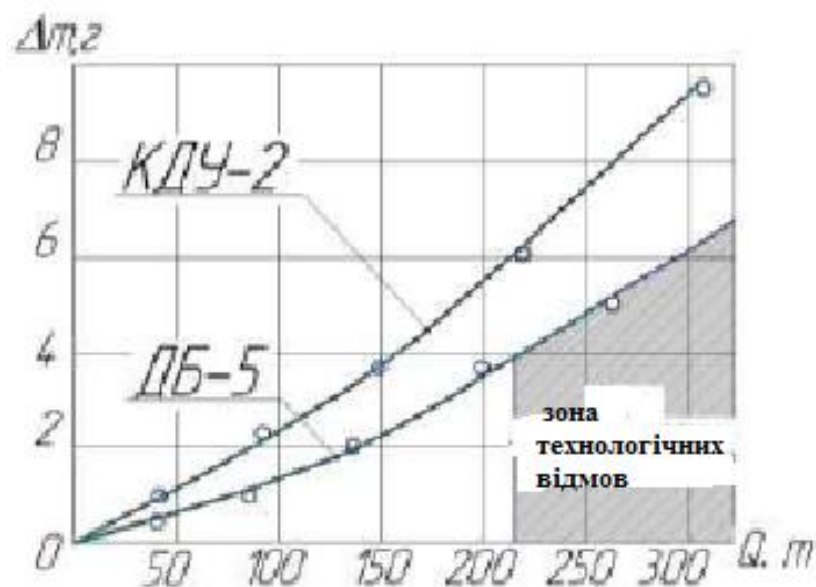


Рис. 2.1 – Залежність абсолютного зносу втратою маси молотків від кількості подрібненого матеріалу.

Допустиме абсолютне зношування однієї робочої грані являє собою втрачену в процесі експлуатації масу молотка, зношеного до половини його ширини. Застосовувані методи підвищення ресурсу молотків найчастіше впливають форму профільних кривих зносу у бік збереження більш тривалої працездатності. Внаслідок цього метод визначення зносу втратою маси, що не передбачає аналізу форми бойкової частини молотка, виявляється малоприйнятним. Залежність між величиною зносу, визначеними за втратою маси та втрати площі, може бути представлена наступною формулою:

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

де Δ - товщина молотка (мм);

γ – щільність матеріалу молотка (г/мм³);

S – площа (мм²).

Згідно з формулою 2.4, знаючи площу зносу можна визначити кількість втраченої маси молотка під час експлуатації. Для визначення площі зносу молотка відомий координатний метод вимірювання зносу, при використанні якого, задаючись декількома значеннями однієї координати в площині молотка положення лінії зношеного профілю, визначаються величини іншої координати, що характеризують знос профілю. Точність методу збільшується зі збільшенням кількості точок виміру,

що призводить до зростання обсягу та ускладнення обробки результатів. У

роботі [11] описано пристрій для вимірювання зносу молотків. У основі його закладено один з різновидів координатного методу, коли молоток міститься в полярну систему координат з фіксованими значеннями кутової координати. За величиною радіусів визначаються значення зношування, у вимірюваних точках профілю молотка. Пристосування дозволяє отримувати профілі робочих граней молотків без зняття з ротора [10]. Однак, цей метод

зняття профільних кривих не вимірює зношування ребер, що розділяють торцеві і бічні поверхні, і тому похибка у вимірі найбільш висока. При оцінці точності визначення площі зношеної ділянки молотка, знятого за допомогою міліметрового паперу, при незалежних повторностях вимірювання одного і того ж профілю виявили, що основна помилка вимірювань залежить від якості візуального підрахунку площі зношеної ділянки.

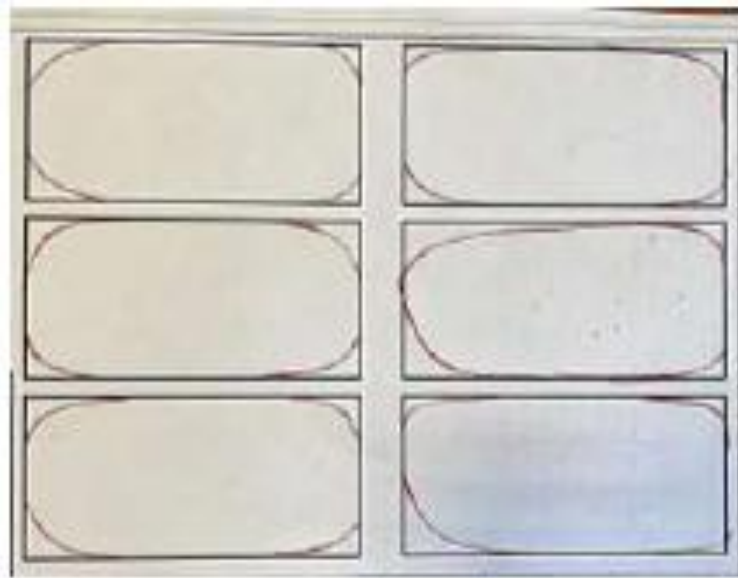


Рис. 2.2 – Профілі зношених молотків.

Для визначення площі зношеного профілю молотків та для підрахунку зношених ділянок графоаналітичним методом шляхом побудови профільних кривих за допомогою планіметрів та визначення площі зношеної ділянки. Результати вимірювань величин зносу молотків при використанні вимірювань зносу шляхом масового методу і графоаналітичного вказують на суттєві відмінності в отриманих даних. Однак графічні залежності, побудовані за результатами вимірювань, є залежностями ідентичного характеру змін зносу від напрацювання (рис. 2.3).

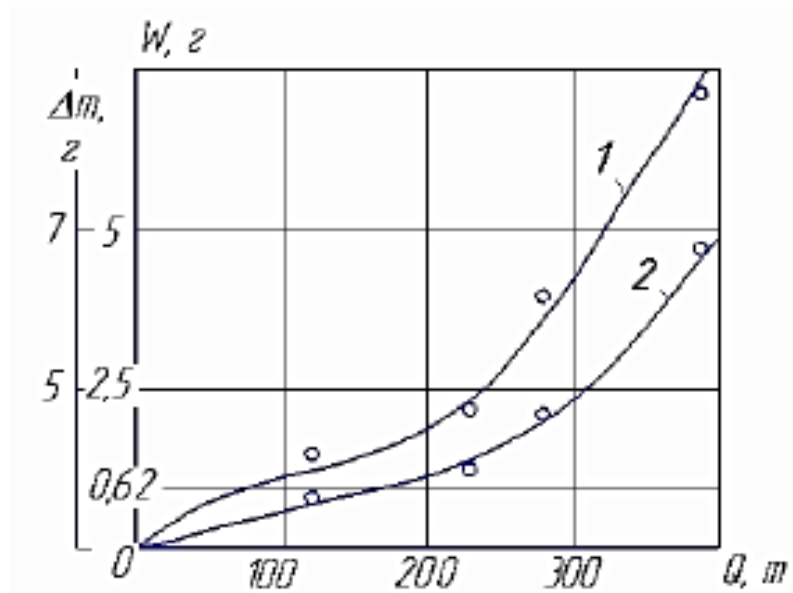


Рис. 2.3 – Динаміка зношування молотків під час вимірювання зносу: 1 – масовим методом; 2 – графоаналітичним методом.

Статистична обробка результатів візуальних вимірювань при графоаналітичному методі дозволила встановити, що при рівні довірчої ймовірності 0,95 допустимої щодо процесів зношування молоткових робочих органів, вони знаходяться в межах 122...158мм², а відносна похибка становить приблизно 2%. Кількісна оцінка графоаналітичним методом визначення зносу молотків проводиться за втратою площі, утвореної первісним профілем (прямими $x = 0$, $y = 0$, представленими на рис. 2.4) і профілем, отриманим в результаті зношування (крива $y = f(x)$). При цьому площа визначається формулою:

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

де x_k - точка, що відповідає граничному зносу робочої кромки молотка

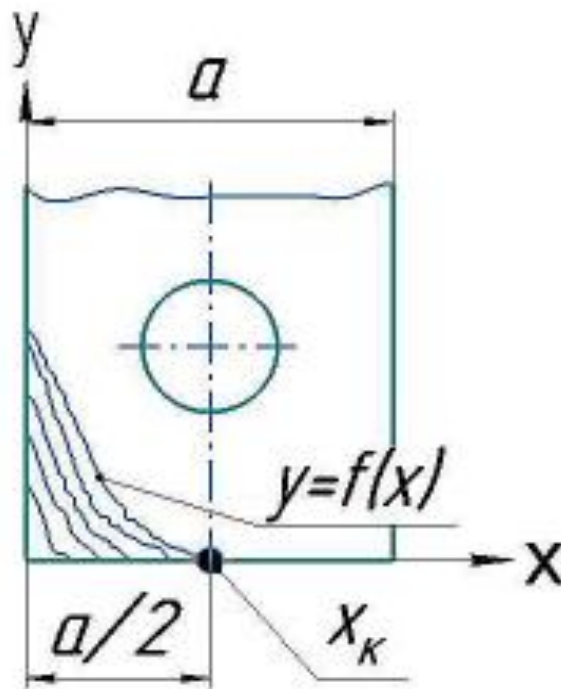


Рис. 2.4 - Профільні криві зміни форми ударної частини молотка.

Таким чином, при визначенні зносу молотка скористаємося графоаналітичним методом побудов кривих зносу, за якими визначається площа зносу, яка залежить від напрацювання молотка.

2.3. Обґрунтування технологічних властивостей FeC-припою для зміцнення робочих крайок молотка твердим сплавам.

Виходячи з аналізу умов роботи робочих органів зернодробилок та результатів попередніх досліджень, була висунута гіпотеза про можливості підвищення ресурсу робочих органів конструктивно-технологічними методами за рахунок комбінованого зміцнення робітників кромки молотка твердим сплавом за допомогою спеціального FeC-сплаву, використовуюваного як припой. [9,11]. FeC-сплави широко використовуються в різних галузях промисловості як конструкційні матеріали, причому, будучи дешевшими у виробництві, мають значно вищі механічні властивості. Відповідно до висунутої гіпотези було встановлено, що для зменшення зносу робочої кромки молотків зернодробилок доцільно

застосувати комбіноване зміцнення, яке суттєво змінить конструкцію молотка (рис. 2.5). Передбачається молоток виготовляти із сталі Ст3 та зміцнювати твердосплавними пластинками ВК8, які розташовуються кутом до робочих кромek і закріплюються за допомогою індукційного паяння на FeC-припій. FeC-припій має підвищену зносостійкість у порівнянні з матеріалом самого молотка. Дифузія елементів з FeC-припою під час паяння забезпечує науглерожування матеріалу основи молотка, що забезпечує спільну роботу зміцнюючого елемента та матеріалу молотка.

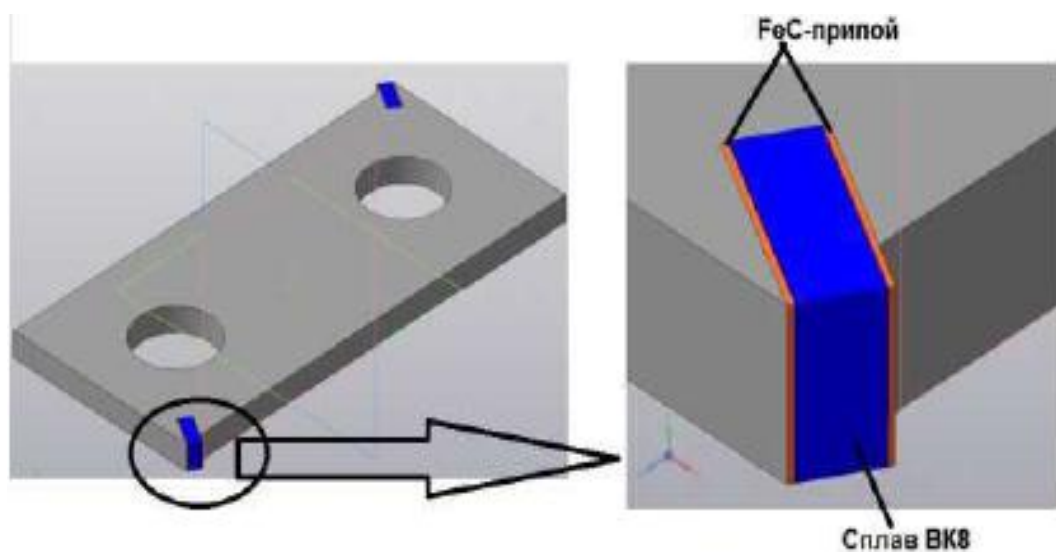


Рис. 2.5 – Модель зміцненого молотка.

Теоретичними концепціями та припущеннями при вирішенні поставленої завдання з'явилося таке:

1. Досліджувана технологія паяння на базі FeC-припою забезпечує показники якості паяного з'єднання твердосплавної пластинки та молотка високу міцність за сприятливого характеру напруженого стану, тобто. FeC-припій забезпечує такі властивості з'єднання, які дозволяють підвищити ресурс молотків зернодробилок при експлуатації.
2. Застосування зміцнених молотків твердосплавною пластинкою, застосовуємо FeC-припою дозволить експлуатувати їх у більш продуктивному оптимальному режимі без їх руйнування до граничного

зносу, що забезпечить підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат при виробництві кормових сумішей.

Відомо, що основною експлуатаційною вимогою, що висувається до молоткам, які працюють у важких умовах, є вимога високої зносостійкості та міцності, які забезпечуються службовими властивостями твердих сплавів, рівнем та характером напруженого стану на робочих гранях молотків та фізико-механічними властивостями, які визначають ресурс молотків. При цьому від паяного з'єднання потрібна висока жорсткість і міцність при низькому рівні напруги в твердосплавній пластинці.

Аналіз та виробничий досвід експлуатації дозволяє зробити висновок, що застосовувані нині припої, переважно з урахуванням мідних сплавів [2, 5,], не задовольняють виробництву робочих органів машин у гірничодобувній промисловості, кормопереробному виробництві тощо. Отже, сформулюємо основні вимоги, яким має задовольняти FeC-припій у порівнянні з відомими [1, 5,].

Такими вимогами мають бути такі:

1. Вищі механічні властивості матеріалу припою, що забезпечить високу міцність і жорсткість паяного з'єднання, отже, ресурс молотків.
2. Достатня рідина плинність і змочування паяних поверхонь твердого сплаву та сталі розплавом припою, що поєднуються зі здатністю до дифузійної взаємодії з обома матеріалами.

Подібне поєднання якості матеріалу припою слід вважати особливо цінним, оскільки дозволяє згладити різкий перепад напруги на межі «твердий сплав – FeC-припій» при одночасному «заліковуванні» поверхневих мікродефектів (концентраторів напруг, що мають місце у вихідному стані, які можуть виникнути в процесі паяння).

3. Найменша відмінність за коефіцієнтом теплового лінійного розширення (КТЛР) між матеріалом припою та матеріалами, що з'єднуються – твердим сплавом та сталлю, що забезпечувало б низький рівень напруг.

4. Здатність матеріалу припою до релаксаційних процесів у паяному шві в результаті, наприклад, внутрішньофазових перетворень при кристалізації та зміні температури, регульоване перебіг яких дозволило б впливати на кінцеву структуру та механічні властивості матеріалу припою, а, отже, і на властивості паяного з'єднання в цілому.

5. Температурний інтервал технологічного процесу паяння повинен відповідати температурі структурно-фазових перетворень конструкційного матеріалу, тобто. термічний вплив при пайці не повинен негативно впливати на властивості міцності твердого сплаву і матеріалу молотка.

6. Технологічний процес виробництва зміцнених молотків твердими сплавами має бути досить гнучким, наступним чинним технологічним процесам, не містити додаткових операцій, що ускладнюють та подорожчають їх виробництво.

7. FeC-припій повинен містити мінімальну кількість дефіцитних та дорогих елементів. Указаним вимогам певною мірою задовольняють залізовуглецеві сплави (FeC-сплави), що містять більше 2,14% вуглецю і відносяться до чавунів. Ці сплави широко використовуються в різних галузях промисловості як конструкційні матеріали, будучи дешевшими у виробництві, мають значно вищі механічні властивості.

Припої на основі FeC-сплаву дозволяють отримувати паяну сполуку з високою жорсткістю та міцністю, що відповідає або перевершує жорсткість і міцність матеріалу молотка - сталі, тобто значно вищі порівняно з традиційними припоями на основі міді. Фактором, що визначає ефективність застосування FeC-припоїв, є їх висока активність взаємодії по відношенню до сталі та компонентів твердих сплавів. FeC-припій через це має гарну змочуваність по відношенню до металів зв'язки та карбідів твердих сплавів. Відомо [6, 10], що залізо в рідкій фазі повністю змочує кристали WC, які є основою більшості твердих сплавів, крайовий кут змочування θ° дорівнює нулю, а також добре змочує карбіди інших елементів (TiC, NbC, NiC та ін.), що входять до складу твердих сплавів. FeC-припій характеризується повною

змочуваністю металів зв'язки (Co, Ni, Mo) та утворює з ними, як правило, безперервний ряд розчинів [5]. Мідні припої при цьому взаємодіють тільки зі зв'язкою [9], в системі WC-Cu змочуваність та розчинність дуже обмежені, а в системі (TiC-WC)-Cu змочуваність і розчинність відсутні, чим і пояснюється погана паяність твердих сплавів зі зниженим вмістом Co і твердих безвольфрамових сплавів.

Отже, при пайці FeC-припоєм матиме місце активний об'ємно-дифузійний характер взаємодії FeC-припою зі сталлю твердим сплавом [5, 9]. Ця обставина забезпечує хорошу паяність FeC-припоями різних твердих сплавів, зокрема ВК8 [14]. Основними проблемами, що стримують застосування FeC-сплавів як припоїв для виробництва зміцнених молотків твердими сплавами, є питання неузгодженості паяного з'єднання на кордоні «твердий сплав – FeC-припій», а також їхня вища температура плавлення (1200°C), що сприяє, як стверджують деякі дослідники [6, 8], перегріву та зниженню фізико-механічних властивостей твердих сплавів. Однак ці труднощі цілком переборні, що було підтверджено досвідом ливарних технологій виробництва твердосплавних виробів [7, 9] та паяних інструментів на основі FeC-припою [6, 9]. У зв'язку з цим дані питання вимагають додаткового теоретичного розгляду та експериментального підтвердження стосовно комбінованого зміцненню твердосплавними пластинками молотків зернодробилок з застосуванням FeC-припою.

2.4. Обґрунтування структурного складу матеріалу паяного шва молотка.

На підставі розглянутих вище вимог, що висуваються до властивостей паяної сполуки твердосплавної пластинки та молотка, слід обґрунтувати структурний стан матеріалу шва, паяного вибраним FeC-припоєм. Раніше було встановлено, що у мікроструктурі паяного шва необхідно наявність фази, що виділяється зі збільшенням обсягу матеріалу FeC-припою-графіту,

виділення якого можна розглядати як процес, відповідальний за релаксацію напруги. Дана фаза сама по собі має малу міцність на розтяг, (таблиця 2.3), але перебуваючи в ізольованих мікрооб'ємах матриці, добре витримує стискаючі навантаження. Будова його шарувата, він легко розщеплюється по площинах спайності на окремі шари-лусочки через велику відстань між шарами і малий зв'язок між ними. Тому можна припускати, що графіт є мікроподатливим матеріалом, здатним зрушуватися під дією навантаження і не перешкоджати металевій пружності. наявність графіту в металевій матриці робить її нечутливою до концентраторів напруги. Графітові виділення можуть мати різні контури, в цих умовах найбільш імовірно пластинчаста будова у вигляді інтеркристалітних субмікротріщин, що з'єднуються один з одним. [8, 9, 15]

Таблиця 2.1 - Фізико-механічні властивості структурних складових FeC-сплавів.

Структурні складові	Умовне позначення	Можливе у структурних елементів, %	Питома обсяг фази, см3/моль	Коеф-ет лінійного розширення (20 ... 100 ° C), $\alpha \times 10^{-6}$	Твердість, НВ	Межа міцності при розті-ження св, МПа	Віднос-те льн подовж-ня, δ , %
Рідка фаза	Ж	0...100					
Аустеніт	А		25,48	18...19	2000		40...60
Феррит	Ф	10...90	21,27	21,27 12,5	1100 ... 1300	360...450	15...25
Перліт	П		22,6	10...11	1500 ... 2500	800...1000	15...20
Графіт	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
Мартенсіт	М			11,5	6500 ... 7500		
Спец. карбіди		0...80					

Несприятливим слід вважати великопластинчасті виділення графіту – що значно знижують механічну міцність матеріалу паяного шва. Досвід ливарних технологій [7] та паяних FeC-припоями [6, 9] підтверджує необхідність наявності у матеріалі з'єднання твердого сплаву та основи молотка структурно-вільного вуглецю, вміст якого при сприятливій мікроструктурі становить 5...8% поля мікрошліфу. Мікроструктура металевої матриці паяного шва може бути обґрунтована на підставі фізико-механічних структурних властивостей складових FeC-сплавів. Слід зазначити, що дані, що наводяться в таблиці 2.1, носять лише орієнтовний характер і багато в чому обмежуються даними для вузького температурного інтервалу (20 ... 100 ° C), повні відомості досить обмежені та різномірні. Однак, незважаючи на відсутність таких докладних даних, дозволяють з

деяким ступенем наближення довести структурний стан матеріалу паяного шва. Так, наприклад, якщо сформувати паяний шов з переважаючою аустенітною структурою, чому сприяє легування FeC-сплавів, слід очікувати високих небезпечних стискаючих напруг при достатній міцності. Графітизація у своїй буде утруднена, а аустеніт має КТЛР в 4...4,5 разу вище, ніж в твердих сплавів. Перлітна матриця хоч і буде міцною, але утворення тріщин не виключено при нерозвиненій графітизації або великодисперсної структури. Жорсткість у своїй нижче, ніж в цементитної структури. Феритна основа є технологічно малоймовірною паяного шва. Така основа не забезпечить релаксацію залишкової паяної напруги (ГНН) і має малу міцність. Цементитна основа - хоч і має ТКЛР близький до твердих сплавів (у інтервалі низьких температур), є альтернативою графітизованою і практично виключає релаксацію ГНН. Одночасно цементит має високу твердість і відсутність пластичності. Практика показала, що цементитна структура (ледебуритна) є найбільш несприятливою і однозначно створює неприпустимо високу стискаючу напругу, що призводить до при підшовних тріщин у твердосплавній пластинці. Керуючись наведеними міркуваннями, можна встановити, що високонадійне паяне з'єднання, що характеризується низьким рівнем залишкових паяних напруг (ЗПН) при досить високій міцності, забезпечуватиме графіто-перліто-цементитна структура матеріалу FeC-припою з розвиненими дифузійними зонами на кордонах «твердий сплав – FeC-припій» та «FeC-припій». У такому стані цементит забезпечує жорсткість, перліт – міцність та в'язкість, а виділення графіту компенсують напруги між структурними складовими всередині матеріалу FeC-припою та твердим сплавом. Дифузійна зона на кордоні «твердий сплав – FeC-припій» сприятиме перерозподілу граничних напруг та створенню міцної малонапруженої межі розділу, дифузійна зона на кордоні «FeC-припій – сталь» забезпечить зміцнення та підвищення жорсткості підкладки твердосплавної пластинки.

2.5. Умови утворення структури шва, паяного FeC-припоєм.

У попередньому розділі було встановлено, що з'єднання, утворене FeC-припоєм, буде задовольняти експлуатаційним вимогам для робочих органів зернодробилок молоткового типу за умови дифузійної взаємодії FeC-припою з паяними матеріалами «твердий сплав – сталь» та формування графіто-перліт-цементитної (Г-П-Ц) мікроструктури матеріалу шва. Незважаючи на наявні в літературі відомості про застосування для виготовлення твердосплавних виробів із застосуванням FeC-припоїв [6, 10, 12], дослідження структуроутворення таких сполук у літературі практично відсутні. У зв'язку з цим необхідно розглянути структуроутворення FeC-припою в умовах формування паяного шва, ґрунтуючись на сучасних уявленнях про структуроутворення FeC-сплавів з урахуванням умов утворення паяного шва "твердий сплав - FeC-припій - сталь". Відомо, що напрямок структуроутворення FeC-припою, своєму складу близький до FeC-сплавів із вмістом 3,0...4,5 % вуглецю, носить інваріантний характер, тобто при кристалізації може формуватися мікроструктура, як містить структурно-вільний вуглець (сірі чавуни), так і містить весь вуглець у зв'язаному вигляді – цементитна, білі чугу цементить одночасно. Процес зміцнення молотків методом паяння твердосплавних пластинок застосуванням FeC-припою досить близький до процесів, що мають місце в чавуноливарному виробництві [19], і багато з того, що накопичено практикою та дослідженнями з управління структурою та властивостями виливків дуже корисно використовувати при розробці складу припою та самої технології паяння.

Структура FeC-припою у виливках залежить в першу чергу від хімічного складу та швидкості кристалізації, це слід враховувати у структуроутворенні при процесі паяння твердих сплавів, але з деякими обмеженнями. 1. Використання малого обсягу розплаву FeC-припою (порівняно з масою розплаву, що заливається в ливарну форму), в результаті чого не слід

порівнювати умови затвердіння і в першу чергу швидкість охолодження. Молотці такі режими охолодження неприйнятні з технологічних міркувань. Хоча охолодження відбувається на повітрі, але йде воно з вищою швидкістю (10...20 °C/c), що необхідно враховувати з точки зору забезпечення необхідної структури паяного шва. 2. При взаємодії FeC-припою з твердим сплавом та сталлю через Взаємодифузійних процесів відбувається зміна складу FeC-припою. В результаті склад матеріалу шва буде відрізнятися від вихідного, але й величину цих зон у матеріалі паяного шва. 3. Висока швидкість нагріву FeC-припою до температури паяння, припоєм його вихідної структури, наприклад, часткове збереження в розплаві FeC-припою залишків графітових включень, і зазвичай наводить до відбілу поверхні виливки.

При пайці твердосплавних пластинок на молотці FeC-припоєм під перегріванням слід розуміти істотне (більше 30...50° C) перевищення температури плавлення FeC-припою, так як це вплине на розвиток дифузійних зон і швидкість охолодження паяного з'єднання, збільшуючи схильність до переохолодження, що забезпечить переохолодження. 4. Структурування паяного шва супроводжується одночасним зовнішнім впливом напруг, що виникають внаслідок неузгодженої зміни розмірів паяних елементів при охолодженні. При цьому неминучі виникають розтягувальні напруги в припої, які очевидно вплинуть, як на структурування, так і на дифузійні процеси на межах «твердий сплав – FeC-припій» і «FeC-припій – сталь». Отже, у зв'язку з досить обмеженими технологічними режимами паяння твердосплавних пластинок на молотці FeC-припоєм, найбільш важливим фактором, що гарантує властивості паяного з'єднання, є склад припою, таким складом володіє FeC-припою.

2.7. Структурування паяного шва та обґрунтування технологічних режимів паяння зміцненого молотка.

Процес формування паяної сполуки, що відбувається при пайці твердосплавної пластинки та основи молотка, який визначає структуроутворення, складається з ряду послідовних етапів: - нагрівання вузла, що паяється, до температури плавлення; – взаємодія розплаву FeC-припою, флюсу з паяними елементами, що супроводжується дифузійними процесами; - формування паяного шва в період затвердіння та охолодження в верхньому інтервалі температур; – охолодження у нижньому інтервалі температур. Названі етапи, хоч і по-різному, визначають основні закономірності, що характеризують напрямок фізико-хімічних процесів структуроутворення, багато в чому схожі з аналогічними закономірностями ливарного виробництва і можуть бути розглянуті з цих позицій 4. Питання структуроутворення FeC-сплавів, як і FeC-припоїв зокрема, досить схожі та різноманітні. Все різноманіття структурно-фазових перетворень у FeC-сплавах при нагріванні та охолодженні описується загальновідомою суміщеною (стабільною та метастабільною) діаграмою стану цих сплавів, яка вже давно вважається загальновизнаною та широко використовується у виробництві. Виходячи з умов формування паяного шва, найбільш відповідальним є процес графітизації матеріалу шва, що забезпечує релаксацію напруг у паяному з'єднанні при паянні, експлуатаційних нагріваннях виробів, при цьому в шві ймовірно утворення цементиту, який виступає при структуроутворенні як самостійний компонент, конкуруючий графіту (це і є причиною згадки FeC-сплавів). Дослідженню графітизації FeC-сплавів присвячено безліч робіт. Важливість безперервних досліджень впливає з того, що в ливарному виробництві було і залишається центральним питання про перерозподіл вуглецю в структурі сплаву між металевою основою та графітом, оскільки це в основному визначає властивості даних матеріалів.

Ще 1997 року [17] констатував суперечливість теоретичних поглядів на процес графітизації та відсутність єдиної думки по жодному з його етапів. Подібне становище зберігається і до теперішнього часу, про що свідчать

численні огляди, що періодично розглядають і класифікують різні теорії графітизації FeC-сплавів, що описуються як вітчизняними, так і зарубіжними авторами [6, 14]. У зв'язку з цим розглянемо деякі, на наш погляд, визначальні структуроутворення FeC-припою, положення, що впливають із раніше розглянутих особливостей умов структуроутворення паяного шва. Теоретично та експериментально доведено, що у розплавленому стані сплави є неоднорідними і мають мікрооб'єми, звані «кластерами», близькі за складом і будовою до фаз, що є в твердому стані. Так, рентгенографічними методами у розплавах чавуну виявлено мікрооб'єми, близькі за будовою до аустеніту, цементиту та графіту, які зберігалися після початку кристалізації – у рідко-твердому стані [15]. На підставі цього в даний час розробляються основи теорії рідко-твердого стану FeC сплавів і описується існування експериментально встановлених високотемпературних різновидів вуглецю - карбіду, який можна розглядати як «предграфіт» або «предцементит» [5, 8]. Виходячи з висловлених положень можна зробити висновок, що структуроутворення шва, паяного FeC-припоєм певною мірою буде керованим при обмеженій температурі нагріву під паяння у вихідній будові FeC-припою, що має у своїй мікроструктурі велику пластинчасту будову графіту. У зв'язку з цим доцільно при виплавці FeC-припою мати пластинчасту будову графіту з феритною або феритно-перлітною металевою матрицею мікроструктура вихідного FeC-припою наведена на рис. 2.6.



Рис. 2.6. - Мікроструктура FeC-припою ($\times 250$).

Важливими моментами у формуванні структури шва є: дифузійні процеси взаємодії FeC-припою зі сталлю та твердим сплавом, що призводять до зміни складу мікрооб'ємів, що сполучаються, причому їх характер у взаємодії зі сталлю та твердим сплавом різний; виникнення негативного тиску (розтягуючих напруг) при процесах структуроутворення при затвердінні та подальшому охолодженні паяного шва з метою якісного виявлення впливу дифузійних процесів та розтягуючих напруг на структуроутворення шва, отриманого при використанні FeC-припою, нами були проведені попередні експерименти. Дослідження проводилося індукційною пайкою FeC-припоєм зразків – пластин з різних матеріалів, що відрізняються за температурним коефіцієнтом лінійного розширення та характером дифузійної взаємодії з FeC-припоєм. Пластинки зі сталі та твердих сплавів мали однакові геометричні параметри, що відповідають стандартним твердосплавним пластинкам. При паянні забезпечувалося отримання шва $h_{\text{п}} = 0,5 \dots 0,8$ мм. Умови паяння зразків у всіх випадках були однаковими ($V_{\text{н}} = 30 \dots 40$ °C/с, $t = 1140 \dots 1190$ °C, $t_{\text{в}} = 5 \dots 7$ с), охолодження проводилося на спокійному повітрі ($10 \dots 20$ °C/с) та після затвердіння (1100°). На рис. 2.7 наведено фотографії мікроструктур експериментальних спаїв. Як видно зі знімків, у структурі FeC-припою є суттєві відмінності. У спаї «твердий сплав – FeC-припій – твердий сплав» формується Г+П+Ц мікроструктура, яка, як було встановлено раніше, гарантує якісний стан паяного шва (рис. 2.7 а). При цьому цей напрямок структуроутворення забезпечується на першій стадії кристалізації, хоча при охолодженні у воді (рис. 2.7, г) і спостерігається утворення деякої кількості цементиту (ледебуритної евтектики). Дифузійне розшарування матеріалу шва при цьому незначне.

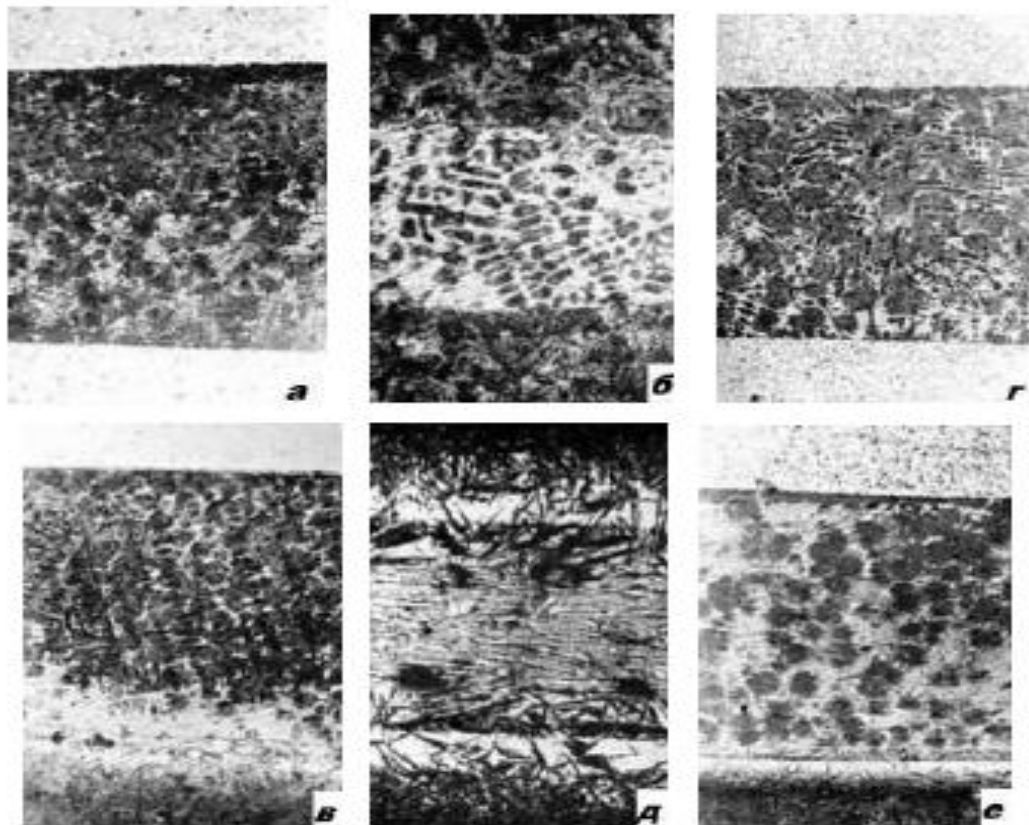


Рис. 2.7. – Мікроструктура паяних сполук зразків ($\times 100$): а, г - "BK8 - FeC-припій - BK8"; б, д – «сталь – FeC-припій – сталь»; в, е - "BK8- FeC-припій - сталь"; а, б, в – охолодження повітря; г, д, е – охолодження із 1100 °C у воді.

Паяний шов «сталь – FeC-припій – сталь» має зовсім іншу мікроструктуру (рис. 2.7, б). Мікроструктура такого шва складається з перліту та ледебуриту, тобто відповідає доєвтектичному стану матеріалу FeC-припою, що є наслідком значної зміни складу вихідного FeC-припою – зменшення вмісту вуглецю, який дифундував у сталь. При охолодженні у воді у припої та дифузійних зонах спостерігаються мартенситні перетворення, ледебурит переважно орієнтується паралельно спаю (рис. 2.7, буд). Паяний шов «твердий сплав – FeC-припій – сталь» (рис. 2.7, в, е) є комбінованим – містить конкуруючі зони, що відповідають раніше розглянутим сполукам. У таких сполуках шов складається із графіту (Г) + перліту (П) + цементиту (Ц) в області, що примикає до твердого сплаву і Ц+П з'єднанні зі сталлю. Таким чином, проведені експерименти дозволили якісно встановити вплив факторів

дифузії та ініціюючий вплив. розтягуючих напружень на структуроутворення (графітизацію), яке до теперішнього часу з такої позиції не розглядалося, хоча в літературі є відомості про вплив напружень на структуроутворення FeC-сплавів. При формуванні паяної сполуки FeC-припою та твердого сплаву, як вказувалося раніше, виникають розтягувальні напруги (негативні тиску), вплив яких щодо цього мало досліджено. Тим не менш, за наявними відомостями, логічно припустити протилежний вплив на процеси структуроутворення FeC-припою напруг, що розтягують.

Виходячи з вищевикладеного і беручи до уваги умови затвердіння FeC-припою, при яких структуроутворення з'єднання в шві сталі з твердим сплавом відбувається під дією напруг, що розтягують, можна зробити висновок про зворотний вплив цих напруг на процеси структуроутворення FeC-припою. В даному випадку слід очікувати підвищення стійкості графіту порівняно з аустенітом, а отже, і з цементитом, що повинно призвести в кінці затвердіння FeC-припою до формування аустеніто-графітного ледебуриту ($L = A + \Gamma$). Надалі, при охолодженні у верхньому інтервалі температур, релаксація напруг у паяному з'єднанні здійснюватиметься за механізмом розвитку інтеркристалітних субмікротріщин, що збільшують первинні виділення графіту, а присутність міді зробить процес незворотним. При евтектоїдних перетвореннях ледебурит під впливом розглянутих умов рекристалізується в перліто-графітну дрібнодисперсну евтектику. В результаті кінцева мікроструктура ($\Gamma + \Pi + \Pi$) відповідатиме структурі, яка гарантує якісний стан паяної сполуки «твердий сплав – FeC-припій». Дані припущення і підтверджуються результатами раніше розглянутих експериментів, при яких у матеріалі шва «твердий сплав-FeC-припій» формується графіто-перлітоцементитна мікроструктура. Крім того, відомий вплив напруги на дифузійні процеси. Так з роботи [15] випливає, що навіть при нормальному тиску процес дифузії не може здійснюватися без супутньої деформації кристалічної решітки сплаву, яка змінює енергетичний стан атомів у решітці і стан всього кристала в цілому і веде до зміни умов

дифузійного переміщення атомів у решітці, тобто позитивний тиск уповільнює. Що стосується паяного з'єднання «твердий сплав – FeC-припій – сталь» слід очікувати зворотного ефекту – інтенсифікації дифузних процесів на межах взаємодії FeC-припою зі сполучними матеріалами. Так, FeC-припій, при відповідному його складі, маючи позитивний градієнт активності вуглецю по відношенню до сталі, що зміцнює опорну зону підкладки паяного шва з допомогою науглеражування, тобто. на кордоні «FeC-припій – сталь» прискорюватиметься дифузія вуглецю до матеріалу молотка. А формування фронту дифузії на кордоні «твердий сплав – FeC-припій» визначатиметься рядом процесів: дифузія заліза у твердий сплав та утворення з металами зв'язки (Co) безперервного ряду розчинів – збільшення об'ємного вмісту металу зв'язки, цей процес слід вважати провідним; змочування та часткове розчинення матеріалом розплаву FeC-припою поверхневих шарів карбідів. Дифузійний перерозподіл елементів, що входять до складу взаємодіючих матеріалів, проведе до неминучого розшарування FeC-припою за складом, а отже, до зміни структури у відповідних мікрооб'ємах шва. Таким чином, існує тісний взаємозв'язок між матеріалами твердого сплаву, FeC-припою та сталі, що утворюють паяну сполуку, їх розмірами, складом та властивостями, якими регламентується технологічний процес виготовлення паяної сполуки твердосплавної пластинки та основи молотка, що передбачає індукційне нагрівання.

Виходячи з цього, для якісного паяного з'єднання молотка і твердосплавної пластинки, що забезпечує релаксацію напруги при високій міцності необхідно дотримання певних технологічних режимів при виконанні кожного з технологічних етапів паяння. 1-й етап - нагрівання вузла, що паяється до розплавлення FeC-припою. Технологічними параметрами даного етапу є швидкість (V_n) та температура (t_n) нагрівання. При цьому максимальна швидкість нагріву в першу чергу обмежена максимальною допустимою швидкістю нагрівання твердосплавних пластинок відповідного типорозміру та марки сплаву ($10...100^\circ\text{C}/\text{с}$); по-друге температурою нагріву

– перегрівом, обумовленим відставанням дифузійно-фазових перетворень при нагріванні СВЧ, температура паяння при цьому обмежена 1200°C (включаючи можливе перегрівання $30\ldots 50^{\circ}\text{C}$), що гарантує стабільні міцні властивості. Мінімальна швидкість нагрівання призначається виходячи з продуктивності паяння, а також збереження деякої структурної спадковості – збереження графітових зародків, при цьому доцільно у складі вихідного матеріалу FeC-припою великопластинчаста будова графіту, мікроструктура вихідного FeC-припою наведена на мікрофотографіях 2.7.

2-й етап - витримка спаю в температурному інтервалі, в якому розплав FeC-припою взаємодіє з твердим сплавом та сталлю. Технологічним режимом є час витримки (тв), яку доцільно оцінювати як час знаходження матеріалу FeC-припою в розплавленому стані. Призначення тв визначається розвитком фронтів зон дифузійної взаємодії на межах «твердий сплав – FeC-припій» та «FeC-припій – сталь», причому очевидно, швидкість розвитку процесів різна; розшаруванням за складом зон матеріалу FeC-припою – визначальний напрямок подальшого структуроутворення.

Визначальним слід вважати розвиток дифузійної зони на кордоні «твердий сплав – FeC-припій», величина фронту якої повинна відповідати розмірам поверхневих мікроефектів (концентраторів напруг), ведучою (з великою швидкістю) очевидно, буде дифузія вуглецю в сталь, що зміцнює опорну зону підкладки паяного шва і що призводить до обезвуглецювання матеріалу FeC-припою. Конструктивно-технологічними параметрами будуть величина фронту зон дифузійної взаємодії FeC-припою з твердим сплавом та сталлю, величина зони евтектичного (графіто-перліто-цементитного) стану матеріалу FeC-припою і, отже, товщина паяного шва загалом.

3-й етап - охолодження паяної сполуки у верхньому інтервалі температур, з вимог технологічності, виробляється на спокійному повітрі зі швидкістю $15\ldots 30^{\circ}\text{C}/\text{с}$. На даному етапі завершуються процеси дифузійної взаємодії на кордонах, і відбувається остаточне затвердіння FeC-припою, що супроводжується виділенням графіту в його структурі як при затвердінні,

так і твердому стані відповідно до раніше розглянутого механізму структуроутворення. Це дозволить ефективно релаксувати напруги у шві при створенні міцного каркасу роздроблених цементитних виділень у металевій основі, що остаточно формується при вторинній кристалізації. Рекристалізація, за наявності провідної фази графіту під впливом напруг, що розтягують, і легування FeC-припою міддю, з аустеніту формується перліто-графітна суміш (евтектика).

4-й етап – охолодження паяного з'єднання молотка та твердосплавної пластинки у нижньому інтервалі температур, при цьому воно не супроводжується активними структурнофазовими перетвореннями в матеріалах паяного шва, охолодження проводиться на спокійному повітрі та обмежена також допустимою швидкістю нагріву. Таким чином, дотримання певних технологічних режимів паяння, отримаємо якісне паяне з'єднання молотка та твердосплавної пластинки із застосуванням FeC-припою.

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

3.1. Методика паяння молотків зернодробилок FeC-припоєм.

В основу вирішення поставлених завдань закладено експериментальні та порівняльні методи дослідження. Експериментальні методи використані при дослідженнях структури складу FeC-припою, технологічних режимів паяння та розробки методики прогнозування залишкових напруг сполук (твердий сплав – FeC-припій – основа молотка) та методики паяння з відсутністю мікротріщин. Порівняльні методи використані при встановленні експлуатаційних показників ресурсу молотків, зміцнених та серійних у лабораторних та виробничих умовах. Відповідно до мети та визначених для її досягнення завдань, розроблено програму експериментальних досліджень, яка включає наступні етапи: - Виявлення закономірностей структуроутворення паяних сполук твердого сплаву та сталі із застосуванням FeC-припою; - обґрунтування структурного складу, раціональних технологічних режимів паяння твердого сплаву та молотка FeC-припоєм, що забезпечують високу міцність з'єднання та релаксацію напруг; - встановлення показників відносної зносостійкості та міцності зміцненого молотка, що впливають на ресурс; - Визначення експлуатаційних показників експериментальних молотків у порівнянні з серійними у виробничих умовах.

Для проведення мікроструктурних досліджень, проведення лабораторних та виробничих випробувань робочих органів, визначення механічних та експлуатаційних властивостей вироблялося виготовлення зразків та партій молотків пайкою СВЧ (струмами високої частоти).

Для проведення лабораторних і виробничих випробувань проводилася паяння прямокутних пластинчастих молотків розміром 110×50мм і товщиною 6 мм. Підготовка паяних поверхонь полягала у формуванні паза у робочій кромки молотка для твердосплавної пластинки на горизонтально-фрезерному верстаті, а також зачистки, видалення задирок і макронерівності.

Спеціальна підготовка не проводилася згідно з раніше проведеними дослідженнями [9].

Попередній контроль якості твердосплавних пластинок, призначених для паяння включав: візуальний огляд з метою виявлення сколів, короблення та макротріщин; для зразків, призначених для дослідження та вибірково з кожної партії здійснювався макроструктурний та мікроструктурний аналіз, а також визначалася їхня вихідна мікротвердість. Твердосплавні платівки без маркування та паспорта для виробництва досвідчених партій робочих органів не допускалися. Паяння вироблялося з використанням індукційного нагрівання високочастотною установкою ЛПЗ-67М. Швидкість нагріву варіювалася в межах оптимізації технологічної операції формування паяного шва з обмеженням максимально допустимої швидкості нагріву твердого сплаву в залежності від розмірів пластинок наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Допустимі швидкості нагрівання твердосплавних пластин при пайці, °C/с.

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

Для визначення наявності тріщин у твердосплавних пластинках до та після паяння здійснювався контроль методом фарб [18]. Контрольовані поверхні очищалися від флюсу та надлишків FeC-припою, шліфувалися та

знежирювалися (10...15% розчин каустичної соди). Після підготовки наносилася червона фарба у два шари з проміжним просушуванням 1хв. Після повного висихання фарби її видаляли (30% розчин гасу та 70% трансформаторного масла) та наносили шар білої фарби. За наявності тріщин поверхні виявлялися їхні сліди. Під час проведення експериментальних металографічних досліджень паяного з'єднання та твердого сплаву здійснювався контроль параметрів: швидкість нагрівання та охолодження, температура та час нагрівання, витримки та охолодження. Контроль часу здійснювався секундоміром, температурний інтервал плавлення. Контроль часу здійснювався секундоміром, температурний інтервал плавлення та кристалізації фіксувався ТЕТРОН-T1300 та хромель-алюмінієвою термопарою з потенціометром ПП-63. Для зменшення похибки, пов'язаної з електричними коливаннями та нерівномірністю теплопередачі, проводилося фіксування звіту від температури 768°C – точка Кюрі [72], при цьому прилади високочастотної установки стрибкоподібно змінювали свої показання. Враховуючи підвищену температуру плавлення FeC-припою, пайка здійснювалася із застосуванням спеціального флюсу [15]. Технологія приготування флюсу представлено у таблиці 2.

Таблиця 3.2 - Технологія виготовлення флюсу.

Найменування операції	Технічні вимоги	Устаткування	Примітка
Складання суміші на 1кг флюсу, кг	Борна кислота-0,36; бура-1,36; фтористий кальцій-0,09	Барабан	Поступово перемішати протягом 20...30 хв
Плавка суміші	Температура 850...900°C, час витримки 1,5...2 год	Електропіч	Витримувати до припинення бульбашки
Виливання та охолодження	Охолодити на повітрі до 50...30°	Лист	
Дроблення, розмелювання Просіювання		Барабан, ступа Сіто, розмір осередків 0,15...0,25 мм	Для таблетизованого припою не більше 0,2мм

Оцінка активності флюсу проводилася за технологічною пробою розтікання FeC-припою поверхнею твердого сплаву. На зачищену поверхню платівки ВК8 розміром 3×6×8 містилася пластинка FeC-припою масою 0,50 мм. 0,55 г, потім порошок спеціального флюсу. Пластинка поміщалася в індуктор і нагрівалася до розплавлення FeC-припою (рис. 3.1). Після затвердіння FeC-припою та охолодження замірялася площа змоченої поверхні. При нагріванні не допускався перегрів понад 1200°C, площа розтікання при цьому відповідала не менше ніж 70... 80%.



Рис. 3.1 – Устаткування для паяння зміцнених молотків.

Нагрів здійснювався у відповідних типорозмірах молотків індукторами. Швидкість, рівномірність та температура нагріву регулювалися: підбором розмірів та конструкцій індуктора; становищем паяного молотка в індукторі; режимами роботи генератора та його періодичними відхиленнями. Паяння зразків з гарантованою товщиною шва здійснювали в пристосуванні забезпечує, необхідний зазор паяється з'єднання. Послідовність переходів при здійсненні технологічного процесу паяння зміцнених молотків твердим сплавом:

1. Укласти пластинку FeC-припою на поверхню молотка, що паяється, попередньо офлюсовану.
2. Засипати тонким шаром флюсу і укласти твердосплавну пластинку гніздо, за необхідності закріпивши її азбестовим шнуром.
3. Засипати поверхню платівки флюсом.
4. Встановити молоток індуктор.
5. Увімкнувши нагрівання, довести FeC-припій до розплавлення (швидкість нагрівання) встановлюється за таблицею 3.1) і забезпечити відповідну витримку, не допускаючи перегріву (понад 1200°C) елементів, що паяються.
6. Відключивши установку, забезпечити затвердіння металу шва (3...5с).
7. Провести охолодження молотка в середовищі, що забезпечує необхідну швидкість, якщо потрібно техпроцесом, відповідну технологічну операцію відпустки. Швидкість охолодження варіювалася в межах 0,1...200°C/с, навіщо охолодження вироблялося печі, повітря, графітової крупці, піску, маслі, воді.

3.2. Методика виробничих випробувань зміцнених молотків.

Виробничі випробування проводилися порівняльним методом, На що випробуванню піддавалися серійні молотки (сталь 65Г із гартуванням кромки СВЧ) і молотки зміцнені за розроблюваною технологією. Усі молотки попередньо піддавалися візуальному та ваговому контролю (відхилення за масою не більше 5...8г). Вибірково 5...10% від партії зазнавало металографічного контролю. Усі досліджувані молотки маркувалися набиванням цифр у зоні найменшого зношування (зона між підвісними отворами). Молотки випробовувалися при дробленні зернових матеріалів (пшениця, жито, ячмінь, кукурудза) з вологістю трохи більше 13% і вмістом домішок мінерального походження трохи більше 3...5% на зернодробилки КДУ-2 (рис. 3.2).

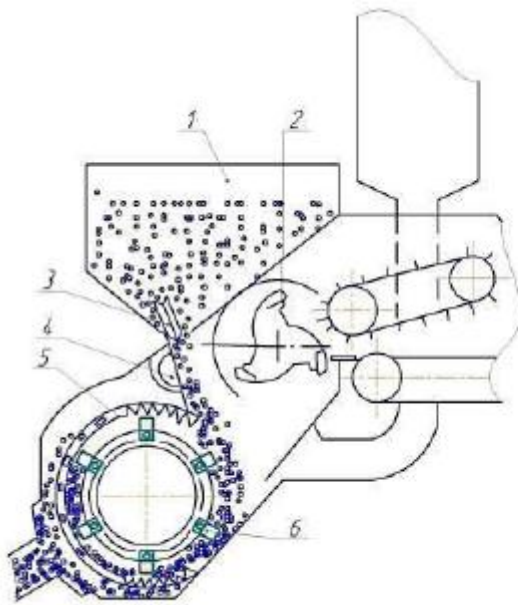


Рис. 3.2. – Експериментальна зернодробилка КДУ-2: 1 – приймальний бункер; 2 – ножовий барабан; 3- заслінка; 4-магнітний сепаратор; 5 – решето; 6 – зміцнені молотки.

Результати виробничих випробувань оброблялися методом математичної статистики [4, 9] та теорії надійності. При випробуваннях оцінювалися: - ресурс – сумарна стійкість робочого органу; - зносостійкість – зміна профілів молотка; - енергоємність – питома енергоємність процесу дроблення; - продуктивність; - Якість одержуваного продукту. Як відносний показник експлуатаційного ресурсу молотків у нормованих умовах обробки прийнятий коефіцієнт експлуатаційної міцності (здатність працювати без поломок) [19]:

$$K_{30} = 1 - \frac{N_1}{N} - \frac{\sum_{i=1}^{N_2} (t - m)}{N(n - m)} \quad (3.1)$$

де N - Число виготовлених молотків, шт.;

N1 – кількість шлюбу під час виготовлення, прим;

N2 - кількість виведеного з ладу через поломку, шт;

n - лімітуючий розмір платівки до поломки, мм;

m – залишкова величина лімітуючого розміру платівки при амортизації, мм;

t - залишкова величина лімітуючого розміру платівки при поломці, мм.

Якість виготовлених молотків оцінювали за відповідністю точності розмірів, шорсткості, допустимих відхилень форми та взаємного розташування поверхонь технічним вимогам, а також зміною мікротвердисть обробленої поверхні.

3.3. Результати металографічних досліджень паяної сполуки.

Для проведення металографічних досліджень мікроструктури паяного з'єднання експериментальних молотків (рис. 3.3) виготовлялися поперечні та поздовжні мікрошліфи (рис. 3.4) паяних пробних зразків та реальних зміцнених молотків.

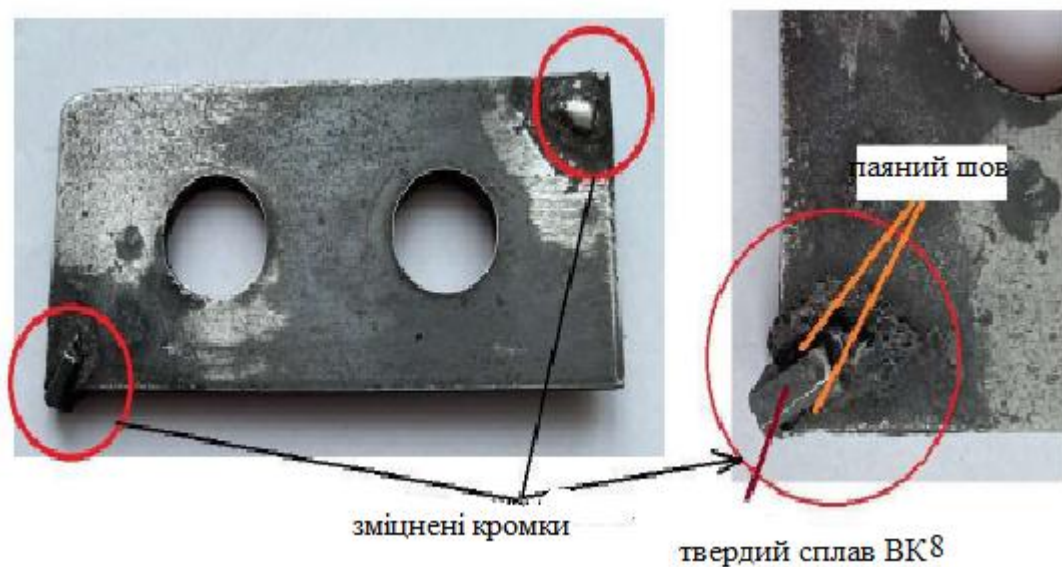


Рис. 3.3 – Зразок молотка зі зміцненою робочою кромкою.



Рис. 3.4 – Мікрошліф зміцненої кромки молотка.

Дослідження показали, що запропоновані рішення є принципово змінюють характер зносу та суттєво підвищують ресурс молотків. При зміцненні робочої кромки твердим сплавом (рисунок 3.5 а),

ефект досягається тим, що твердосплавна пластинка встановлена в зоні максимальної швидкості і тиску, її кутове розташування забезпечує мале (2...3 мм) переріз потиличної фаски і захист твердосплавної пластинки від руйнування при ймовірних ударах сторонніх предметів. FeC-припій, що застосовується при цьому, забезпечує високоміцне дифузійне (рис. 3.5), з'єднання твердого сплаву з молотком, зміцнює робочі грані молотка за рахунок формування на поверхні шару 0,2... 0,5мм вибіленого чавуну та високовуглецевої дифузійної зони глибиною до 0,5мм на межі взаємодії молотка та FeC-припою твердістю HRC48. 56.

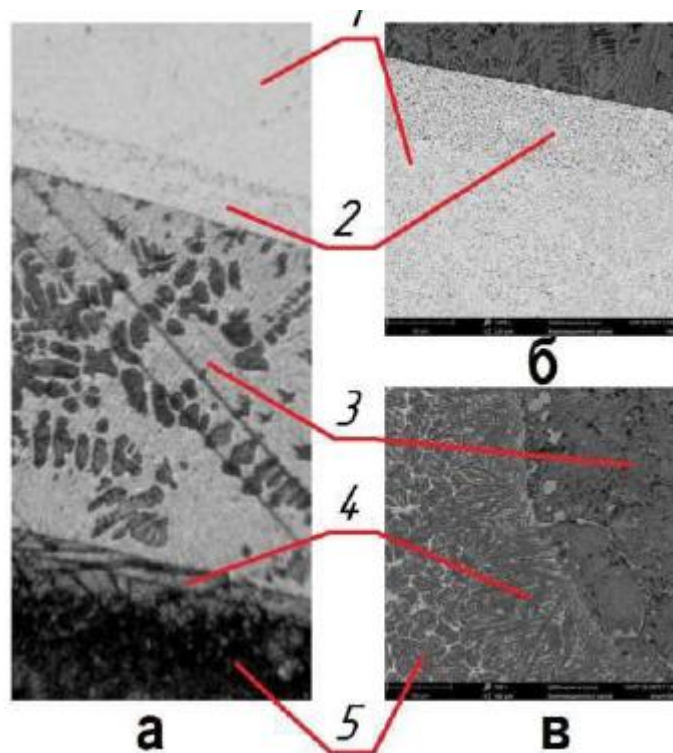


Рис. 3.5 – Мікроструктура зміцнених зон молотків: а – паяне з'єднання "ВК8 - FeC-припій - сталь Ст3", $\times 100$ (мікроскоп BM-1); б - дифузійна зона "ВК8 - FeC-припій", $\times 1200$ (мікроскоп PhenomXL); в – дифузійна зона "FeC-припій - сталь Ст3", $\times 580$ (мікроскоп PhenomXL); 1 -твердий сплав ВК8; 2 – дифузійна зона «ВК8 – FeC-припій»; 3 – FeC-припій; 4 - дифузійна зона "FeC-припій - сталь Ст3"; 5 – сталь Ст3.

Зміцнення молотків ґрунтується також на дифузійному науглерожуванні основи молотка при пайці із застосуванням FeC-припою В результаті формується орієнтована високотверда (HRC56 ... 61) в'язка мікроструктура. Проведені дослідження показали, що використовуваний при пайці FeC-припій, дозволяє отримати паяне з'єднання твердого сплаву з матеріалом молотка досить високої міцності, за рахунок формування дифузійних зон (рис. 3.6), це відбувається внаслідок того, що в сталь дифундує вуглець з FeC-припою формуючи підвищену міцність в даному з'єднанні, а в твердий сплав дифундує кордон (формується графітно-перлітно-цементна структура, де графіт – компенсує напруги, гасить високочастотні вібрації, перліт – дає міцність та в'язкість, цементит – дає жорсткість).

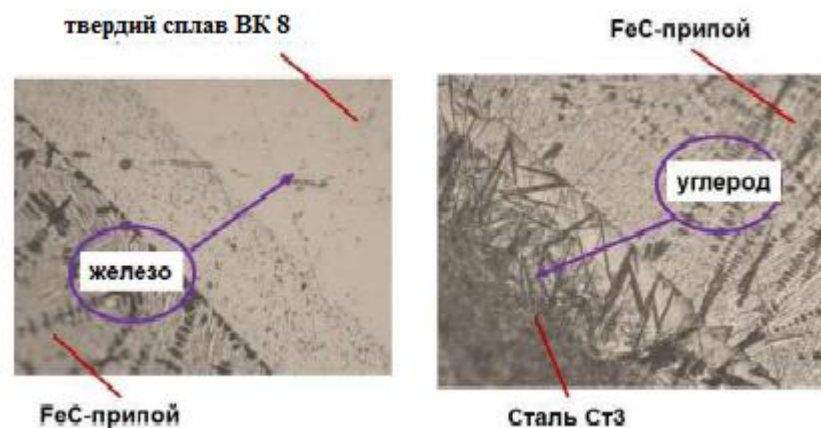


Рисунок 3.6 – Мікроструктура дифузійних зон зміцнених молотків: а – дифузійна зона «ВК8 – FeC-припій» ($\times 1200$); б - дифузійна зона "FeC-припій - сталь Ст3", ($\times 580$).

Металографічний аналіз зразків дозволив встановити, що взаємодія «FeC-припій – твердий сплав ВК8» обумовлена дифузійною взаємодією (рис. 3.7, а), при цьому FeC-припій розчиняє зв'язку (переважно процес розвивається по мікронерівностям і дефектам поверхні твердого сплаву, змочує карбіди і частково їх розчиняє, в результаті в карбіди твердого сплаву і окремі карбіди, що знову утворилися. Будова дифузійних зон «FeC-припій – сталь», показана на малюнку 3.7, б показує, що спочатку дифузія протікає по межах зерен з утворенням рідкої фази в сталі і реактивним оплавленням мікронерівностей поверхні поверхні, що паяється, а потім набуває характеру об'ємної. На цьому етапі швидкість дифузії вуглецю в аустеніті значно перевищує швидкість підплавлення основного металу, про що свідчить прогресивне збільшення фронту дифузії першому етапі.

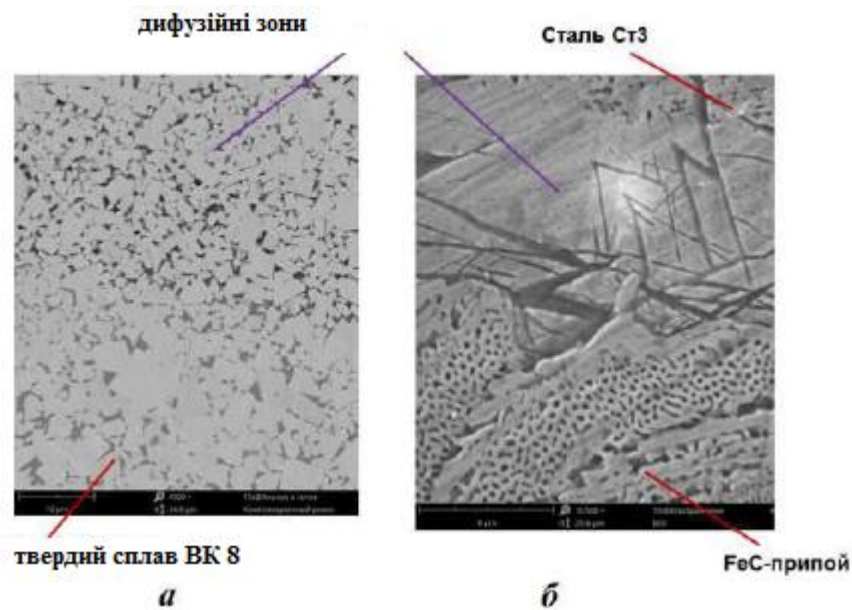


Рисунок 3.7 – Зона дифузійної взаємодії: а – твердий сплав ВК8 – FeC-припій; б – FeC-припій – сталь Ст3.

Взаємодія «FeC-припій – твердий сплав» обумовлена двома дифузійними процесами: об'ємна дифузійна взаємодія, при якому формується фронт дифузії, що призводить до збільшення об'ємного вмісту металевого зв'язування (рис. 3.7), що складається з ряду безперервних твердих розчинів металу зв'язки та заліза; поверхнева розчинно-дифузійна взаємодія (рис. 3.8), при цьому FeC-припій розчиняє зв'язку (переважно процес розвивається за мікронерівностями і дефектами поверхні твердого сплаву), змочує карбіди і частково їх розчиняє, в результаті в мікроструктурі граничної зони присутні частково-розчинні карбіди.



Рис. 3.8 – Мікроструктура зони дифузійної взаємодії з'єднання ВК8 – FeC-припій, $t_{\text{в}} = 5 \text{ с}$ ($\times 630$).

Аналіз мікроструктур дозволив встановити, що найінтенсивніше дифузійна зона розвивається з моменту змочування розплавом FeC-припою поверхні, що паяється, в початковий період взаємодії ($t_{\text{в}} = 5 \dots 10 \text{ с}$) (рисунок 4.6), потім у міру вирівнювання концентраційних градієнтів згасає і провідним стає розчинно-дифузійна взаємодія (рисунок 4).



Рис. 3.9 – Мікроструктура зони розчинно-дифузійної взаємодії твердого сплаву ВК8 та FeC-припою ($\times 1200$).

Прискорення розвитку дифузійного фронту може супроводжуватися наявністю дефектів (пор, мікротріщин) у приповерхневому шарі твердого сплаву. Приріст фронту дифузії після затвердіння шва при охолодженні повітря ($10 \dots 20^\circ \text{C/s}$) незначний (трохи більше $0,5 \dots 1 \%$). Будова дифузійних зон «FeC-припій – сталь» (рис. 3.10 а) показує, що спочатку дифузія протікає по межах зерен з утворенням рідкої фази в сталі і реактивним оплавленням мікронерівностей поверхні, що паяється, а потім приймає характер об'ємної. На цьому етапі швидкість дифузії вуглецю в аустеніті значно перевищує швидкість підплавлення основного металу, про що свідчить прогресивне збільшення фронту дифузії першому етапі. У міру взаємодії (більше 10 с) збіднений вуглецем, мікрооб'єм FeC-припою, що примикає, і

розчинений мікрошар сталі при даній температурі починає кристалізуватися за рахунок концентраційного переохолодження. Дифузійні зони «FeC-припій – сталь» складаються з дрібнопластинчастого перліту та тонкої цементитної сітки (рис. 3.10, б, в), тобто її мікроструктура відповідає заевтектоїдній сталі, що плавно переходить до будови основного металу. Мікротвердість зони, залежно від дисперсності структури, знаходиться в межах 2290...4130 МПа.

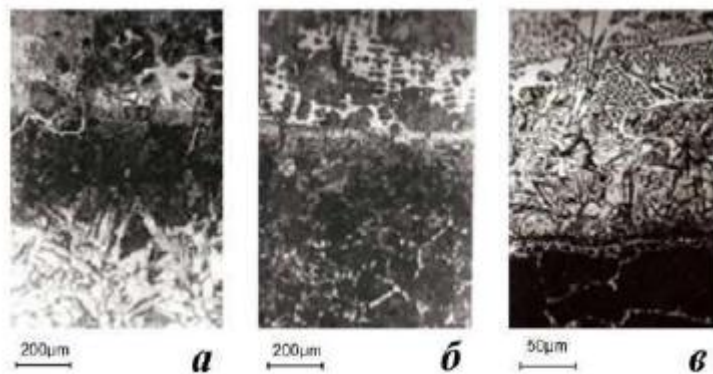


Рис. 3.10 – Мікроструктура зони дифузійної взаємодії FeC-припою та сталі: а – з'єднання FeC-припій – сталь Ст3 ($\times 100$); б – з'єднання FeC-припій – сталь Ст3 ($\times 100$); в – граничний шар FeC-припій – сталь Ст3($\times 100$).

Оскільки коефіцієнт дифузії вуглецю вищий за коефіцієнт дифузії інших елементів, що у взаємодії (Si, Cu, Cr, Ni, Co та інших.) то межі сплавлення утворюється граничний шар легованого аустеніту, при охолодженні що відчуває мартенситні перетворення. Це положення додатково сприятиме релаксації напруг у паяному з'єднанні «твердий сплав – FeC-припій – сталь». Крім того, маючи високу мікротвердість, гранична смужка спільно з дифузійною зоною підвищує жорсткість опорної поверхні пластини твердосплавної. Дослідження показали, що якість паяної сполуки гарантується графітно-перлітно-цементитною мікроструктурою матеріалу паяного шва, такий стан визначається як евтектичний (графіт + перліт + цементит) і формується в паяній сполукі за участю FeC-припою. За проведеними металографічними дослідженнями можна зробити висновок, що застосований склад FeC-припою та досліджені конструктивно-

технологічні параметри та режими паяння забезпечують теоретично обґрунтований структурний стан паяної сполуки «твердий сплав – FeC-припій – сталь».

3.4. Результати досліджень залежності структуроутворення від технологічних режимів.

Експериментальне дослідження структуроутворення проводилось стосовно розробленої схеми зміцнення робочих крайок молотків. Дослідження структуроутворення в з'єднаннях твердий сплав та сталь проводилося стосовно пропонованого складу FeC-припою, що дозволяє, як було встановлено результатами попередніх експериментів, формувати графітно-перлітно-цементитну мікроструктуру матеріалу паяного шва в поєднанні «твердий сплав – FeC-припій – сталь» в межах накладених технологічних обмежень. Конструктивно-технологічними параметрами та режимами, визначальними фізичні процеси структуроутворення паяної сполуки є:

- швидкість нагрівання, V_H , °C/c
- Температура паяння, t °C;
- час витримки за нормальної температури паяння, t_B , c;
- Товщина паяного шва, h_p , мм;
- швидкість охолодження, $V_{охл}$ °C/c.

Експериментальні дослідження впливу технологічних режимів на структуроутворення проводилися варіюванням факторів у межах накладених технологічних обмежень. На підставі розглянутих положень про вплив технологічних режимів формування якісного паяного з'єднання «твердий сплав – FeC-припой – сталь» визначався вплив швидкості нагріву під паяння на температуру початку плавлення FeC-припою, наявність ваткового графіту, структурний стан металу шва і стан паяного з'єднання в цілому, результати наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Результати дослідження стану паяної сполуки від швидкості нагрівання під пайку.

Швидкість нагріву, V_H , °C/c	Температура початку плавлення припою, t , °C	Наявність залишкового графіту про. %	Склад структури (охладження на повітрі)	Стан паяного з'єднання
5	1147	0...0.2	цементит + перліт	тріщини у твердому сплаві
15	1147	0.5...0.8	графіт + перліт + цементит	тріщини у твердому сплаві
30	1147...1153	0.7...0.9	графіт + перліт + цементит	немає тріщин у сплаві
60	1147...1174	0.6...1.0	графіт + перліт + цементит	немає тріщин у сплаві
100	1198...1216	0.3...1.4	графіт + перліт + цементит та перліт	структурна неоднорідність, тріщини у сплаві

З результатів мікроструктурних досліджень випливає, що зі збільшенням швидкості нагрівання зростає температура початку плавлення FeC- припою. Причому температуру плавлення FeC-припою в інтервалі швидкостей нагрівання 15...60 °C/c слід вважати прийнятним. За результатами експериментальних досліджень впливу швидкості нагріву на структуроутворення паяної сполуки «твердий сплав – FeC- припій – сталь» [18] слідує висновок, що, нагрівання під пайку молотка з FeC-припоєм зі швидкістю 30...60 °C/c забезпечує формування графітно-перлітно-цементитної мікроструктури паяного шва, що укладається в інтервал допустимих швидкостей нагріву твердосплавних пластинок. Температура паяння при височастотному нагріванні обумовлюється температурою плавлення вихідного FeC-припою (1147°C) та перегріванням, величина якого, як було розглянуто у таблиці 3.2, залежить від швидкості нагріву. При теоретичному обґрунтуванні активності застосування FeC-припоїв було встановлено, що температура паяння не повинна перевищувати 1200°C,

оскільки з урахуванням перегріву можливий перегрів твердого сплаву, що призводить до структурних змін та знижує їх ріжучі властивості. Дослідження показало, що найважливішим технологічним фактором, визначальним структурний стан паяного шва та властивості паяного з'єднання, є витримка - час взаємодії FeC-припою, що знаходиться в рідкій фазі, з паяними поверхнями твердого сплаву і сталі. Витримка визначає ступінь розвитку металургійних процесів у матеріалі FeC-припою, динаміку дифузійних процесів та подальшого структуроутворення паяної сполуки. В результаті паяння мікроструктура вихідного FeC-припою і об'ємів сталі, що сполучаються з ним, і твердого сплаву зазнає значних структурних змін.

3.5. Результати досліджень залежності властивостей паяної сполуки від структури шва.

Механічні властивості паяного з'єднання визначають експлуатаційний ресурс зміцнених молотків зернодробилок. Завданням експериментальних досліджень було визначення механічних властивостей (твердість і міцність) сполук твердий сплав – FeC-припій – основа молотка.

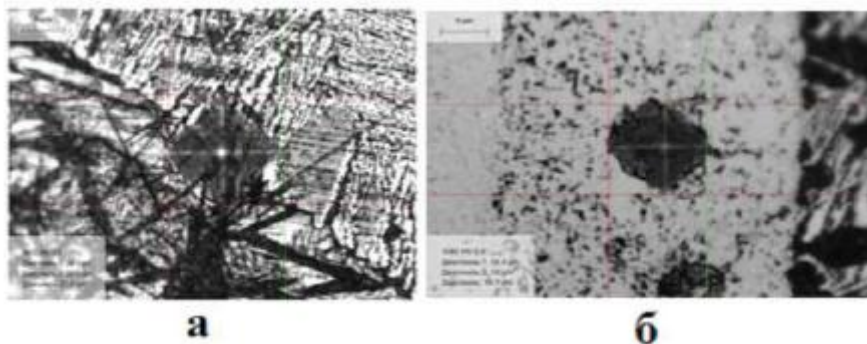


Рис. 3.11. – Схема вимірювання мікротвердоміром DuraScan дифузійних зон:
а – «FeC-припій – сталь Ст3»; б – «FeC-припій – твердий сплав ВК8».

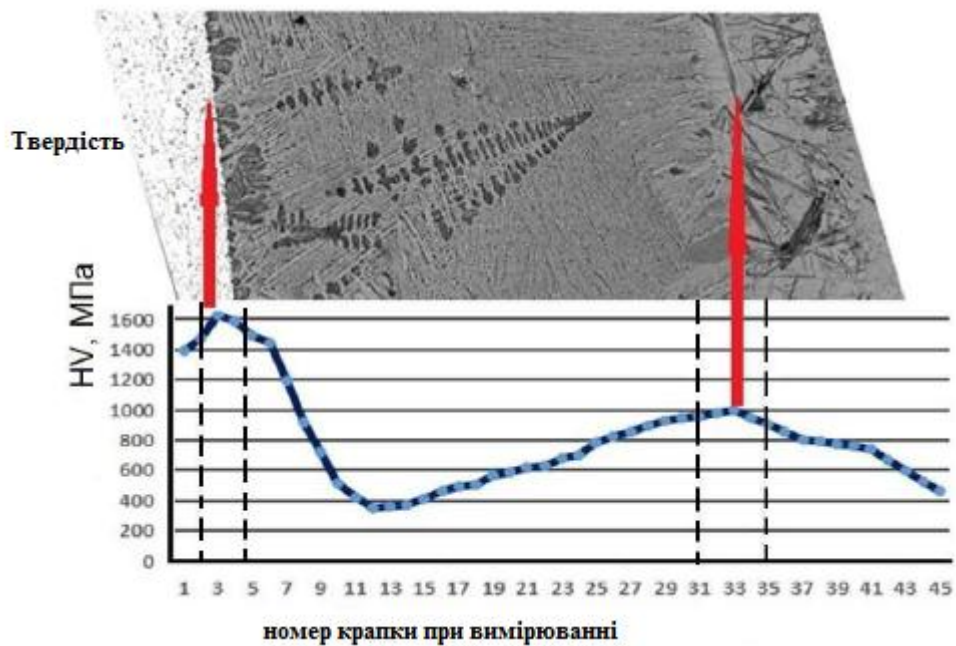


Рис. 3.12 – Мікроструктура та мікротвердість паяної сполуки «твердий сплав – FeC-припій – сталь».

У дифузійних зонах мікротвердість висока, понад HV1600 у зоні «твердий сплав – FeC-припій» та HV1000 у зоні «FeC-припій – сталь». У дифузійних зонах мікротвердість достатня висока твердість, а значить і з'єднання має підвищену міцність. Визначення залежності механічної міцності паяного з'єднання від величини дифузійної зони та товщини паяного з'єднання, передбачала випробування на зріз. Вплив структурно-фазового складу матеріалу паяного шва «BK8 – FeC-припій» та «FeC-припій – сталь Ст3» на механічні властивості сполуки досліджувався після проведення макро- та мікроструктурного аналізу зразків на вертикальних зрізах.

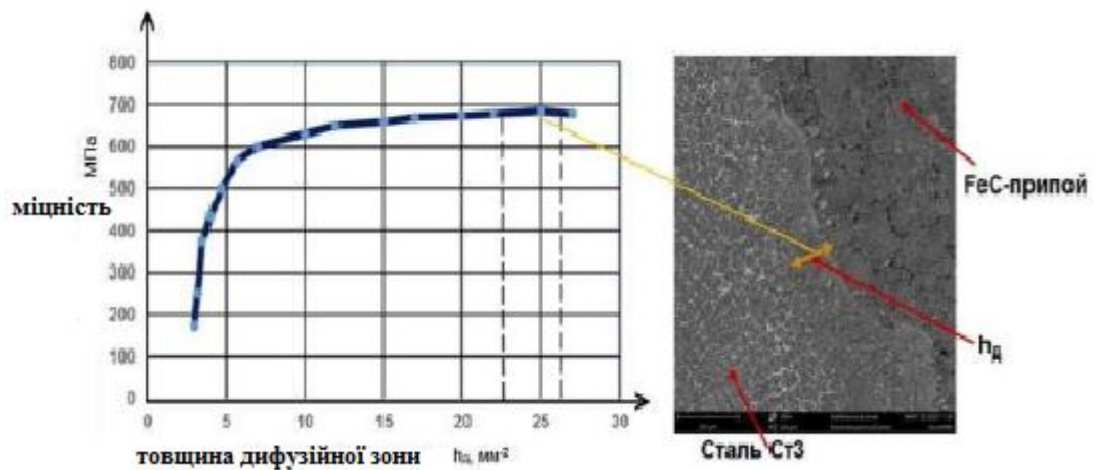


Рис. 3.13 – Залежність міцності з'єднання від величини дифузійної зони.

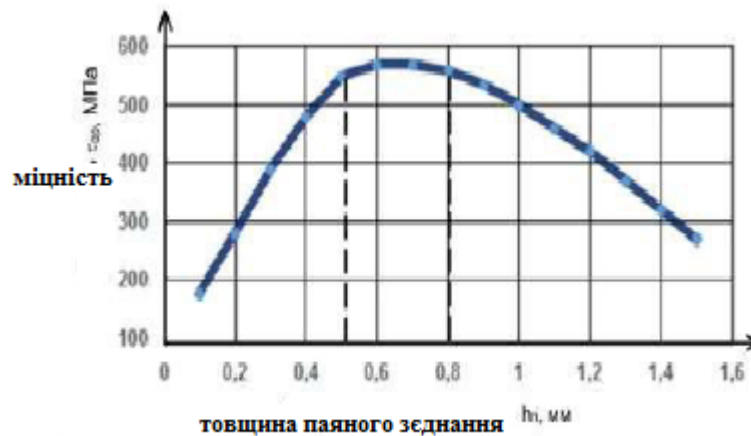


Рис. 3.14 – Залежність міцності з'єднання від товщини паяного шва.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили наявність дифузійних зон у паяному з'єднанні «твердий сплав – FeC-припій – сталь» з досить високою твердістю та міцністю, а також визначили оптимальну товщину дифузійної зони та товщину паяного шва для досягнення максимальної міцності.

3.6. Результати експериментально-виробничих випробувань.

Виробничі випробування досвідчених партій молотків у кількості 1000шт дозволили визначити величини зношування зміцнених молотків шляхом побудови профільних кривих (рис. 3.15). Результати проведених випробувань у таблиці 3.3.

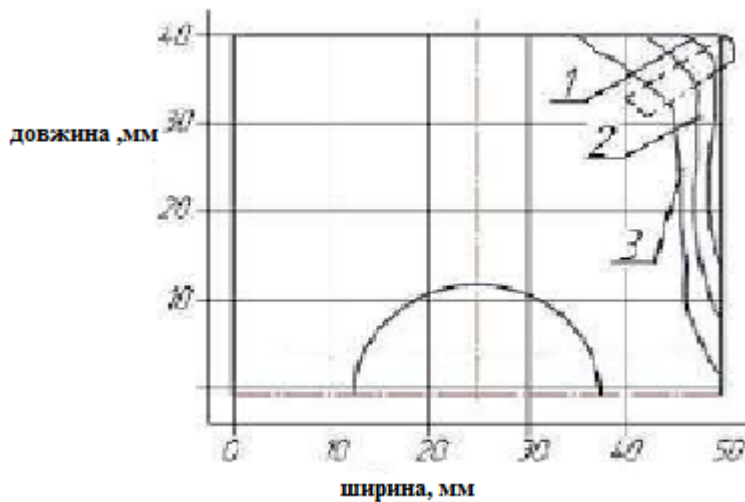


Рис. 3.15 – Профільні криві ударної частини молотка через кожні 300т напрацювання.

Таблиця 3.3 – Експериментальні значення величини зношування зміцненого та серійного молотка від напрацювання.

напрацювання молотка Q , т	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
знос молотка серійний S , мм ²	20	65	160	-	-	-	-	-	-	-
зміцнений	6	10	16	22	33	45	50	75	120	160

модель (2.28), на яку методом найменших квадратів знаходимо середні значення: $\overline{SQ}$, $\overline{S^2}$, $\overline{Q^2}$, $\overline{S^2Q}$, $\overline{SQ^2}$ [17] результати розрахунків представлений.

Таблиця 3.4 - Результати розрахунку середніх значень коефіцієнтів S_0 та Q_0

номер спостереження	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
сума	—	—	415500	51230	3850000	356010000	46406300
середнє значення	—	—	37773	350000	4657	32364545	4218755

Порівняємо емпіричні значення зносу молотка Семп з теоретичними Стеорами, дані наведемо в таблиці 4.4.

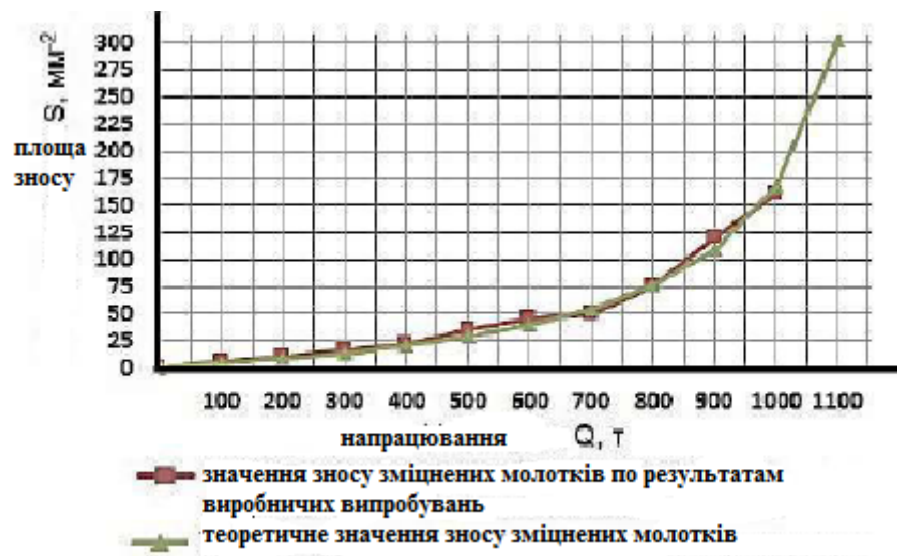


Рисунок 3.16 – Теоретичні значення та результати виробничих випробувань.

Таблиця 3.4 – Порівняння експериментальних та теоретичних значень залежності зносу молотка S від напрацювання Q

номер спостереження	Q_i	$S_{\text{змпі}}$	$S_{\text{теорі}}$	$S_{\text{змпі}} - S_{\text{теорі}}$	$\delta \%$	$(S_{\text{змпі}} - S_{\text{теорі}})^2$
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
сума	—	—	—	—	—	254,43
середня квадратична похибка	—	—	—	—	—	5,32

Таким чином, при комбінованому зміцненні робочої кромки молотка зернодробилки твердим сплавом ВК8 із застосуванням FeC-припою граничне значення напрацювання збільшується у 2,76 разів (з 456т до 1250т) (рисунк 3.16). За результатами виробничих випробувань досвідчених партій зміцнених молотків (1000шт) завтовшки 6мм – встановлено збільшення ресурсу комбінованим зміцненням молотків твердим сплавом ВК8 із застосуванням FeC-припою у 3...4 рази порівняно із серійними (сталь 65Г, загартування СВЧ). Напрацювання зміцнених молотків до досягнення ними граничного стану в середньому склало 1000т (рис. 3.17).

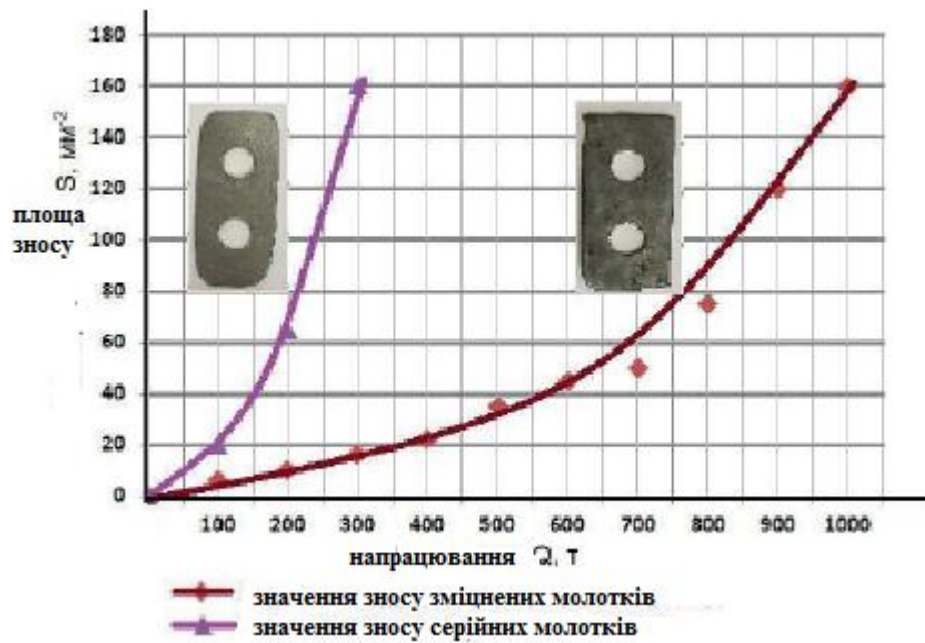


Рис. 3.17 - Залежність величини зносу від напрацювання молотка. Таким чином, результати виробничих випробувань доводять, що збільшення ресурсу молотків, зміцнених твердим сплавом та FeC-припоєм у 3... 4 рази порівняно із серійними.

ВИСНОВКИ

1. Граничним зношуванням робочої кромки серійного молотка зернодробилок є знос до головної осі симетрії, який настає після досягнення напрацювання близько 200 т. Граничне зношування молотків супроводжується округленням робочої кромки молотка по кривій близькій до параболи, що призводить до зростання енерговитрат в 1,5...2,2 рази і різкого зниження продуктивності зернодробилок більш ніж на 40%.
2. Встановлено закономірності зношування молотків зернодробилок, зміцнених твердим сплавом із застосуванням FeC-припою від напрацювання. Граничний знос настає при напрацюванні 1000т.
3. При зміцненні робочої кромки молотка, виготовленого зі сталі Ст3 з твердосплавною пластиною ВК8 з розмірами $3 \times 6 \times 8$ мм при використанні 0,50...0,55г FeC-припою проявляється ефект самозагострення. Максимальна міцність досягається при товщині дифузійної зони $h_d = 0,25$ мм та товщині паяного шва $h_p = 0,5 \dots 0,8$ мм.
4. Обґрунтовано раціональні конструктивно-технологічні параметри молотків зернодробилок із застосуванням твердосплавних пластинок ВК8 та FeC-припою, що забезпечують структурний стан паяної сполуки «твердий сплав – FeC-припій – сталь»: – швидкість нагрівання під пайку $V_n = 30 \dots 40^\circ\text{C}/\text{с}$; – температура паяння трохи більше $t = 1140 \dots 1190^\circ\text{C}$; – час витримки при температурі паяння (FeC-припою у рідкій фазі) $t_v = 5 \dots 7$ с; – охолодження на повітрі зі швидкістю $V_{охл} = 10 \dots 20^\circ\text{C}/\text{с}$ із наступним відпусткою при $t = 200 \dots 250^\circ\text{C}$ протягом 3 ... 6 год.
5. Випробування показали, що при заміні серійного молотка, виготовленого зі сталі 65Г, на молоток, з комбінованим зміцненням, не знижуються втомно-абразивна стійкість та ударна міцність, що призводить до збільшення ресурсу молотка в 3...4 рази порівняно із серійним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Калетнік Г. М., Черниш О. М. Теоретичне дослідження збурених гармонійних коливань у вібраційних приводах машин. *Всеукраїнський науково-технічний журнал Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. №2 (82). С. 5–9.
2. Полєвода Ю. А. Віброакустична діагностика лопатевих насосів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. №4 (80). С. 166–168.
3. Берник П. С., Стоцько З. А., Паламарчук І. П. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. Київ : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. 336 с.
4. З'єднання в машинобудуванні / В. С. Павленко, І. П. Паламарчук, О. В. Цуркан, Ю. А. Полєвода / За ред. В. С. Павленка. Вінниця: ПП «ТД»Едельвейс і К», 2015. 110 с.
5. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. Житомир: ЖІТІ, 2001. 612 с.
6. Гвоздєв О. В., Спірін А. В. Системний підхід у підвищенні ефективності використання технічних засобів комбікормового виробництва. *Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки*. №1(89) Т1. Вінниця, 2015. С.43–47.
7. Калетнік Г. М., Янович В. П. Обґрунтування режимних та конструктивних параметрів гіраційного млина для виробництва високоактивних преміксів. *Всеукраїнський науково-технічний журнал Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №1 (84). С.15–21.
8. Купчук І. М. Дослідження процесу подрібнення зерна дисковим ударним елементом. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 41–48.

9. Паламарчук І., Янович В., Купчук І. Експериментальна оцінка енергетичних параметрів віброторної дробарки крохмаловмістної сировини спиртової промисловості. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 3 (79). С. 133–136.
10. Янович В. П., Купчук І. М., Полєвода Ю. А. Розробка методики масштабного переходу «Фізична модель-натуральний зразок» при проектуванні віброторної дробарки спиртової промисловості. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету, серія технічні науки*. 2015. №1(89) Том 2. С. 164–167.
11. Котов Б. І., Спірін А. В., Солоня О. В., Калініченко Р. А. Стан і перспективи теплової і механічної переробки зернової сировини на корм. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №3 (95), С. 139–142.
12. Гулько І. В., Коваль Л. Г. Енергоощадні безконтактні методи діагностування показників технічного стану мобільної сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. №3 (95). Вінниця. 2016. С. 89–93.
13. Гулько І. В. Холодюк О. В., Кузьменко В. Ф. Обґрунтування параметрів пристрою для доподрібнення зерна при заготівлі кукурудзяного силосу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. 3 (102). С. 28–36.
14. Амеліч, А.В. Ремонт, відновлення та випробування інструменту та технологічного оснащення. - Київ: Техніка 1981. - 200 с.
15. Бойко, А.І. Дослідження довговічності зміцнених молотків кормодриблук. Дослідження та конструювання машин та обладнання для тваринництва: Збірник наук. праць Вип. - 12 / А.І. Бойко, Н.І. Денисенко, О.В. Сизиненко. - Київ, 1987.
- 16.. Виноградов, В. Н. Зношування при ударі/В.М. Виноградів, Г. М Сорокін, А. Ю. Албагачієв. - М.: Машинобудування, 1982. - 192с.

16. Гржимальський, Л. Л. Використання паяння для нанесення композитних покриттів/Л. Л. Гржимальський, Г.М. Капітонов, В.А. Коротков// Сучасні методи наплавлення та його застосування.: Зб. тр./ІЕС ім. О.О. Патона АН. - Київ, 1982. - С.114-118.
- 17.. Діагностика процесу металообробки/В. А. Остаф'єв, В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик. - Київ: Техніка, 1991. - 151 с.
18. Келоглу, Ю.П. Метали та сплави/ Довідник. – Кишинів: Молдовеняське, 1977. - 264 с.
19. Клименко, Н.І. Порівняльна зносостійкість дробильних молотків. Дослідження та конструювання машин та обладнання для тваринництва: Збірник наук. праць Вип. - 12 / А.І. Бойко, О.В. Тимановський, В.Ф. Журавель. - Київ, 1995.
20. Мельник, Б.А. Рентгенографічне дослідження процесу кристалізації чавунів/Б.А. Мельник, А.В. Чорнова // Структура і властивості чавуну: Про. наук. тр./АН . Ін-т проблем лиття. - Київ, 1999. - С.294-296.
21. Металографія зварних з'єднань чавуну/За ред. Грецька Ю.Я. - Київ: Наук. думка, 1997. - 192 с.
22. Неїжко, І.Г. Графітізація та властивості чавуну// АН УРСР. Ін-т пробл. лиття. - Київ: Наук.думка, 1999. - 208 с.
23. Писаренко, Г.С. Деформування та міцність матеріалів при складному напруженому стані / Г.С. Писаренко, О.О. Лебедєв. АН . Ін-т проблем міцності. – Київ. Наукова думка, 1996. - 415 с.
24. Довідник із практичного металознавства /В.Л. Пілюшенко, Б.Б. Винокур, С.Є. Кондратюк та ін. - Київ: Техніка, 1994. - 135 с.
25. Тененбаум, А.В. та ін. Підвищення зносостійкості та терміну служби машин. Київ. 1990, вип. №5.
26. Тененбаум, М.М., Бернштейн Д.Б. Питання теорії та абразивного зношування. - у КН.: Підвищення зносостійкості та терміну служби машин. Київ:УКР НІНТІ, 1990, Вип. 1, с. 181-183.

27. Ялпачик, Ф.Є. Експериментальні дослідження коливань моделі молотка кормодробарки / Ф.Є. Ялпачик, Г.С. Ялпачик, Г.А. Олексієнко // Актуальні питання досліджень технологічного обладнання тваринництва. Київ. 1991. - С. 9-17.
28. 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.
29. 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.
30. Tokarchuk O., Polievoda Y. Development of new ball safety couplings and justification of the basic technical parameters which ensure the reliability of the technical work. University Politehnica of Bucharest. *Scientific bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 82, Iss. 2. pp. 49–60.