**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**
**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ІМ. І.М.ФРАНЦЕВИЧА**

**ВОЛОЩЕНКО СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 621.746.58

# СТВОРЕННЯ НАУКОВИХ ЗАСАД СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ВИСОКОМІЦНОМУ ЧАВУНІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗМІННИХ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬГОСПТЕХНІКИ ТА ТРАНСПОРТУ

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2018

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, чл.-кор.НАН України
**Гогаєв Казбек Олександрович,**
Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАН України, м.Київ
зав.відділу диспергування матеріалів та пластичної деформації прокатуванням

**Офіціні опоненти:** доктор технічних наук, ст.н.сп.
**Бубликов Валентин Борисович**
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України
зав.відділом високоміцних та спеціальних чавунів

доктор технічних наук, доцент,
**Могилатенко Володимир Генадийович**
Київський державний технічний університет «Політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського МОН України, професор кафедри ливарного виробництва чорних та цвітних металів

доктор технічних наук, професор
**Санін Анатолій Федорович**
Дніпропетровський Національний державний університет ім. Олеся Гончара МОН України
зав. кафедрою технології виробництва

Захист відбудеться «_23__» квітня_ 2018 р. в _14 00 годині на засіданні спеціалізованної ради *Д* 26.207.03
в Інституті проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАН України за адресою 03142, м. Київ, вул. Кржижановського 3.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України за адресою 03142, м. Київ, вул. Кржижановського 3.

Автореферат розіслано «  » марта 2018р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої раді
Кандидат технічних наук О.В.Хоменко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Незважаючи на значні переваги, що обумовлені унікальними ливарними властивостями, вироби з чавуну протягом багатьох десятиріч програвали конкуренцію конструкціям зі сталей, оскільки значно поступались за комплексом механічних характеристик через підвищену крихкість, пов'язану з великою кількістю вуглецю в структурних складових. Проте, в другій половині XX століття ситуація суттєво змінилась завдяки створенню чавунних сплавів нового покоління. Цьому сприяли напрацювання в галузі розробки високоміцних чавунних сплавів з кулястою формою графіту (ВЧКГ), які демонструють високу міцність та задовільну пластичність. Великий внесок в розвиток цього наукового напрямку внесли українські вчені. Перш за все, це К.І. Ващенко та його учні, які працювали в КПІ та ІПЛ (ФТІМС) НАН України. Багато досліджень в цьому напрямку було виконано в Дніпропетровській металургійній академії під керівництвом Ю.М. Тарана – Жовніра. Подальший розвиток цієї проблематики пов'язаний з використанням спеціальних термічних обробок, так званий аустемперінг (*austempering),* які дозволяють отримувати в чавунах бейнітну структуру та використати її переваги при експлуатації виробів. Цей напрямок знайшов своє відображення в роботах М.В. Волощенка, В.Л. Найдека, І.Г. Неіжко, К.І. Узлова та ін. Створені сплави бейнітного чавуну з кулястим графітом (БЧКГ) успадкували всі переваги сучасних бейнітних сталей, і по комплексу властивостей виявились конкурентоспроможними по відношенню до сталевих виробів в багатьох галузях народного господарства, зокрема в конструкціях, що працюють на зношування.

Однак процес отримання таких матеріалів виявився більш складним, ніж у випадку звичайних чавунів. Технологія отримання необхідних службових характеристик потребує врахування багатьох чинників, здатних впливати на процес структуроутворення бейніту та залишкового аустеніту. Бейнітний чавун слід розглядати як складний матеріалознавчий об'єкт, кінцева структура та властивості якого залежать від технологічних умов на різних етапах виготовлення виробів. Це особливо важливо враховувати з огляду на те, що практичним наслідком роботи є створення технологічних умов для масового виробництва сільськогосподарської техніки. Ця проблема є **надзвичайно актуальною**. за сучасних умов розвитку сільського господарства в Україні. Прогресивні аграрні технології ставлять підвищені вимоги до сільськогосподарської техніки і, особливо, до її змінних деталей ( лемеші, лапи культиваторів, тощо). Ці елементи конструкцій несуть головне навантаження при обробці ґрунтів. Вони зношуються у великій кількості (декілька мільйонів за сезон) і потребують оперативної заміни безпосередньо в польових умовах. Певне протиріччя між масовим характером виробництва та штучним (індивідуальним) характером отримання окремих ливарних виробів може бути подолано завдяки жорсткій регламентації технологічних параметрів. Базою для визначення цих параметрів є ґрунтовні матеріалознавчі дослідження процесів структуроутворення на всіх етапах отримання виробу та встановлення

закономірностей впливу структури бейнітного чавуну на механічні властивості та механізм зношування в умовах максимально наближених до реальних. Перспективним є також використання високоміцного чавуну для виготовлення таких масових деталей для залізничного транспорту як гальмівні колодки, які працюють в умовах підвищеного зносу.

Таким чином, запропонована дисертаційна робота започатковує новий науковий напрямок: розробку матеріалознавчих принципів структуроутворення в високоміцних чавунах бейнітного класу для реалізації механізмів, що підвищують зносостійкість виробів сільськогосподарського призначення. Виконання роботи дозволяє вирішити важливу народно – господарську проблему – розробити науково-технологічні засади та запропонувати технічні рішення для масового виробництва змінних сільськогосподарських виробів з бейнітного чавуну.

**Мета роботи** – розробити наукові матеріалознавчі засади визначення умов забезпечення максимальних експлуатаційних властивостей та розробити технологічні принципи отримання робочих органів ґрунтообробної сільгосптехніки різних конструктивних варіантів з бейнітного чавуну та гальмівних колодок залізничного транспорту з чавуну з кулястим графітом за умов використання порошкових прокатних модифікаторів.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішити наступні **наукові та практичні задачі:**

1. Розробити науково-технологічні принципи виробництва бейнітного чавуну для його застосування при виготовленні деталей змінного обладнання ґрунтообробної сільгосптехніки.

2. Визначити склад чавуну та оптимізувати умови його отримання в литому стані та відпрацювати режими термічної обробки.

3. Визначити оптимальний склад модифікаторів та розробити технологію отримання модифікаторів шляхом прокатки порошків.

4. Встановити механізм впливу залишкового аустеніту на формування механічних властивостей та параметрів зношування бейнітних високоміцних чавунів .

5. Встановити режими ізотермічного гартування за яких утворюється найбільша кількість залишкового аустеніту, схильного до розпаду при пластичному деформуванні.

6. Провести модельні лабораторні випробування зразків з БВЧКГ, що імітують умови експлуатації навісного устаткування сільгосптехніки при роботі в різних ґрунтах і швидкостях обробки.

7. Виготовити і випробувати в польових умовах дослідно-промислові партії розроблених нових конструкцій литих деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. Порівняти експлуатаційні характеристиками зі сталевими виробами вітчизняного так і імпортного виробництва.

8. Розробити технологію виробництва гальмівних колодок для моторвагонів і локомотивів з високоміцного чавуну з мінімальними дефектами

від усадки і підвищеними гальмівними характеристиками. Провести стендові та експлуатаційні випробування.

**Об'єкт досліджень:** матеріалознавчі засади, які встановлюють механізми впливу структури високоміцного чавуну на механічні та триботехнічні властивості залежно від модифікуючої обробки, легування, режимів термообробки та умов експлуатації деталей.

**Предмет досліджень**: високоміцні чавуни, модифікатори і їх компоненти, режими термічної обробки.

**Методи досліджень**. При проведенні експериментальних досліджень були використані сучасні методи досліджень: металографічний та рентгенофазовий аналіз, електронна мікроскопія. Властивості сплавів вивчали в лабораторних умовах з використанням стандартних методів випробування механічних властивостей, а також спеціальних методик визначення зносостійкості, що моделюють умови експлуатації деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. Експлуатаційні і стендові випробування гальмівних колодок з високоміцного чавуну порівняно з серійними здійснювалися по методиках відповідних відомств залізничного транспорту України і Російській Федерації. Дослідні деталі виготовляли на підприємствах з врахуванням відповідних нормативно-технічних вимог.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: відповідно до програми «РЕСУРС» «Дослідження і розробка технології виробництва зносостійких литих деталей з використанням композиційних комплексних модифікаторів з порошкових матеріалів» (№ держреєстрації 0107U005143, 2007-2009 р.), «Розробка і впровадження технології виробництва литих деталей з підвищеним ресурсом експлуатації для лап культиваторів»(№ держреєстрації 0110U004394, 2010-2012р.), «Розробка та впровадження технології виробництва литих деталей навісного обладнання сільськогосподарської техніки в замін деталей зарубіжного виробництва» (№ держреєстрації 0110U004394, 2016-2018 р.), «Розробка технологічних основ формування багатокомпонентних систем з важкопресуємих порошків» № держреєстрації 0106U004142, 2007 – 2009 рр.). Автор був відповідальним виконавцем цих науково-дослідних робіт. Відповідні довідки наведені в Додатках до рукопису дисертації.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше сформульовано матеріалознавчі принципи підвищення зносостійкості деталей сільгосптехніки та транспорту з бейнітного чавуну шляхом отримання його структури з максимальним вмістом аустеніту. Вони полягають у реалізації особливого механізму зношування, згідно якого у поверхневому шарі під дією деформації відбувається перетворення залишкового аустеніту в мартенсит, що сприяє зростанню твердості та зменшенню схильності до тріщино утворення в високоміцному чавуні в зоні, яка контактує з робочим середовищем.

2. Вперше визначено оптимальне співвідношення пластичних та крихких складових порошкових модифікаторів для забезпечення необхідної міцності прокатних стрічок, що дало можливість понизити загальний вміст пластичних складових до 35 – 40 % мас. Та забезпечити нормальний процес модифікування при введенні модифікатора не більше 2,5 % по відношенню до маси рідкого металу.

3. Вперше розроблена оригінальна експериментальна методика оцінки триботехнічних характеристик зразків з БВЧКГ, що моделює умови експлуатації деталей ґрунтообробної сільгосптехніки в різних умовах обробки ґрунту.

4. Вперше встановлені температурно-часові показники аустенізації та режими ізотермічного гартування, які впливають на характеристики зношування бейнітного чавуну в умовах експлуатації ґрунтообробної сільгосптехніки.

5. Встановлені закономірності впливу складу та типу модифікаторів на особливості структуроутворення та схильність на формування усадкових дефектів при одержанні гальмівних колодок з високоміцного чавуну з високим вмістом фосфору у відкритих формах.

**Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено технологічний процес виготовлення змінних литих деталей ґрунтооброблювальної сільгосптехніки, що працюють в різних ґрунтах при різних навантаженнях обробки ґрунту замість сталевих вітчизняного і імпортного виробництва. Литі деталі, виготовлені за розробленою технологією, по ресурсу експлуатації перевищують ресурс деталей вітчизняного виробництва в 3 – 4 (лемеші), 5 – 6 раз (лапи культиваторів) і в 1,5 – 3 рази перевищують ресурс кращих зразків зарубіжного виготовлення при нижчій собівартості в 2 – 4 рази. Запропонована технологія використана при виробництві дослідно-промислових партій деталей на підприємствах Димерське ТОВ «Альянсервіс» (виливка деталей) і Малинське ТОВ « Амстед РЕЙЛ» (термообробка). Дослідно-промислові партії деталей були поставлені в ПП «Агроекологія», ПП ім. Довженко (холдингова компанія «Астарта). На підставі технологічного процесу розроблено універсальний спосіб отримання литих змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки будь-яких конструктивних варіантів (патент України № 99797)

2. Розроблено технологічний процес виготовлення порошкових модифікаторів універсальної дії методом прокатування, що забезпечує точність хімічного складу і стабільність набуття заданих властивостей ВЧШГ. Спосіб виготовлення модифікаторів запатентовано (патент України № 88530).

3. Розроблені нові конструкції литих деталей для ґрунтообробної сільгосптехніки як вітчизняного, так і імпортного виробництва, які пройшли випробування в ПП «Агроекологія» при обробці 10000 га. Литі самозагострувані лапи культиваторів нової конструкції забезпечують гарантоване підрізування кореневої системи бур'яну при мінімальному відвалі

ґрунту, що дає можливість виробляти сівозміну без вживання агрохімікатів і вирощувати екологічно чисту продукцію (патенти України № 97146 та № 99964)

4. Розроблено технологічний процес виробництва литих колодок із спеціального високоміцного чавуну для моторвагонів і локомотивів з ресурсом експлуатації, що в 2 рази перевищує ресурс колодок з сірого фосфористого чавуну при скороченні гальмівної дороги на 30 %. Технологія випробувана на Київському заводі «Кузня на Рибальському» («Ленінська Кузня») і Івано-Франківському локомотиво-ремонтному заводі. Відповідно до технології розроблені склади чавуну (Деклараційний патент України № 40045) і модифікатора (Деклараційний патент України № 40039)

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, авторові належить постановка завдання досліджень, теоретичне обґрунтування їх проведення, а також обробка отриманих результатів. У роботах, пов'язаних з гальмівними колодками, автор був відповідальним виконавцем і організатором проведення стендових і натурних випробувань. Він брав безпосередню участь в розробці нормативних документів, пов'язаних з виробництвом і експлуатацією гальмівних колодок з високоміцного чавуну. Здобувачем розроблені наукові основи технології виготовлення деталей ґрунтообробної техніки для сільського господарства. Автор вперше запропонував використовувати для цих деталей високоміцний бейнітний чавун. Здобувачем досліджені вплив залишкового аустеніту та його кількості, пов'язаного з умовами термічної обробки, на зносостійкість виробів, що працюють в умовах абразивного зносу в ґрунтах різних характеристик.

**Апробація роботи.** Основні положення і результат роботи були представлені та обговорені на шостій щорічній Промисловій конференції з міжнародною участю і бліц-виставки «Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах», 20 – 24 лютого 2006 р. на 4-ій міжнародній конференції «Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, вживання. Екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів, 18 – 22 вересня, Ялта 2006.; Міжнародній конференції «HighMatTech», 19 – 23 жовтня 2009 р.; XI Міжнародній науково конференції «Сучасні проблеми землеробної механіки» – до 110 річниці з дня народження акад. П.М. Василенко, Київ, 2010 р.; Міжнародній науковій практичній конференції «Сучасні проблеми землеробної механіки», Луганський нац. аграрний університет, березень 2011 р, Міжнародній науково-практичній конференції «Досягнення і перспективи розвитку сільськогосподарської науки» Великі Луки, 17 – 18 жовтня 2011 р.; конференції «Порошкова металургія: її сьогодні і завтра» 27 – 30 листопада 2012 р.; 5-ій міжнародній конференції «HighMatTech», 5 – 8 жовтня 2015 р.; науково-практичній конференції з міжнародною участю «Нові технологи в матеріалознавстві», Уфа, 14 грудня 2015 р.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано **38** наукових праць. З них **19** статей опубліковано у вітчизняних та зарубіжних фахових виданнях з яких **5** опубліковано у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних (SCOPUS та ін.), та 2 патенти на винахід.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 глав, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 189 найменуваннями і 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 11,6 авторських аркушів, у тому числі 79 рисунків та 44 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ВМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано вибір і актуальність проблеми, визначені мета, завдання, об'єкт, предмет і методика досліджень, наукова новизна і практична цінність роботи, представлений особистий вклад претендента, публікації і апробація.

**У першому розділі** проаналізовано сучасний стан проблеми в галузі структуроутворення та механічної поведінки високоміцного чавуна з кулястим графітом. Наголошується, що високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ) є одним із найважливіших конструкційних матеріалів, який характеризується поєднанням високих технологічних, фізико-механічних і експлуатаційних характеристик. Він широко застосовується замість сталевого литва, поковок, штамповок, ковкого і сірого чавуну, забезпечуючи надійність і довговічність виробів в різних умовах експлуатації. Відзначена роль чавунних виробів у вирішенні триботехнічних проблем. Особлива увага приділена сучасному стану виробництва модифікаторів. Проаналізовані переваги і недоліки існуючих модифікаторів для отримання високоміцних чавунів. Розглянуто вплив основних компонентів модифікаторів, їх кількісний і якісний склад на формування структури і властивостей металу в литому стані Проведено аналіз технологій виробництва модифікаторів, недоліки існуючих методів їх створення та пов’язані з цим особливості введення модифікуючих лігатур в рідкий метал. Визначені основні напрями в технологічному процесі виготовлення модифікаторів з порошкових матеріалів з використанням методів пластичної деформації.

Наведені основні склади модифікаторів. Зокрема, відзначається, що найбільш широко поширені комплексні композиційні модифікатори, що містять 4,5 – 8 % магнію, 4 – 7 % кальцію, 1 – 3 % РЗМ, 1 – 3 % барію, 5 – 17 % алюмінію, залишок – кремній і залізо. Наголошується, що наявність у складі модифікаторів крихких, твердих, і пластичних складових дозволяє отримувати порошкові модифікатори методами обробки тиском, варіюючи при цьому в широких межах склад порошкової суміші. Така технологія виготовлення модифікаторів дозволяє забезпечити точний склад лігатури і стабільність процесу модифікування і здобуття чавуну з кулястим графітом.

**У другому розділі** роботи розглянуті наукові основи розробки технології отримання модифікаторів методом прокатки. У вступній частині цієї глави зазначається, що на структуру, рівень фізико-механічних та експлуатаційних

характеристик високоміцного чавуну разом з хімічним складом, якістю вихідного розплаву і швидкістю твердіння металу впливають режими модифікування, склад, кількість, спосіб і черговість введення присадок. Проаналізовані деформаційні методи компактування модифікуючої суміші. Розглянуті особливості формування прокату і брикетів з складних порошкових систем, компоненти яких мають різні характеристики пластичності. Проаналізовані основні закономірності формування пресовок. Розглянуто вплив дисперсності, тиску, насипної щільності і інших параметрів порошкових систем. Наголошується безумовна перспективність технології виготовлення модифікаторів шляхом прокатки порошкових композицій в смуги. В цьому випадку забезпечується рівномірний розподіл елементів і більш раціонально використовується порошок всього фракційного складу. До того ж, на відміну від пресування, процес прокатки носить безперервний характер і дозволяє завдяки високій продуктивності отримувати модифікатори в промислових масштабах.

Експериментальна частина глави присвячена відпрацюванню технології отримання прокатаних модифікаторів. Для дослідження вибрані 7 найбільш визнані і поширені композиції в теорії литва модифікаторів. Склад компонентів модифікаторів і сумарна кількість пластичної складової (СКПС) представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Склад порошкових сумішей КМК, мас.%

| № | Fe | Al | Mg | SiBa | SiCa | FeSi | Рефтакон* | РЗМ | СКПС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 8 | 6 | 12 | 31 | 9 | 10 | 6 | 32 |
| 2 | 18 | 17 | 8 | 9,5 | 32 | 0 | 12,0 | 8,5 | 43 |
| 3 | 12 | 15 | 13,5 | 9 | 30 | 0 | 12 | 8,5 | 40,5 |
| 4 | 47 | 8 | 7 | 7,5 | 17,5 | 0 | 10 | 3 | 62 |
| 5 | 8,5 | 12,5 | 6 | 11 | 35 | 9 | 15 | 8,5 | 27 |
| 6 | 25,5 | 8 | 6,5 | 9,5 | 25 | 11 | 8 | 0 | 40 |
| 7 | 34 | 13 | 7 | 7,5 | 8 | 13 | 7 | 10,5 | 54 |

* флюс примірного складу, мас. % : 10 – 11 – $La_2O_2$, 40-43 – CaO, 4 – Cr, 3 – $SiO_2$, 2 – $TiO_2$ 2,5 – $P_2O_5$, 37 – 38 F

У вибрані порошкові композиції модифікаторів входять як пластичні складові (Mg, Al, Fe), так і крихкі (SiBa, SiCa, РЗМ, Рефтокон). Для кожної композиції визначені вагове і об'ємне співвідношення пластичних і непластичних компонентів модифікаторів. Порошки пластичних металів використовувались у стані поставки.

На рис. 1 наведені SEM зображення часток порошків пластичних металів (Al, Mg і Fe). Порошок алюмінію отримано від розробника, порошок магнію отримано із стружки, а порошок заліза - у стані поставки.

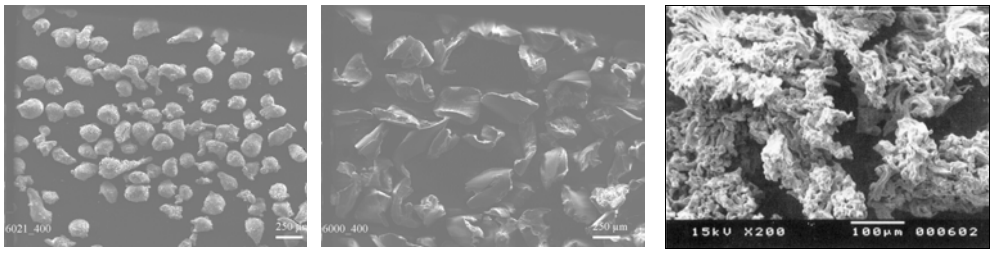


Рис. 1. SEM зображення часток пластичних порошків модифікатора:

а б в

а – алюміній марки ПА-2, б – магній; в– відновлене залізо ПЖ-2

Основні характеристики пластичних порошків представлені в таблиці 2.

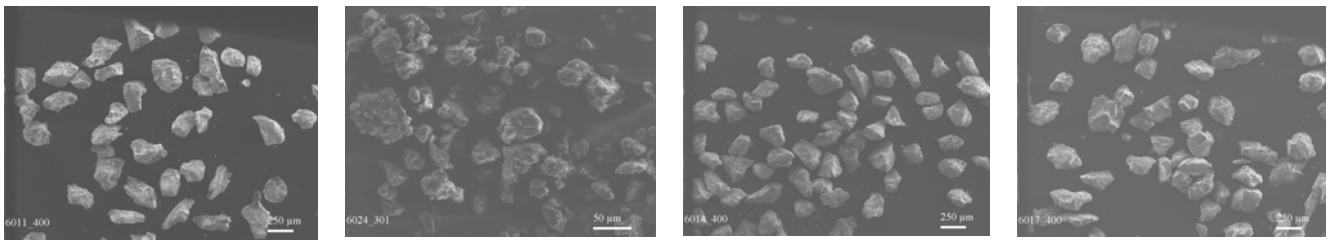
Таблиця 2

Основні характеристики пластичних порошків

| Матеріал | Марка | Метод отримання | Вміст $O_2$, мас. % | Щільність, г/см$^3$ | Насипна щільність, г/см$^3$ | ВНЩ * |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe | - | Відновлення | 0,31 | 7,870 | 2,054 | 0,261 |
| Al | ПА-2 | Розпил | 0,25 | 2,710 | 0,886 | 0,410 |
| Mg | – | Різання | 0,37 | 1,740 | 0,452 | 0,260 |

* Відносна насипна щільність

Крихкі порошки отримували помелом злитків. Помел проводили в щічній дробарці. Розміри часток коливались в широкому діапазоні, щоб процес подрібнення не займав багато часу. Максимальні розміри часток сягали 3 мм. Відсів дрібних фракцій не проводився з метою більш повного використовувати матеріалів. На рис. 2 наведені зображення часток порошків крихких складових. отримані на растрово-електронному мікроскопі.



а б в г

Рис. 2. SEM зображення часток крихких складових модифікатора: а – РЗМ; б – Рефтакон; в – SiCa; г – FeSi

Враховуючи. що розмір і форма порошків крихких фракцій подібні (рис.2), модельні експерименти з ущільнення гетерокомпонентних порошкових сумішей проводилися на простих і відносно дешевих порошкових композиціях Fe – FeSi і Al – FeSi, елементи яких входять до складу модифікаторів. В роботі наведені результати виміру фізичних і технологічних властивостей порошків і сумішей, що складаються з крихкого порошку FeSi змішаного з різною кількістю пластичного компонента (порошку заліза або алюмінію).

В таблиці 3 надані основні характеристики крихких порошків.

Таблиця 3

Основні характеристики крихких порошків

| Матеріал | Марка | Спосіб отрим. | Твердість | Щільність, г/см$^3$ | Насипна щільність, г/см$^3$ | ВНЩ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SiBa | СБ20 | Розмол | 37 HRC | 3,940 | 1,852 | 0,470 |
| SiCa | СК25 | Розмол | 60 HRC | 3,200 | 1,312 | 0,410 |
| FeSi | ФС75 | Розмол | 57 HRC | 3,500 | 1,400 | 0,400 |
| Рефтакон | - | Хімічн. | – | 3,220 | 1,449 | 0,450 |
| РЗМ | ФС30РЗМ | Розмол | 46 HRC | 3,920 | 2,234 | 0,570 |

При пресуванні та прокатуванні використовувались всі фракції крихких порошків для забезпечення безвідходної технології їх використання. Максимальний розмір часток був 2500 – 3000 мкм. Досліджено вплив умов деформації і співвідношення між крихкою і пластичною складовою на сиру міцність пресовок. У модельних експериментах, як основний метод ущільнення, використовували холодне пресування, що дозволило в широкому діапазоні варіювати умови деформації, і, як наслідок, структуру і властивості брикетів. Використовувався розроблений для пресовок циліндричної форми і широко впроваджений метод визначення сирої міцності за допомогою діаметрального стискання. За результатами експериментів побудовані залежності міцності пресовок від об'ємної долі крихкою складової FeSi для двох сумішей Fe – FeSi і Al – FeSi , при різному зусиллі пресування. При введенні пластичного порошку міцність зростає спочатку дуже повільно, помітне зростання міцності спостерігається при об'ємній кількості крихкої компоненти ~ 50%.

Порівняння абсолютних значень міцності двох досліджених систем вказує на те, що при великій об'ємній частці крихкої складової або при эквіоб’ємному співвідношенні крихкої і пластичної компонент при заданому зусиллі пресування міцність пресовок із залізом і алюмінієм виявляється співрозмірною.

Модельні експерименти підтвердили одне із основних положень теорії пресування і прокатки порошків про визначальну роль параметра насипної щільності (читай форми порошинок) для отримання якісних сирих заготовок. Насипна щільність має особливе значення для вибору оптимального складу модифікатора. У теорії металургійних процесів оперують не з об'ємними, а з масовими або атомними відсотками. Серед компонентів, що входять до складу КМК залізо є найважчим елементом. Його щільність більш, ніж в 2 рази перевершує щільність будь-якій з крихких складових і, отже, при однаковій кількості цих компонентів по масі займає в 2 рази менше об'єму. Проведені експерименти показали, що розгалужена форма залізного порошку компенсує більшу питому вагу і велику твердість залізного пластифікатора та забезпечує можливість в достатніх кількостях вводити залізо в КМК.

Модельні експерименти дозволили вибрати 4 з 7 (таблиця 1, № 1 – 4), найбільш прийнятних для наших експериментів склади модифікаторів. З цих модифікаторів були спресовані циліндричні заготовки і проведені дослідження сирої міцності методом діаметрального стискування. Результати експериментів представлені в таблиці 4.

Результати досліджень показали, що для отримання достатньо міцних (не менш 3 МПа) пресовок без органічної зв’язки необхідна кількість пластичного компонента (в основному залізний порошок) повинна складати не менше 40 – 45 мас. %. У завершальному розділі другої глави розглянуті питання отримання прокатних смуг з порошків модифікаторів. Вибір модифікаторів і умов прокатки проводився відповідно до уявлень теорії прокатки порошків, згідно яким технологічні умови деформації і, як наслідок, якість смуги залежать від текучості і фрикційних характеристик порошку. Одним з основних чинників, що визначають деформаційну здатність порошків (кінцеву товщину і пористість смуги) є насипна щільність вихідних компонентів. В зв'язку з цим, результати, представлені в табл. 1, були використані для оптимізації режимів прокатки і вибору оптимальних складів модифікаторів. У багатокомпонентних системах найважливішими параметрами, що впливають на властивості порошкових смуг, є відносна кількість пластичного порошку і насипна щільність їх пластичних та крихких складових. Для визначення сирої міцності смуг було вибрані модифікатори з різним вмістом пластичної складової. Оскільки склади № 2 і № 3 (табл.1) мають близьку долю пластичної складової (відповідно 0,43 і 0,405) перевага віддана складу № 3, який має менше значення цієї характеристики.

Результати експериментів показали, що, як і при отриманні пресовок, для досягнення міцності смуги не менш 3 МПа, кількість пластичного компонента повинна складати не менше 40 мас. %, при цьому відкоректовано склад модифікатора (за основу узяті склади № 2 і № 3). Остаточний склад композиту КМК-1, вибраного для подальшої роботи: (мас.%)7,5 Mg, 30 СК25, 17 Al, 9 SiBa (20 % Ba), 17,5 Fe, 10 модифікатор-флюс «Рефтакон» і 9 РЗМ (ФС30РЗМ30) при 42 пластичній складовій. Порошки комплексного модифікатора прокатували на стані НИМ-3 з валками діаметром 500мм. Швидкість прокатки складала 1,5 м/хв. Характеристики смуг з КМК -1, наведені в таблиці 5.

Дослідження показали, що такої зміни технології прокатки виявилось достатньо, для істотного покращення властивостей прокату. Використання валків великого діаметру дозволило значно збільшити величину ущільнення Z в інтервалі 2,05 – 2,38, як наслідок, в декілька разів збільшити сиру міцність. Загальний вигляд прокатаних смуг комплексного модифікатора приведено на рис. 4.

Використання валків великого діаметру дозволяє збільшити товщину смуги, тим самим підвищити інтегральна міцність виробу. Пропорційно вазі смуги зростає продуктивність технологічного процесу. При отриманні товстих смуг стає можливим використовувати компоненти модифікатора розміром до 3 мм і тим самим зменшувати енерговитрати на подрібнення КМК. Щільність і

міцність неспечених смуг суттєво вище необхідної межі мінімальної технологічної міцності формовок 3 МПа. КМК, отримані даним методом, можуть транспортуватися і зберігатися у відповідній упаковці.

Таблиця 4

Результати визначення міцності на діаметральне стискання пресовок з суміші порошків різних складів

| № п/п | № складу | Тиск, МПа | Маса, г | Діаметр, мм | Висота, мм | Відносна щільність | σ, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 200 | 3,50 | 11,35 | 12,82 | 0,774 | 0,538 |
| 2 | 1 | 400 | 3,48 | 11,37 | 11,87 | 0,828 | 1,350 |
| 3 | 1 | 600 | 3,48 | 11,38 | 11,46 | 0,856 | 1,538 |
| 4 | 1 | 800 | 3,50 | 11,4 | 11,39 | 0,863 | 2,399 |
| 5 | 2 | 200 | 3,33 | 11,35 | 12,2 | 0,791 | 1,196 |
| 6 | 2 | 400 | 3,33 | 11,37 | 11,32 | 0,850 | 2,499 |
| 7 | 2 | 600 | 3,24 | 11,38 | 10,68 | 0,875 | 3,233 |
| 8 | 2 | 800 | 3,33 | 11,38 | 10,18 | 0,943 | 4,497 |
| 9 | 3 | 200 | 3,09 | 11,35 | 11,7 | 0,839 | 1,458 |
| 10 | 3 | 400 | 3,07 | 11,37 | 11,11 | 0,875 | 2,607 |
| 15 | 3 | 600 | 3,10 | 11,38 | 11,16 | 0,878 | 4,850 |
| 12 | 3 | 800 | 3,07 | 11,38 | 10,94 | 0,887 | 5,986 |
| 13 | 4 | 200 | 4,03 | 11,34 | 12,8 | 0,754 | 2,045 |
| 14 | 4 | 400 | 4,02 | 11,36 | 11,65 | 0,824 | 4,413 |
| 15 | 4 | 600 | 4,03 | 11,36 | 11,14 | 0,864 | 6,528 |
| 16 | 4 | 800 | 4,05 | 11,39 | 10,96 | 0,878 | 8,021 |

Таблиця 5

Характеристика смуг з КМК, отриманих на стані з валками діаметром 500 мм

| Товщина, мм | Щільність г/ $см^3$ | Z | Міцність на зріз, МПа |
|---|---|---|---|
| 4,46 | 2,01 | 2,05 | 4,55 |
| 3,38 | 2,19 | 2,23 | 8,2 |
| 3,18 | 2,29 | 2,34 | 15,35 |
| 2,88 | 2,33 | 2,38 | 15,23 |

Таким чином отримані смуги модифікатора КМК1, що мали розмір ~ 200х50х4, повністю задовольнили вимогам як за характеристиками хімічного складу, так і за параметрами міцності. Ці смуги були використані в технологічному процесі виготовлення виробів з високоміцного чавуну.

Рис. 4. Комплексні модифікатори у вигляді прокату (валки 500 мм)

**Третій розділ** присвячений відпрацюванню оптимальних умов отримання бейнітного чавуну для швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. Вибір хімічного складу визначався, з одного боку, впливом легуючих елементів на структуроутворення в бейнітному чавуні з кулястим графітом, з іншого, умовами роботи: формою та розміром деталей, умовами їх навантаження, впливом зовнішнього середовища, тощо. Наведено перелік номенклатури виробів з бейнітного чавуну, що застосовуються в машинобудуванні, залізничному транспорті та інших галузях, особливо тих, що працюють в умовах інтенсивного зношування. Зазначається, що стосовно виробництва лемешів та лап культиваторів з бейнітного чавуну інформація відсутня. При визначенні складу легуючих елементів були враховані габарити виробів з огляду схильності чавуну до прогартування при ізотермічному гартуванні. Для покращення прогартування були використані Ni, Mo и Cu. Враховуючи відносно малу товщину виробів (не більше 15 мм), обмежились невеликим вмістом цих елементів: Mo 0,2 – 0,4 %, Cu до 0,5 %, Ni до 0,5 %.(мас.%) Кількість кремнію визначалась, враховуючи те, що цей елемент одночасно є графітизуючим та покращує якість металу. Найкращий баланс між міцністю та пластичністю досягається при 3,2 – 4,18 % Si. В нашому випадку кількість кремнію коливалась в межах 2,7 – 3,2 % щоб забезпечити в литому стані перлито-феритну структуру металевої матриці, оскільки структура чавуну в великій мірі визначається співвідношенням вуглецю та кремнію. При відносно низькому вмісті вуглецю (< 3,2 %) можливе незначне відбілювання навіть при 2,7 % Si. Крім того, погіршуються ливарні властивості. При високому вмісті (> 3,6) знижуються параметри міцності через велику кількість графіту. Тому оптимальний вміст вуглецю визначається в 3,2 – 3,5%.

З урахуванням легуючих елементів, що вносяться при модифікуванні, остаточний склад чавуну: 3,2 – 3,5 % C, 2,7 – 3,2 % Si, 0,2 – 0,3 % Mn, 0,01 – 0,02 % Cr, 0,2 – 0,4 % Mo, 0,3 – 0,5 % Cu, 0,4 – 0,5 % Ni, 0,02 % P, S < 0,02%, залишок залізо (мас.%).

З метою відпрацювання технології масового виробництва литих лемешів були виплавлені дослідні зразки, на яких проводилось доопрацювання складу чавуну та модифікатора і оптимізація режимів термообробки. Крім розробленого модифікатора КМК1 використовувались найбільш поширені промислові модифікатори. Структура та властивості високоміцного чавуну в литому стані після модифікування різними модифікаторами представлені в таблиці 6.

Необхідний комплекс механічних властивостей досягається використанням низки технологічних умов, пов’язаних з режимами плавки та

методами модифікування – температури рідкої ванни; швидкості охолодження; матеріалу ливарної форми; використання флюсів; складу модифікатора та методу його введення. Плавка проводилась в індукційній печі ЛПЗ 63 з основною футеровкою тигля ємністю – 50 кг рідкого металу. В шихті використано переробний чавун, сталевий лом та відповідні феросплави. Клиноподібні проби відливали в сухі пісчані форми.

Таблиця 6

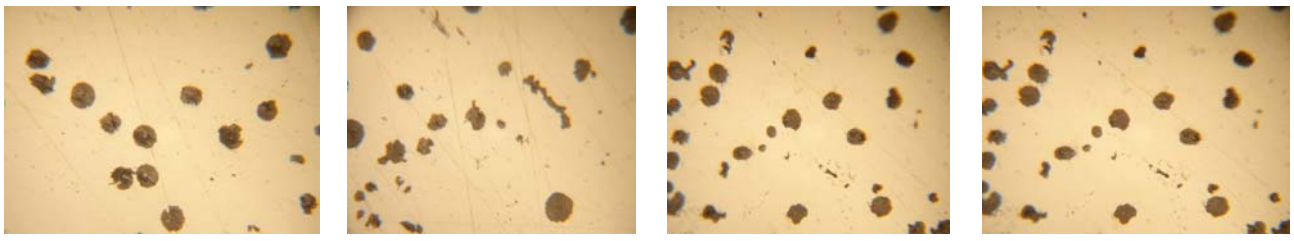
Структура та механічні властивості ВЧКГ в литому стані, модифікованого різними модифікаторами

| Модифікатори | Структура чавуну | | Механічні властивості | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *ССГ,% | Ферит % | $\sigma_в$ МПа | δ, % | НВ | КС Дж/см$^2$ |
| КМК1 | 90-93 | 45-55 | 641 | 4.4 | 210 | 75 |
| ЖКМК4Р | 85-88 | 30-40 | 620 | 3,6 | 217 | 79 |
| Ni-Mg-Ce | 87-90 | 20-25 | 635 | 3,4 | 220 | 71 |
| Cu-Mg | 82-85 | 45-55 | 561 | 2,7 | 270 | 53 |
| ФСМг-7 | 82-55 | 45-55 | 534 | 3,1 | 205 | 65 |

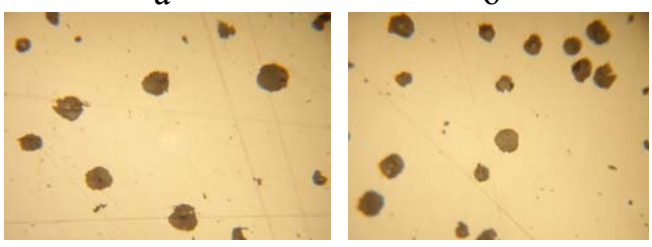
*ССГ – ступінь сфероідизації графіту

Найкраще співвідношення міцності, пластичності та ударної в'язкості модифікованого ВЧКГ (високоміцний чавун з кулястим графітом) продемонстрували відливки, що модифіковані КМК1. Найближчим по якості отриманого чавуну слід вважати промисловий модифікатор ЖКМК4Р. Але у випадку використання цього модифікатора необхідно додатково використовувати повторне графітизуюче модифікування, особливо у випадку виготовлення тонкостінних відливок. В подальшому дослідження проводились при використанні в основному прокатних модифікаторів типу КМК1.

Структурні дослідження (рис. 5) показали, що найкраща форма графіту у



а б в г



д е

Рис. 5. Форма графіту в високоміцному чавуні, модифікованому: а – ЖКМК4Р в кількості 2,5 %; б – ФСМг7 в кількості 2,5 %; в – Ni-Mg-Ce-лігатура в кількості 1,1 %; г – Cu-Mg-лігатура в кількості 1,1 %; д, е –модифікатор КМК1 в кількості 2,5 % (мас.%)

вибраному складі чавуну досягається при використанні прокатного модифікатора КМК1. Дещо гірші результати спостерігаються при модифікуванні модифікатором ЖКМК4Р. В структурі чавуну при використанні модифікатора КМК1 практично відсутній відбіл в тонкостінних відливках. Співвідношення структурних складових– фериту і перліту в структурі литого чавуну залежить від швидкості кристалізації та, в великій мірі, від кількості та співвідношенню кремнію та вуглецю.

Для визначення оптимальної температури аустенізації було досліджено мікроструктуру зразків чавуну, модифікованого КМК1, після гартування в олію від температури 860, 880 и 920 °С та витримки 20 и 40 хвилин. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.

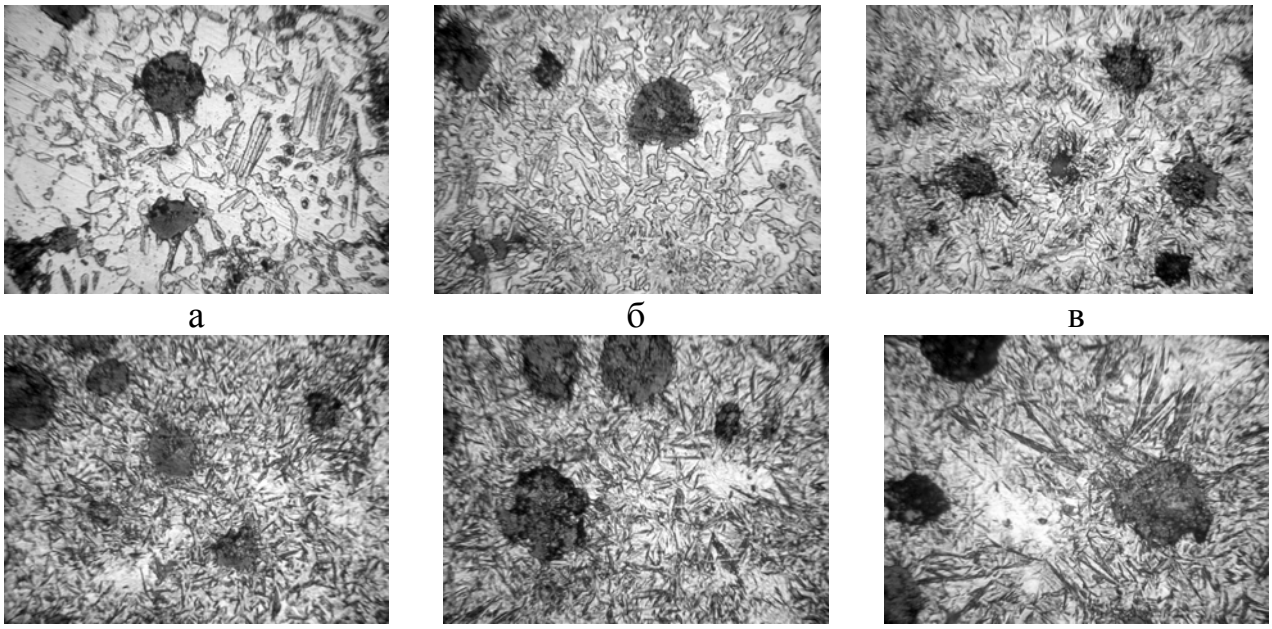



Рис. 6. Мікроструктура ВЧКГ після гартування в маслі з температури аустенізації: 860 °С витримка 20 хв. (а), витримка 40 хв. (б), 880 °С витримка 20 хв. (в), витримка 40 хв. (г), 920 °С витримка 20 хв. (д), витримка 40 хв. (е) (х500)

Встановлено, що при температурі аустенізації 860 °С та витримці 40 хв. в структурі залишається біля 10 % фериту ($Ф_{10}$), При температурі аустенізації 880 °С кількість фериту зменшується до 8 % при витримці 20 хв. Після витримки 40 хв. залишається лише 2 % фериту. Після гартування від температури аустенізації 880 °С з витримкою 40 хв. структура складається з дрібногольчатого мартенситу, кулеподібного графиту та залишків фериту.

Структура не змінюється після витримки 60 хв. Після гартування від температури 920 °С при всіх витримках від 20 до 60 хв структура складається з крупногольчатого мартенситу та кулястого графіту. Після витрмки 20 хв. в структурі спостерігаються залишки фериту, а при збільшенні витримки до 40 – 60 хв в структурі з'являється залишковий аустеніт. Твердість та фазовий склад зразків ВЧКГ в литому стані наведені в табл. 7.

З табл. 7 видно, що твердість після гартування від температури аустенизації 860 °С при збільшенні витримки від 20 до 60 хв. зростає з 48 ÷ 49 до 50 ÷ 51 HRC, а після гартування від температури аустенизації 880 °С при збільшенні витримки з 20 до 60 хв. далі зростає з 56 ÷ 57 до 58 ÷ 59 HRC через зменшення феритної складової. Після гартування від температури аустенизації 920 °С при збільшенні витримки від 20 до 60 хв. твердість знижується з 57÷58 до 54 ÷ 55 HRC через виникнення залишкового аустеніту. Результати досліджень вказують на те, що температури аустенізації 880 – 900 °С практично оптимальні для гартування ВЧКГ, оскільки забезпечують повний перехід фериту в аустеніт.

Таблиця 7

Твердість та фазовий склад зразків ВЧКГ в литому стані та після гартування в маслі (температура масла 20°С)

| | Литий стан HRC (HRB) | Фазов. склад | Гартування | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $T_а$, °С | $\tau_а$, хв. | HRC | Фазов. склад* |
| 1 | 22 | КГ +П+Ф | Від 860 | 20 | 49,3 | $Ф_{60}$+М+КГ |
| 11 | 22 | КГ +П+Ф | | 40 | 49,3 | $Ф_{30}$+М+КГ |
| 111 | 102 (HRB) | - | | 60 | 49,6 | $Ф_{10}$+М+КГ |
| 2 | 22 | КГ +П+Ф | Від 880 | 20 | 57,0 | $Ф_{8}$+М+КГ |
| 22 | 22 | КГ +П+Ф | | 40 | 57,0 | $Ф_{сл}$+М+КГ |
| 222 | 102 (HRB) | - | | 60 | 58,0 | $Ф_{сл}$+М+КГ |
| 3 | 21,5 | КГ+П+Ф | Від 920 | 20 | 57,6 | $Ф_{сл}$+М+ $А_з$ + КГ |
| 33 | 22 | КГ+П+Ф | | 40 | 55,0 | М+$А_з$.+ КГ |
| 333 | 102 (HRB) | - | | 60 | 54,3 | М+ $А_з$.+ КГ |

Наступний підрозділ цієї глави присвячений визначенню термочасових режимів термічної обробки відносно умов експлуатації лемешів. Для визначення оптимального режиму були розглянуті два варіанти термообробки:

1. Гартування в масло від оптимальної температури аустенізації та наступний відпуск при температурах 320 – 340 °С з витримками при цих температурах 2 – 3 години, як найбільш поширений, доступній та дешевий вид термообробки.

2. Ізотермічне гартування (на бейніт) від оптимальної температури аустенізації за температур 310 и 350 °С з ізотермічною витримкою 1, 2 и 3 год. (гартувальне середовище – олово).

Результати механічних випробувань показали, що перший варіант термообробки по рівню механічних властивостей зразків значно поступається ізотермічному гартуванню, хоча цей вид термообробки дорожчий. Тому в подальшому всі дослідження виконувались при використанні другого типу термообробки. Дані механічних випробувань наведені в таблиці 8.

На рис. 7 представлена мікроструктура металевої матриці ВЧ після різних режимів гартування. Структура після гартування в масло з наступним відпуском (рис. 7а) являє собою крупногольчатий мартенсит.

Після ізотермічного гартування при температурі 310 °С основу металевої матриці складає дрібногольчатий бейніт та кулястий графіт (рис. 7б, в). Після ізотермічного гартування при температурі 350 °С матриця – крупногольчатий бейніт та кулястий графіт.

Таблиця 8

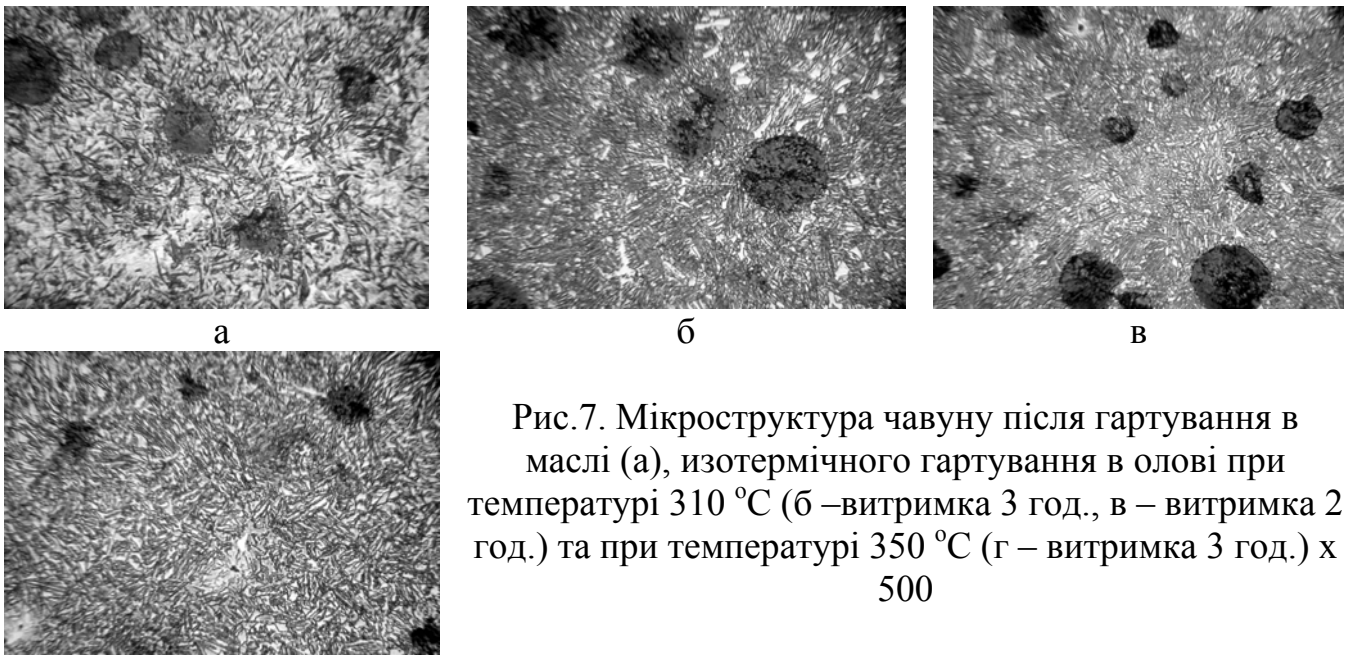
Механічні властивості зразків ВЧШГ після різних типів термообробки

| Умови гартування | | | Механічні властивості | | | | Структура | Фазовий склад |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Темпер. ауст. °С | Темпер. гарт., °С | Витрим., год. | Тверд., HRC | KCU, Дж/см$^2$ | $\sigma_в$, МПа | δ, % | | |
| 880 °С | 310 | 1 | 34,8 | 32 | 610 | 3,8 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | Б – бейніт, 70-75 % $А_{зал.}$ до 25 % КГ – кулястий графіт |
| | 310 | 2 | 35 | 104 | 1080 | 5,8 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 310 | 3 | 35,5 | 125 | 1150 | 8,8 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 310 | 3 | 35,6 | 130 | | | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 350 | 1 | 34 | 135 | 1160 | 8,4 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 350 | 1 | 34,3 | 132 | 1180 | 8,4 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 350 | 2 | 33 | 115 | 1140 | 8,6 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 350 | 3 | 33,5 | 103 | | | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |
| | 350 | 3 | 33,8 | 137 | 1120 | 9,1 | Б+$А_{зал.}$ + КГ | |

Створення при ізотермічному гартуванні бейнітної структури металевої матриці з присутністю залишкового аустеніту дає поєднання високої міцності (бейніт) та достатніх пластичних характеристик (аустеніт). В подальшому саме високоміцний чавун з бейнітною структурою було використано для розробки наукових основ технології виготовлення деталей ґрунтообробної сільгосптехніки.

У зв’язку з цим наступний підрозділ роботи присвячений аналізу впливу режимів ізотермічного гартування на закономірності структуроутворення, формування механічних, триботехнічних та службових характеристик.

Наведений в дисертації огляд літератури вказує на те, що температурні інтервали, де відбувається бейнітне перетворення, залежать від великої кількості факторів: хімічного складу, розміру вихідного зерна, температури аустенізації, наявності нерозчинених карбідів, присутності неметалевих включень та домішок. Всі ці фактори впливають на кінетику перетворення і, як наслідок, на характер структуроутворення. Голкоподібний характер мікроструктури при обох температурах гартування безумовно вказує на дифузійно- зсувний механізм структуроутворення бейнітної структури, проте різний розмір структурних складових та певна відмінність морфології вказує на те що при 310 °С формується структура нижнього бейніту, а при 350 °С структура формується за проміжним механізмом, демонструючи деякі особливості, що притаманні верхньому бейніту.



а б в г

Рис.7. Мікроструктура чавуну після гартування в маслі (а), изотермічного гартування в олові при температурі 310 $^{o}$С (б –витримка 3 год., в – витримка 2 год.) та при температурі 350 $^{o}$С (г – витримка 3 год.) х 500

Результати механічних випробувань (табл. 8) вказують на те, що твердість дещо знижується при підвищенні температури гартування, тоді як пластичність і ударна в'язкість (тріщиностійкість) незначно зростають. Тобто, підвищення температури гартування сприяє підвищенню службових характеристик виробів, що працюють при ударних режимах навантаження. Проте, ці переваги не дуже великі. Збільшення значення ударної в'язкості зразка, загартованого при вищій температурі, не перевищує 15 %. Зміна тріщиностійкості при кімнатній температурі не перевищує 10 %, а при рідкому азоті – не більше 5 %. Ці результати не дають однозначної відповіді, що до впливу режимів ізотермічного гартування на параметри зношування.

Для дослідження процесу зношування була розроблена оригінальна експериментальна методика оцінки триботехнических характеристик зразків з БВЧШГ, що моделює умови експлуатації деталей ґрунтообробної сільгосптехніки в різних умовах обробки ґрунту. В якості абразивних

середовищ використано вологий та сухий пісок яру, чорнозем малогумусний та глина звичайної вологості (10 %). Для порівняння наведені дані з втрати ваги зразка розміром 10х10х20 мм, отриманого з серійного сталевого лемеша. Швидкість обертання зразків складала 3 м/сек, що відповідає швидкості руху трактора 10 км/час. Питоме навантаження складало 0,8 МПа, що відповідає навантаженню 200 кг на один леміш (згідно даним УкрЦВТ). Тертя відбувалось по торцях, та гранях. Загальна довжина доріжки тертя 5 км. Абразивне середовище змінювалось після кожного випробування. Зносостійкість визначалась по зміні ваги з точністю 0,0005грамів. Склад модифікаторів суттєво впливає на зносостійкість. Найкращу зносостійкість демонструє бейнітний чавун модифікований ЖКМК4Р и КМК1.

Дані втрати ваги зразків з високоміцного чавуна з модифікатором КМК1, компактованого за технологією прокатки, наведені на рис. 8.

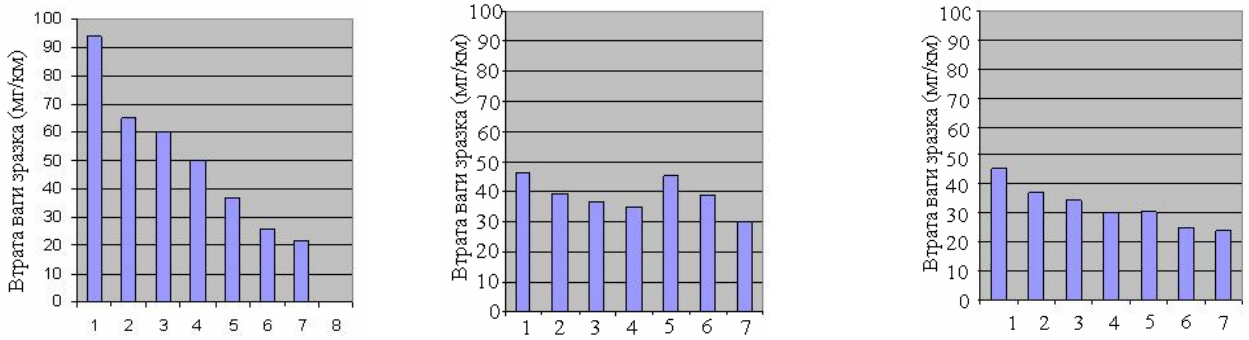



Рис. 8. Результати триботехнічних випробувань зразків ВЧ при терті в різних середовищах: а – в сухому піску з яру, б – в вологому піску з яру, в – волога глина, г – чорнозем; після різних видів термообробки: 1 – температура аустенізації 890 °С, 30 хв, гартування в масло з відпуском 320 °С, витримка 3 год; 2 – температура аустенізації 890 °С, 30 хв, ізотермічне гартування при 310 °С, витримка 1 год. 3 – те ж саме, витримка 2 год; 4 – те ж саме, витримка 3 год; 5 – температура аустенізації 890 °С, 30 хв, ізотермічне гартування при 350 °С, витримка 1 год; 6 – те ж саме, витримка 2 год; 7 – те ж саме, витримка 3 год

За цією ж методикою була визначена втрата ваги зразка, отриманого з серійного сталевого лемеша в сухому піску з яру – 309,4 мг/км; в вологому піску з яру – 140,4 мг/км; в – вологій глині – 74,2 мг/км; і чорноземі – 2,52 мг/км. Порівняння результатів свідчить про значні переваги виробів з бейнітного чавуну. Найкращу зносостійкість в усіх випадках продемонстрували зразки після ізотермічного гартування з витримкою 3 год, хоча значення зносостійкості в різних середовищах та співвідношення даних для різних

режимів термообробок суттєво різняться. Результати випробувань на зносостійкість були базою для вибору технологічних режимів виготовлення дослідних зразків лемешів для натурних польових випробувань під час оранки.

При дослідженні механізму тертя бейнітних чавунів слід враховувати особливості процесу структуроутворення під час деформації, які не властиві іншим класам матеріалів. Перш за все, в зоні локалізованого зсуву відбувається практично миттєва перебудова залишкового аустеніту в мартенсит з різким градієнтним зміцненням матеріалу приповерхневої зони (твердість підвищується при наближенні до поверхні). Крім того, для таких структур характерна здатність витримувати неоднорідні деформації (deformability) завдяки перешкоджанню процесу утворення окремих тріщин і уповільнення процесу руйнування в цілому.

В роботі наявність зміцненого деформованого при поверхневого шару підтверджено за допомогою дослідження зміни твердості від глибини індентування. Значення твердості і глибини занурювання при індентуванні різним зусиллям бейнітного чавуну, загартованого на 350 °С, представлені в табл. 9.

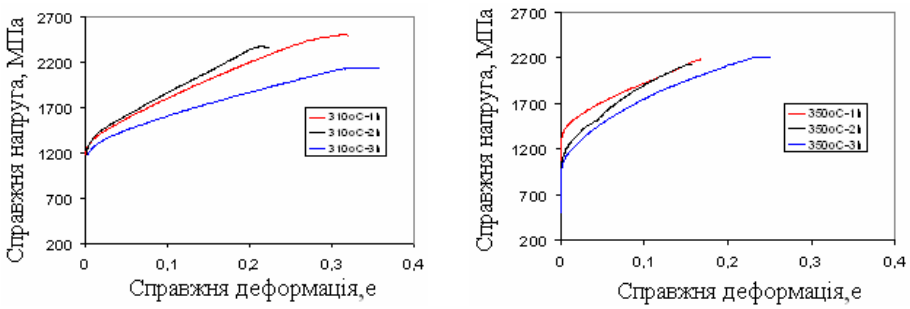
Дані, наведені в таблиці 9 свідчать про те, що приповерхневий деформований шар має розмір ~ 2 мкм. Його твердість збігається з твердістю, отриманою при індентуванні навантаженням 20 г. Вона складає 8,5 ГПа, що майже вдвічі вище за твердість матриці (5 ГПа). У зв'язку з градієнтом деформації твердість різко знижується з глибиною і при вантаженні зусиллям 200 г на глибині 4 мкм наближається до твердості матриці.

Таблиця 9

Значення твердості і глибини занурювання при індентуванні різним зусиллям бейнітного чавуну, загартованого від 350 °С

| Зусилля, г | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| Твердість, ГПа | 8,7 | 8,5 | 8,0 | 6,5 | 5,5 |
| Глибина, мкм | 0,7 | 0,9 | 1,67 | 2,8 | 3,8 |

Оскільки при випробуваннях на розтяг можливості вивчення швидкості деформаційного зміцнення обмежені через малу пластичну деформацію до руйнування, в роботі проведені додаткові дослідження кривих зміцнення зразків, що випробувані на одновісне стиснення. Результати досліджень представлені на рис. 9.

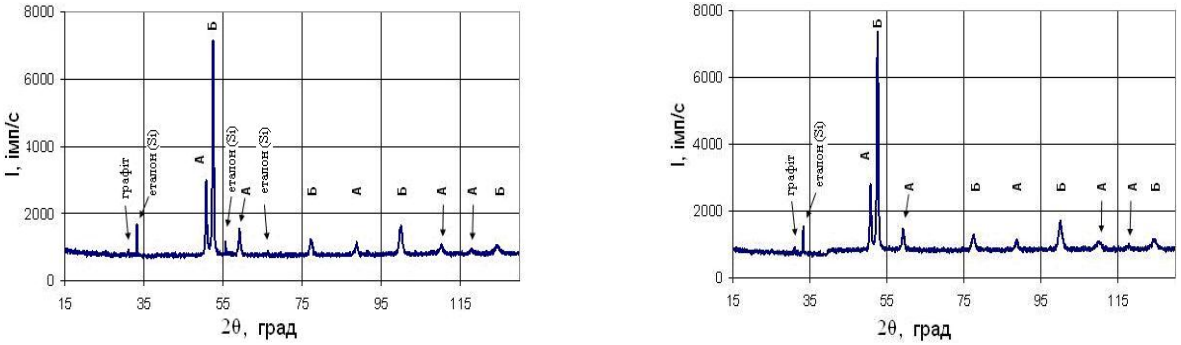



а б

Рис. 9. Істині діаграми стискання бейнітного чавуну після ізотермічного гартування від 310 С (а) та 350 °С (б)

Зразки, загартовані від 350 °С, продемонстрували аномально високу швидкість зміцнення. При збільшенні деформації від 0 до 0,2 напруга збільшується від 1000 до 2200МПа. Середня швидкість зміцнення досягає 6000МПа. Така механічна поведінка характерна для матеріалів, схильних до деформаційно індукованих перетворень. У зразках, загартованих від 310 °С, швидкість зміцнення значно нижча. При збільшенні істинної деформації від 0 до 0,35 напруга збільшується від 1200 до 2200 МПа, що відповідає середній швидкості зміцнення 3000 МПа. Відповідно до теорії деформаційного зміцнення TRIP-сталей перетворення залишкового аустеніту на мартенсит різко збільшує швидкість зміцнення і, як наслідок, службові характеристики.

Кількість залишкового аустеніту в чавуні після ізотермічного гартування визначали методом рентгенівського аналізу. Характерні рентгенограми для гартування при 310 °С та 350 °С з витримкою 3 години представлені на рис. 10.




а б

Рис. 10. Фрагменти рентгенограм зразків БВЧКГ після гартування в олові при температурі 350 °С (а) та 310 °С (б), витримка 3 год. А – аустеніт, Б – бейніт

З рентгенограм видно, що після гартування від 350 °С залишкового аустеніту більше, ніж при 310 °С, що добре узгоджується з існуючими теоретичними уявленнями. Графік залежності кількості залишкового аустеніту від часу витримки при температурі гартування 350 °С наведений на рис. 11. У структурі чавуну, загартованого при 350 °С, після витримки 1 годину виявлено 35 % залишкового аустеніту, після 2 годин витримки його кількість декілька знизилась (до 31 %) і при витримці 3 іще знизилася до 27 %. У зразках, загартованих при 310 °С, кількість залишкового аустеніту знаходиться на рівні 20 %.

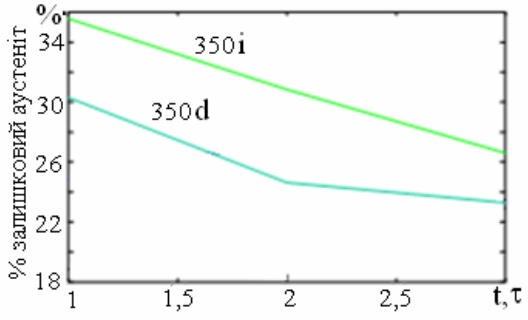
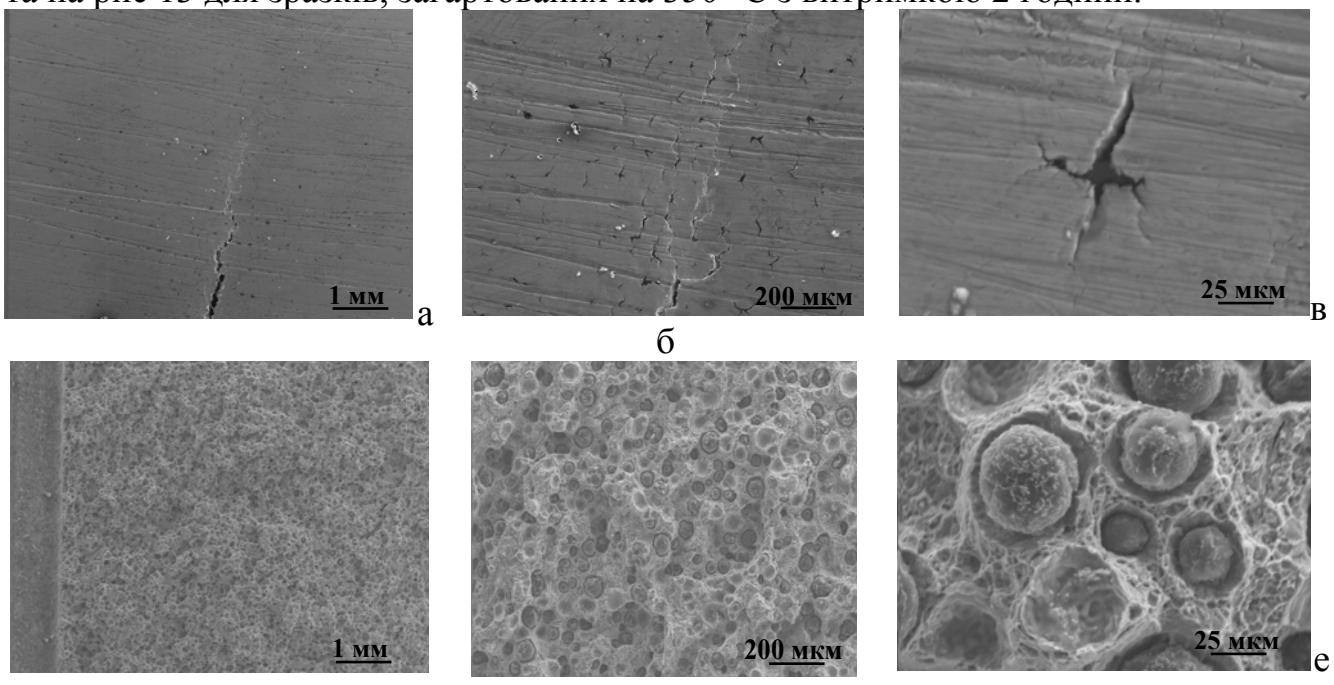



Рис. 11. Графік залежності кількості залишкового аустеніту від часу витримки при температурах гартування 350 °С та після деформації на 30 %

На цьому ж графіку наведені дані про кількість залишкового аустеніту після стиснення на 30 %. Результати ізотермічного гартування при 350 °С пластична деформація веде до часткового

розпаду залишкового аустеніту. При всіх витримках розпадається приблизно п'ята частина від початкової кількості. Дослідженя показали, що після такого здавалося б невеликого об’єму перетворення матеріалу, це явище може істотно впливати на процеси деформаційного зміцнення, оскільки такий перехід супроводжується значною зміною об'єму. У широко відомих TRIP–сталях зміна вмісту залишкового аустеніту від 10 до 8 % веде до практично трикратного зміцнення сталі в діапазоні деформації 0 – 10 %. Таким чином, виявлений частковий розпад аустеніту під дією деформації є, поза сумнівом, значимим для підвищення інтенсивності зміцнення. На зразках загартованих від 310 °С розпад аустеніту практично не спостерігався.

Ефект уповільнення процесу дефектоутворення не вдається виявити прямими дослідженнями структури зношеного зразка через високу локальність явищ, що вивчаються. Тому для підтвердження цього механізму в роботі був вивчений схожий фізичний ефект – формування області процесу в пластичній зоні у вершині рухомої тріщини унаслідок градієнта деформацій. Для цього за допомогою скануючого мікроскопа була вивчена пластична зона поблизу тріщини на зразках бейнітного чавуну, підданих різному ізотермічному гартуванню і випробуваних на тріщиностійкість. Результати представлені на рис. 12 для бейнітного чавуну, загартованого на 310 °С з витримкою 1 година, та на рис 13 для зразків, загартованих на 350 °С з витримкою 2 години.




а б в

г д е

Рис. 12. Дефектоутворення у вершини тріщини а – х50, б – х150, в – х1000 та поверхня руйнування г – х50, д- х150, е – х1000 для бейнітного чавуну, загартованого на 310 °С з витримкою протягом 1 години

Результати досліджень показали, що для зразків, загартованих при 310 °С, в зоні процесу спостерігається велика кількість мікротріщин. В зразках, загартованих при 350 °С, руйнування локалізоване у вузькій зоні уздовж вершини тріщини, мікророзтріскування практично не спостерігається. Аналіз

поверхні руйнування показує, що зразок, оброблений по першому режиму, руйнується виключно по ямковому механізму. На зламі другого зразка виявляються яскраво виражені ділянки сколу. Це може свідчити про утворення при деформації крихкої фази – мартенситу, яка провокує руйнування по механізму сколу. Не дивлячись на відмінність в механізмах руйнування, енергетичні витрати на поширення тріщини (які можна оцінити по величині тріщиностійкості) виявляються співрозмірними. Менші енергетичні витрати при руйнуванні по механізму сколу компенсуються енергетичним внеском фазового перетворення.

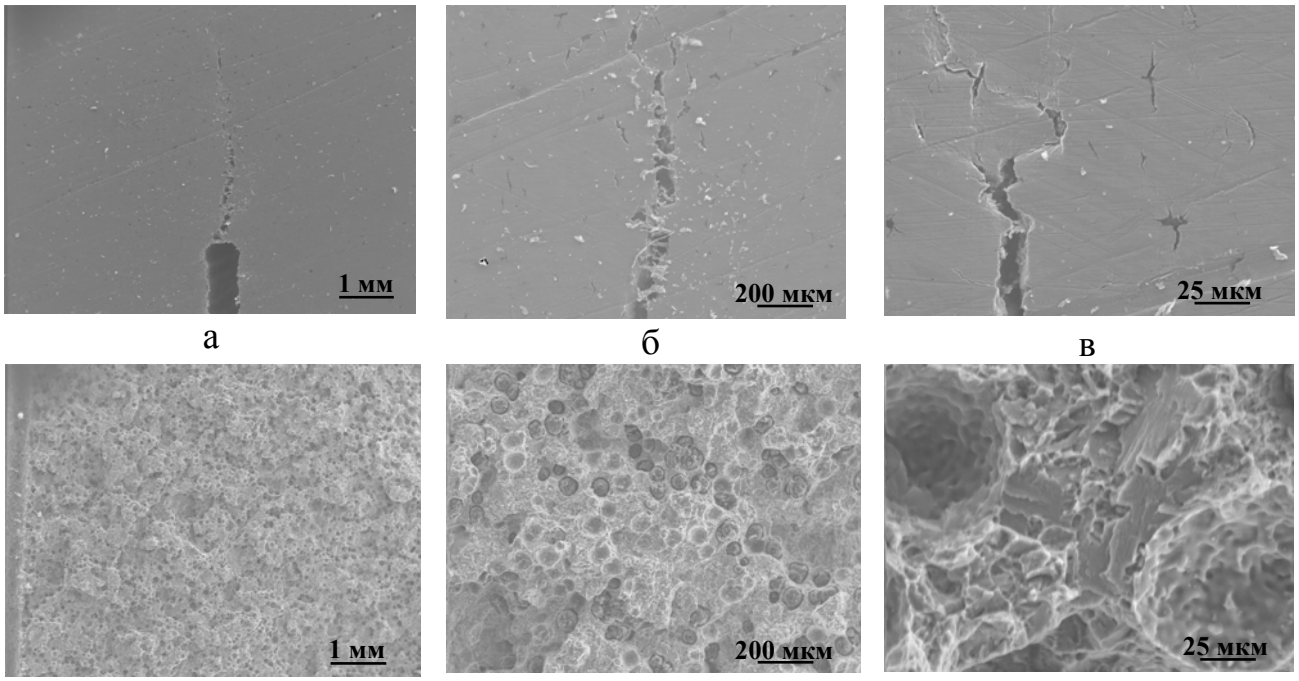



Рис. 13. Дефектоутворення у вершини тріщини: а – х50, б – х150, в – х1000 і поверхня руйнування (г – х50, д – х150, е – х1000) для бейнітного чавуну, загартованого на 350 °С з витримкою протягом 2 годин

Таким чином, мартенситне перетворення в приповерхневому шарі бейнітного чавуну, загартованого на 350 °С, сприяє різкому збільшенню його зносостійкості як за рахунок зміцнення поверхневого шару, так і в наслідок зменшення схильності до утворення тріщин. Ці погляди повністю підтвердились результатами дослідження зносостійкості чавуну після різного ізотермічного гартування. Результати досліджень, виконаних за умов тертя в середовищі сухого ярового піску (рис. 13 а), демонструють більше як двократне підвищення зносостійкості чавуну, підданому ізотермічному гарту при 350 °С, в порівнянні з гартуванням при 310 °С.

Дані по зносостійкості матеріалів для лемешів (рис. 8 а) дозволяють прогнозувати динаміку процесу зношування з урахуванням утворення зміцненого шару. Зразок площею 1 $см^2$, загартований на 350 °С з витримкою 3 год., при роботі у піску вологого яру втрачає 22 міліграми за 1 км (рис. 8 а, 7 стовбець.). Враховуючи питому вагу чавуну ~ 6,8 $г/см^3$, визначаємо, що його

розмір при зношенні по площині зменшиться на 30 мкм за 1 км, а зміцнений шар товщиною в 2 мкм буде зношений за 60 м роботи. З врахуванням швидкості руху сучасної сільгосптехніки ця відстань може бути подолана за 5 секунд. Оскільки мартенситне перетворення відбувається за зсувним механізмом зі швидкістю. що наближається до швидкості звуку, за цей час на зміну зношеному шару виникає новий зміцнений шар з підвищеною зносостійкістю.

В сучасних екологічних технологіях обробки землі велику увагу приділяють культивації. Для цього виду сільгоспробіт характерна значно менш глибока переробка (без перегортання) землі, яка потребує менших зусиль. Тому в експериментах на зношування, що імітують роботу лапи культиваторів, прикладене питоме зусилля складало 0,2 МПа (по даним УкрЦВТ), також були розширені режими термообробки. Зразки піддавались ізотермічному гартуванню при температурах 280 °С, 300 °С, 320 °С и 350 °С. Зразки БВЧ після ізотермічного гартування по різним режимам порівнювались зі зразком сталі 65Г після гартування в масло. Результати наведені в табл. 10.

Таблиця 10

Результати лабораторних досліджень зношування зразків, що імітують роботу лап культиватора з БВЧ після ізотермічного гартування по різним режимам

| Режим ТО | Ваговий знос в різних середовищах, мг/км | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Яровий пісок сухий | Глина волога | Яровий пісок вологий | Чорнозем |
| Сталь 65Г, гарт. в маслі | 135,7 | 32,2 | 56,6 | 1,74 |
| БВЧ, гар.280°С 90 хв. | 22,8 | 24,0 | 48,7 | 0,75 |
| БВЧ, гар.300°С 90 хв. | 24,7 | 27,8 | 47 | 0,82 |
| БВЧ, гар.320°С 90 хв. | 23,0 | 26,5 | 44,0 | 0,80 |
| БВЧ, гар.350°С 90 хв. | 26,1 | 27,7 | 49,5 | 0,84 |
| БВЧ, гар.280°С 120 хв. | 22,7 | 25,1 | 46,1 | 0,77 |
| БВЧ, гар.300°С 120 хв. | 17,8 | 21,0 | 22,5 | 0,54 |
| БВЧ, гар.320°С 120 хв. | 17,6 | 20,8 | 22,4 | 0,52 |
| БВЧ, гар.350°С 120 хв. | 17,8 | 21,1 | 22,8 | 0,53 |
| БВЧ, гар.280°С 180 хв. | 22,5 | 23,3 | 46,5 | 0,72 |
| БВЧ, гар.300°С 180 хв. | 17,2 | 22,5 | 22,0 | 0,50 |
| БВЧ, гар.320°С 180 хв. | 17,0 | 20,8 | 21,0 | 0,51 |
| БВЧ, гар.350°С 180 хв. | 16,8 | 20,0 | 19,5 | 0,50 |

Результати досліджень демонструють, що зразки з чавуну працюють значно краще, ніж сталь, В той же час зносостійкість високоміцного чавуну з кулястим графітом після різних режимів гартування в діапазоні температур 300 – 350 °С при всіх досліджених витримках практично не відрізняється. З наукової точки зори цей результат вказує на зміну базового механізму, що відповідає за підвищену зносостійкість. На перший план виходять механізми шаржування твердими частками та змащування поверхні тертя графітом. З практичної точки зору отримані результати дозволяють корегувати технологію

з урахуванням економічної складової. З урахуванням даних таблиці 10 лапи культиваторів доцільно піддавати ізотермічному гартуванню при температурі 300 °С з витримкою 90 – 120 хв.

За результатами проведених досліджень встановлено, що визначальним фактором різкого підвищення зносостійкості бейнітного чавуна в виробах с/х призначення є фазове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит, яке відбувається під дією деформаційних процесів. Враховуючи. що ступінь реалізації цього механізму є надзвичайно чутливим до складу та структури чавуну та температурно-силових умов експлуатації обладнання, за результатами роботи запропоновані матеріалознавчі засади, які дозволяють максимально використати переваги бейнітного чавуна при виробництві змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки.

**Четвертий розділ** присвячений розробці технологічних засад виготовлення дослідної партії литих лемешів та лап культиваторів різних конструктивних варіантів та аналізу результатів натурних випробувань. При виготовленні дослідної партії була розроблена та виготовлена спеціальна модель для литва, яка значно покращила якість відливки в цілому та робочої поверхні, що важливо при оранці. Ливарна технологія дозволяє змінити форму лемеша. Враховуючи інформацію про характер зношування виробів в роботі запропоновано внести зміни в конструкцію носка литого лемеша, збільшивши товщину металу не змінюючи кут занурення в грунт. Були відлиті дві групи лемешів різної конструкції: з безперервним ребром жорсткості та з ребром тільки в носовій частині. Дослідні лемеші термічно оброблювались по двох режимах: температура аустенізації 900°С с витримкою 70хв. з наступним гартуванням при 300 °С з витримкою 120 хв. та такий же режим аустенизації з гартуванням при 350 °С та витримкою 150 хв. Гартування виконувалось на автоматизованій лінії фірми "J.L. Becker Company", що має високотемпературну піч, ємність з розчином солі (50 % $NaNO_3$ + 50 % $KNO_3$), мийку та візок-маніпулятор, що дозволяє одночасно проводити термообробку до 1,7 т металу, тобто до 400 лемешів. Польові роботи показали, що такі вироби працюють в 3 – 4 рази більше ніж сталеві вітчизняного виробництва і в 1,5 – 2 рази перевершують ресурс імпортних лемешів без накладки. В табл. 11 наведена вага та маса лемешів після термообробки та параметри зношування після оранки по чорнозему.

Порівняльний аналіз результатів польових випробувань показав, що по напрацюванню чавунні лемеші переважають стандартні сталеві приблизно в 4 рази. Найкраща термообробка $T_а$ = 900 °С ,70 хв; $T_{иг}$ = 350 °С, 150 хв. Таким чином, результати польових випробувань узгоджуються з результатами триботехнічних досліджень.

Конструктивні зміни лемешів стосуються роботи на особливо складних ґрунтах. В сталевих виробах та виробах іноземного виробництва для роботи в таких умовах використовуються спеціальні насадки. Це потребує уніфікованого вузла кріплення насадки та окремого виробництва цього конструктивного

елементу. На рис. 14 наведені різні конструкцію литих лемешів з бейнітного чавуну.

Таблиця 11

Вага та маса лемешів після термообробки та параметри зношування після оранки по чорнозему

| Маса початкова г | Маса після, г | Конструктивна особливість | Режим ТО | Твердість НВ | Знос,г | Знос,% | Напрацювання, га | Відносний знос г/га |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4130 | 3480 | Ребро вздовж | $T_а$.=900 °С,70хв; $T_{иг}$=350 °С, 150 хв | 380-390 | 650 | 15.74 | 82 | 7,9 |
| 4270 | 3510 | « - » | " - " | 380-390 | 760 | 17,8 | 80 | 9,5 |
| 4250 | 3635 | Ребро в носку | " - " | « - » | 615 | 14,47 | 75 | 8,2 |
| 4100 | 3433 | « - » | " - " | « - » | 667 | 16,27 | 75 | 8,9 |
| 4350 | 3598 | Ребро вздовж | $T_а$=900 °С,70хв; $T_{иг}$=300 °С, 120 хв. | 410-415 | 752 | 17,29 | 80 | 9,4 |
| 4150 | 3562 | Ребро в носку | " - " | « - » | 588 | 14,17 | 60 | 9,8 |
| 4540 | 2855 | | Серійний | | 1685 | 37,11 | 44 | 31,2 |
| 4480 | 2911 | | Серійний | | 1569 | 35,02 | 49 | 26,6 |
| 4570 | 3213 | | Серійний | | 1357 | 29,69 | 50 | 23 |

В другому підрозділі цього розділу наведені результати польових випробувань лап культиваторів з БВЧКГ. Як прототип була обрана лапа культиватору КПС-4 з розмахом крил 330 мм, що є найбільш розповсюдженим типорозміром. Зовнішній вигляд алюмінієвої моделі та чавунної лапи наведені на рис. 15.

Рис. 14. Лемеші з різною конфігурацією ребра жорсткості

а б

Рис. 15. Алюмінієва модель (а) та лита чавунна лапа (б)

Результати польових випробувань дослідної партії, виготовленої в лабораторних умовах, наведені в табл. 12. Результати продемонстрували очевидні переваги чавунних лап, які працювали в тричі більше, ніж сталеві.

Таблиця 12

Динаміка зношування лап культиваторів в глино-чорноземному грунті

| Матеріал | Початкова маса, г | Кінцева маса, г | Зношування | | Напрацювання, га | Відносна знос, г/га |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | г | % | | |
| БВЧ | 1320 | 1293 | 26,9 | 0,31 | 72 | 0,37 |
| БВЧ | 1350 | 1319,06 | 30,94 | 0,34 | 73 | 0,43 |
| БВЧ | 1310 | 1295 | 34,58 | 0,38 | 72 | 0,48 |
| БВЧ | 1370 | 1275,42 | 36,63 | 0,37 | 72 | 0,51 |
| БВЧ | 1380 | 1343,37 | 35.64 | 0,36 | 72 | 0,49 |
| БВЧ | 1360 | 1323,51 | 36,49 | 0,41 | 72 | 0,50 |
| серійний | 1150 | 1020 | 130 | 11,3 | 21 | 6,19 |
| серійний | 1145 | 1005 | 140 | 12,2 | 25 | 5,6 |
| серійний | 1152 | 1010 | 142 | 12,3 | 22 | 6,45 |

Наступна дослідно-промислова партія лап була виготовлена в заводських умовах Димерського ООО «Альянссервіс» з використанням високочастотної индукційної печі ІСТ 016 з ємністю тигля 160 кг. Термічна обробка для отримання бейнітної структури проводились на ООО «Амстед-Рейл» по наступному режиму: нагрів до температури 900 °С з витримкою 1 год., наступне гартування при 300 – 310 °С з витримкою 2 год. Структура метала бейнітно-аустенітна.

Польові випробування на різних ґрунтах проводились протягом 5 сезонів (напрацювання 150 га) та дозволили визначити ресурс роботи литих лап культиваторів. З урахуванням динаміки зношування цей ресурс за втратою ваги складає не менш 7 – 8 сезонів , що в 6 – 7 разів перевищує ресурс сталевих лап вітчизняного виробництва та в 2 – 3 рази більше, ніж у таких імпортованих деталей з борованої сталі.

Використання ливарних технологій дозволяє в широких межах варіювати конструкції змінних елементів у відповідності до вимог замовника. Сучасні аграрні технології, які направлені на виробництво екологічно чистої продукції, велику увагу приділяють конструктивним особливостям оброблювальної техніки. Для ПП «Агроекологія» (Полтавська обл.) була виготовлена дослідна партія лап культиваторів з метою забезпечення гарантованого підрізання коріння бур’яну на глибині 20 – 40 мм. Така обробка на існуючих сталевих лапах неможлива через їх глибоке занурювання в грунт (100 – 150 мм). Польові випробування дали позитивний результат. Розроблена конструкція поєднує кращі якості лапи культиватора та плоскоріза. Дослідно-промислова партія виробів (рис. 16) була направлена в ПП «Агроекологія». Вона задовольнила вимоги аграріїв і забезпечила стабільну роботу на протязі 4-х сезонів (весна-осінь, весна-осінь) Крім того були виготовленні по заказу ТОВ ім. Довженка

дослідні партії литих лап до культиваторів QuuadX та долот до глибокорозпушувачів Vogel Noot (рис. 17), які були випробувані в 2016 році. Ресурс литих деталей перевищує у 2 рази (лапи) і більш ніж в 3 рази (долота) в порівнянні з імпортними.

Рис. 16. Одна з партій лап-плоскорізів

а

б

Рис. 17. Лапа до культиватора QuuadX (а), Долото до глибокорозпушувача Vogel Noot (б)

Результати випробувань дослідних зразків деталей грунтообробної техніки ТОВ ім. Довженка дозволили розширити номенклатуру для подальших випробувань в 2017 році. Було запропоновано виготовити дослідні партії розпушувачів глибокого рихлення (взамін плугів) для культиваторів TIGER (для ПП «Агроекологія») та культиваторів Soil Pro (ТОВ ім. Довженка). Для випробувань в сезони оранки 2017 року були виготовлені дослідно-промислові партії цих деталей для забезпечення обробки посівних площ цих підприємств (58000 га). На рис.18 приведено зразки вказаних деталей.

а

б

Рис. 18. Зразки розпушувачів глибокого рихлення, виготовлених з високоміцного бейнітного чавун в замін імпортних деталей: деталі розпушувача «TIGER» (а); розпушувач культиваторів « Soil Pro» (б)

В **п'ятому розділі** розглянути матеріалознавчі питання, які стосуються розробки технології отримання гальмівних колодок залізничного транспорту з високоміцного чавуну з підвищеними гальмівними характеристиками. У вступній частині до розділу зазначається, що, хоча предмет дослідження цього розділу є відмінним від попередніх, існує низка принципових моментів, які дозволяють розглядати результати цього розділу, як логічний фрагмент

запропонованої дисертаційної роботи. Перш за все, це стосується важливості проблематики для господарства України, враховуючи необхідність скорішого переходу на швидкісний залізничний транспорт та безумовно важливу роль ВЧКГ в створенні гальмівних колодок нового покоління. Як і у попередніх розділах, для досягнення необхідного результату слід створити матеріалознавчі засади виробництва цих конструктивних елементів з урахуванням особливостей їх роботи в умовах тертя. В даному випадку необхідно звернути увагу не тільки на підвищення зносостійкості але і на створення структури, яка сприяє збільшенню сили тертя та зменшенню гальмівного шляху.

Таблиця 14

Макро- і микроструктура високоміцних чавунів в залежності від типу модифікаторів

| Модиф. | Особливості та властивості макро- і мікроструктури | Графіт |
|---|---|---|
| КМКСП-2 | Сталистий злом, усадкова пористість площею 2 – 3 %, "чорних плям" немає | КГф5, КГф4 |
| ЖКМК-2Р | Сталистий злом, усадкова пористість площею 4 – 7 %, "чорних плям" немає | КГф5, КГф4 |
| Zitvar–8Ce | Сталистий злом, пористість та усадкові раковини площею 11 – 17 %, є "чорні плями" | КГф5, КГф4, КГф3 |
| Pzocalloy-16 | Сталистий злом, пористість та усадокові раковини площею 12 – 18 %, є "чорні плями" | КГф5, КГф4, КГф3 |
| ФСМг7 | Сталистий злом, пористість та усадкові раковини площею 12 – 18 %, є "чорні плями" | КГф5, КГф4, КГф3 |
| Mg–Ni–РЗМ | Біло-сталистий злом, пористість та усадкові раковини площею 15 – 20 %, карбиди по всьому січенню проби | КГф4, КГф3 |
| КМКСП-5 | Сталистий злом, пористістю 3 – 5 % по площі, "чорні плями" /кальція в КМК немає/ | КГф5, КГф4, КГф3 |
| КМКСП-7 | Пористість 2 – 3 % по площі, "чорних плям" немає | КГф5 |
| КМКСМ-1-5 | Процес модифікації без піроефекту /немає Mg/, усадкова пористість площею 5 – 8% | КГф5, КГф4 |
| ФКМКСП-ОР | Сталистий злом, усадкова пористість площею 4 – 8 %, "чорних плям" немає /вагранoчний чавун/ | КГф5, КГф4 |
| КМКСМ-10 | Немає усадкових дефектів, "чорних плям" та відбілу | КГф5, КГф4 |
| КМК 8 (прокат) | Немає усадокових дефектів та "чорних плям". Невеликий відбіл в тонкому січенні клина | КГф5, КГф4 |
| КМКСМ-858 | У верхньому січенні 70 % КГ + 30 % ВГ | |
| КМКСМ-50493 | Сталистий злом, "чорних плям" немає, усадкова пористість 5 – 8% по площі, /в складі КМКСМ 12 % Ті/ | КГф5, КГф4 |
| КМКСМ-70493 | Сталистий злом, усадкових дефектів та чорних плям" немає /в складі КМКСМ 1 1% Ті и 11 % FeMn/ | КГф5, КГф4 |
| КМКСМ-80493 | Сталистий злом /в складі КМКСМ 11 % Ті та 11 % $CaF_2$/, "чорних плям" та усадкових дефектів немає | КГф5, КГф4 |
| АКМКСМ-1701793 | Сталистий злом, "чорних плям" немає, усадкова пористість площею 5 – 8 % | КГф5, КГф4 |

Зазначається, що колодки з сірого чавуну, які довгий час займали чільне місце, в останні роки почали поступатися композиційним. Оскільки ВЧКГ

демонструє високу зносостійкість, це обумовлює зростаючий інтерес до впровадження цього класу матеріалів для гальмівних елементів залізничного транспорту. На відміну від сірого чавуну, чавун з кулястим графітом кристалізується з великими усадковими дефектами. Тому в перший частині роботи проведено удосконалення складу модифікаторів з урахуванням схильності до утворення усадкових дефектів. В роботі проаналізовано вплив різних модифікуючих елементів на умови кристалізації. В табл. 14 наведені результати дослідження впливу складу різних модифікаторів на структуру та схильність до утворення усадкових дефектів.

Практично в усіх випадках за винятком складів КМ з фторидами РЗМ, Ca, Mg, в клиновидних пробах виникали усадкові дефекти. Більшість з модифікаторів дозволяють отримати в структурі чавуну графіт кулеподібної форми ШГф5 и ШГф4. Оптимальними модифікаторами для подальшої роботи, згідно приведеним результатам таблиці 14, обрані модифікатори АКМКСМ 1701793 та КМК8. За результатами проведених досліджень встановлено, що колодки зі спеціального високоміцного чавуну необхідно виливати в закритих формах з лісниковою системою.

Натурні випробування гальмівних колодок зі специального високоміцного чавуну, виготовлених на заводі «Кузня на Рибальському» («Ленінська Кузня»), проводились у Фастівському моторвагонному депо. Використані склади, що відповідають феритній структурі «Ф», перлітній структурі «П» та склад с підвищеним вмістом фосфору «Р» (деклараційний патент України № 40045) представлені в таблиці 15.

Таблиця 15

Хімічний склад дослідних колодок

| Тип колодки | Вміст елементів, мас % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Mg |
| Ф | 3,36 | 3,9 | 0,43 | 0,14 | 0,03 | 0,002 |
| П | 3,41 | 2,5 | 0,52 | 0,15 | 0,024 | 0,023 |
| Р | 3,34 | 2.73 | 0.39 | 1.38 | 0,018 | 0,027 |

Після встановлення колодки на вагонний візок (рис. 19) були проведені натурні випробування згідно вимогам ТУ У 35.2-00292824-00202002, ГОСТ 28186. Оскільки колодки типу Ф та П показали збільшення гальмівного шляху при швидкостях 120 та 140 км/год, на заключному етапі порівняльних дослідів використовували колодки типу Р через відомий ефект позитивного впливу фосфідної евтектики в формуванні поверхневих шарів з підвищеною фрикційними властивостями та зносостійкістю.

Рис. 19. Дослідна колодка на візку вагона

Натурні випробування показали, що за 46 діб експлуатації знос серійних колодок склав11,5 мм. Дослідні колодки мали середній знос 5,25 мм. Після 54 діб всі серійні колодки вичерпали свій ресурс. Дослідні колодки працювали 75 діб. За цей час їх середній знос 12,54 мм. Фахівці оцінили працездатність дослідних колодок в 85 – 90 діб, що приблизно вдвічі перевищує ресурс серійних. Згідно ГОСТ 28186-89 співвідношення довжини в метрах гальмівного шляху дослідних колодок з спеціального високоміцного чавуну з вмістом 1 – 1,2 % Р та серійних з сірого фосфористого чавуна визначаються як:

$$\frac{350}{224}/V = 50 \quad км/год/; \frac{935}{910}/V = 90 \quad км/год/;$$

$$\frac{1527}{1026}/V = 120 \quad км/год/; \frac{1464}{1070} = /V = 140 \quad км/год/$$

В знаменнику вказаний гальмівний шлях для серійних колодок. Ці дані також свідчать про значні переваги дослідної партії.

Таким чином проведені комплексні дослідження та стендові випробування дозволяють запропонувати склад чавуну для гальмівних колодок, на який отримано деклараційний патент України.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконаний комплекс досліджень, який включив встановлення складу високоміцних чавунів, типу та складу модифікаторів, режимів термообробки і умов експлуатації, дозволив сформулювати матеріалознавчі принципи підвищення зносостійкості деталей сільгосптехніки та транспорту з бейнітного чавуну щляхом отримання його структури з максимальним вмістом аустеніту, які полягають у реалізації особливого механізму зношування, згідно якого у поверхневому шарі під дією деформації відбувається перетворення залишкового аустеніту в мартенсит , що сприяє зростанню твердості та зменшенню схильності до тріщиноутворення в високоміцному чавуні в зоні, яка контактує з робочим середовищем. Підсумуючи результати досліджень, викладені в дисертації, зроблені наступні висновки:

1. Встановлено базовий склад чавуну для змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки: (мас.%) 3,2 – 3,5 C; 1,4 – 1,6 Si; 0,2 – 0,3 Mn; 0,2 – 03 Mo; 0,4 – 0,5 Cu; 0,4 – 0,5 Ni; 0,01 – 0,02 Cr; < 0,02 P; S < 0,02 та склад модифікатора КМК 1: 7,5 % Mg, 30 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 Ba), 17,5 % Fe, 10 % модифікатор-флюс «Рефтокон» та 9 % РЗМ (ФС30РЗМ30) (мас.%)

2. Розроблена безвідходна промислова технологія виготовлення порошкових модифікаторів у вигляді прокату. Встановлені співвідношення пластичних і крихких складових порошкових модифікаторів, що забезпечують міцність прокатних стрічок, яка значно вище межі мінімальної стійкості формовок. Продуктивність методу прокатки забезпечує виготовлення 5 – 6 т модифікаторів на місяць на одному стані з діаметром валків 500 мм.

3.Встановлена чутливість кількості залишкового аустеніту від температури гартування та часу витримки. Показано, що гартування при температурі 350°С з витримкою 1, 2 та 3 год. веде до формування залишкового аустеніту в кількості 35, 31 та 27%, відповідно. При температурі 310°С кількість залишкового аустеніту при всіх витримках зберігається на рівні 20 %. Пластична деформація зразків, загартованих при 350°С веде до розпаду приблизно п'ятої частини аустеніту з формуванням мартенситу. Гартування при 310 °С не веде до розпаду аустеніту при деформації.

4. Фазове перетворення під час деформації (TRIP-ефект) сприяє різкому зростанню механічних та службових характеристик в приповерхневому шарі металу. Встановлено, що товщина зміцненого шару в деталях навісного обладнання сільгосптехніки, в якому спостерігається двократне підвищення твердості, складає ~ 2 мкм. В області градієнту напруг і деформацій спостерігається стримування схильності до тріщиноутворення.

5. Розпад залишкового аустеніту під впливом деформації є основним чинником підвищення зносостійкості чавуну після ізотермічного гартування. Значення зносостійкості після випробувань в різних середовищах і для різних режимів термообробки суттєво відрізняються

6. Польові випробування показали, что при оптимальній термообробці $T_а$. 900 °С, 60 – 70 хв.; $T_{из}$ 350 °С 150 хв. чавунні лемеші перевершують стандартні сталеві вітчизняного виробництва по ресурсу роботи в 3 – 4 рази. Зміни в конструкції носка литого лемеша, які забезпечуються можливостями лиття, дозволяють збільшити ресурс його роботи та відмовитись від необхідності використовувати додаткові насадки.

7. Встановлено. що завдяки меншому зусиллю на деталі типу лап культиваторів в порівнянні з лемешами, відповідно 0,2 та 0,8 МПа, вдається знизити температуру ізотермічного гартування до 300 – 310 °С, витримка 2 год. Польові випробування показали, що за таких режимів ресурс роботи перевищів 150 га. Це в 7 разів більше, ніж у сталевих лап вітчизняного виробництва та в 2 – 3 рази більше, ніж у імпортних. Проведене конструкторське доопрацювання забезпечило підрізання кореневої системи бур'яну на глибині 20 – 40 мм. Конструкція об'єднує найкращі якості лапи культиватору та плоскорізу.

8. Встановлені закономірності впливу складу та типу модифікаторів на особливості структуроутворення та схильність на формування усадкових дефектів в масивних відливках з високоміцного чавуну. Це дозволило оптимізувати технологію одержання гальмівних колодок з високоміцного чавуну з високим вмістом фосфору у відкритих формах з мінімальними усадковими дефектами.

9. Визначені склади чавуну та комплексних композитних модифікаторів в вигляді прокату для високофосфористих моторвагонних та локомотивних колодок, які забеспечили зростання ресурсу експлуатації при випробуваннях в 2 – 2.2 рази в порівнянні з серійними колодками із сірого фосфористого чавуну та скорочення гальмівного шляху при гальмуванні від швидкостей 120 – 140 км/год на 30 – 35 %.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Волощенко С.М. Возможности и перспективы использования бейнитного чугуна при изготовлении лемехов // С.М. Волощенко, А.С. Волощенко, А.И. Виноградский // Процессы литья. – 2007. – № 5– С. 56 – 61. – *Дисертантом розглянуті перспективи використання бейнітних чавунів для лемешів з урахуванням польових випробувань дослідних зразків.*

2. Волощенко С.М. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термообробки / С.М. Волощенко, К.О. Гогаев, О.К. Радченко, М.Г. Аскеров, В.Т. Варченко // Зб.наук.праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії», Краматорськ. – 2008.− № 1(11) – С. 56 – 61.– *Дисертант запропонував методику лабораторних досліджень зносостійкості зразків. моделюючу роботу реальних деталей в різних ґрунтах*

3. Волощенко С.М. Комплексные модификаторы, изготавливаемые прокаткой порошковых смесей для железоуглеродистых сплавов / С.М. Волощенко, К.А. Гогаев, А.К. Радченко // Порошковая металлургия. – 2009.– № 1/2 – С. 128 – 133.– *Дисертант провів випробування різних композицій порошкових модифікаторів, які виготовив на прокатному стані.*

4. Волощенко С.М. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну /С.М. Волощенко, В.І. Ульшин, М.Г. Аскеров, М.Д. Бега, С.В. Ульшин // Металознавство та обробка металів. – 2009. − № 4 – С. 25 – 31. *Дисертант проаналізував вплив термічної обробки за різними режимами на структуру дослідних зразків із високоміцного чавуна*

5. Волощенко С.М. Применение высокопрочного бейнитного чугуна для производства сменных деталей грунтообрабатывающей техники отечественного производства/С.М. Волощенко, К.А. Гогаев, А.М. Миропольский, М.Г. Аскеров, В.В. Непомнящий //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія, 2011. Випуск 13 (194) – С. – 131 – 137.– *Дисертантом виконані польові випробування дослідних зразків лемешів.*

6.Voloshchenko S.M Use of Complex Composite Modiffers from Rolled Powder Materrials / S.M. Voloshchenko, K.A.Gogaev, V.V.Neponyashchii, M.G.Askerov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – Januari 2013. – Vol. 51 Nos. 9-10 – P.270 – 276. – *Дисертантом проведені досліди впливу прокатних модифікаторів різних композицій на структуру металу у відливках деталей.*

7. Волощенко С.М. Исследование физико-механических свойств модификаторов для обработки железо-углеродистых сплавов / С.М. Волощенко, Т.В. Мосина, К.А. Гогаев, В.В. Непомнящий, М.Г. Аскеров // Новые огнеупоры. – 2012. – № 7 – С .45 – 48. – *Дисертантом проведені дослідження впливу прокатних модифікаторів на відбіл у структурі високоміцного чавуну в литому стані.*

8. Волощенко С.М. Влияние термической обработки на фазовый состав и свойства высокопрочного чугуна / С.М. Волощенко, В.В. Непомнящий, М.Г.

Аскеров, Т.В. Мосина, Н.Д. Бега // Сталь. Москва. – 2013. – № 8 – С. 64 – 69. – *Дисертантом досліджено фазовий склад високоміцного чавуну в залежності від термообробки.*

9. Gogaev K.A. Process Approaches for Producing Complex Composite Inoculants by Rolling of Powder Mixturres. I. Inoculant Powder Mixtures. Composition. Structure and Properties / K.A.Gogaev, S.M.Voloshcenko, Y.N.Podrezov, A.K.Radchenko, L.A. Radchenko // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – September 2016. – Vol. 55 Nos. 5-6 – P. 270-276. – *Дисертантом запропоновані композиції порошкоихі компонентів для забезпечення отримання кулястого графіту при кристалізації чавуну.*

10.Gogaev K.A. Process Approaches for Producing Complex Composite Inoculants by Rolling of Powder Mixtures. II. Compacting Conditions. Structure and Properties of Two-Component Model Systems Fe-FeSi and Al-FeSi / K.A.Gogaev, S.M.Voloshchenko, Yu.N. Podrezov, A.K. Radchenko, L.A. Radchenko Ya.I.Yevych //Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – November 2016. – Vol. 55, Nos. 7-8 – P. 419-425. − *Дисертантом запропонована спрощена методика вивчення співвідношення пластичної та крихкої складових порошкових модифікаторів на базі двокомпонентних систем Fe-FeSi та Al-FeSi.*

11.Гогаев К.А. Технологические принципы получения композиционных комплексных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. III. Методы получения и свойства многокомпонентных прессовок и прокатных полос из порошковых модификаторов разных составов./ К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // Порошковая металлургия. – 2016. – № 9/10 – С. 3 – 10. – *Дисертантом оптимізовані умови навантаження при пресуванні порошкових модифікаторів для отримання необхідної сирої міцності пресовок.*

12. Гогаев К.А. Влияние остаточного аустенита на механические свойства и характеристики износа бейнитного чугуна с шаровидным графитом. / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов, Н.В. Минаков, Н.М. Марченко // Электронная микроскопия и прочность материалов.– 2016. Выпуск 21 – С. 38 – 50. – *Дисертантом встановлено появу TRIP-ефекту при навантаженні зразків, загартованих при температурі 350$^{o}$С.*

13. Волощенко С.М. Тормозные колодки из высокопрочного чугуна с повышенными фрикционными свойствами. / С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов, К.А. Гогаев // Сб. Современные проблемы физического материаловедения. – 2016. Выпуск № 25 – С 91 − 97. – *Дисертантом досліджено вплив складу модифікаторів та методів їх виготовлення на усадкові дефекти масивних відливок в тому числі гальмівних колодок для моторвагонів і локомотивів.*

14. Волощенко С.М. Деформаційне зміцнення бейнітного чавуну при підвищених температурах. / С.М. Волощенко, Ю.М. Подрезов, В.В. Холявко, Т.О. Іващук // Металознавство та обробка металів. ФТІМС – 2017. – № 1 – С.17 –22. – *Дисертантом виявлено зникнення TRIP-ефекту при підвищенні температури навантаження вище 50$^{o}$С і зменшення зносостійкості зразків бейнітного високоміцного чавуну.*

15. Гогаев К.А. Технология производства деталей из бейнитного чугуна

с шаровидным графитом для почвообрабатывающей сельхозтехники / К.А. Гогаев, Ю.Н. Подрезов, С.М. Волощенко // Сборник научных трудов Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА). – 2017. – № 1 (44) – С. 210 – 216. – *Дисертантом проведені дослідження та випробування широкої гами змінних деталей навісного обладнання сільгосптехніки, працюючих в різних умовах експлуатації.*

16. S.Voloschenko Wear features of Bainitic cast iron used in agricultural machinery / S.Voloschenko, Y. Podrezov, V.Kholyavko, M. Kovalenko // Металознавство та обробка металів. ФТІМС – 2017. – №3 – С.28 – 33. – *Дисертатом запропоновані режими випробувань зразків на зносостійкість, що відповідають реальним умовам роботи виробів. Виконано порівняння отриманих результатів зі зношуванням реальних виробів.*

17. Волощенко С.М. Применение высокопрочного бейнитного чугуна для производства сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники/С.М.Волощенко, Гогаев К.А., Аскеров М.Г., Миропольский А.М.// Вестник НТУ ,Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». − 2017. – №32 – С.14 − 18. – *Дисертантом проведені дослідження зносостійкості зразків бейнітного високоміцного чавуну, загартованих по різним режимам при умовах експлуатації реальних деталей.*

18. Волощенко С.М. Особливості бейнітного високоміцного чавуну з огляду иробництва швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки /С.М.Волощенко, Гогаєв К.О., Аскеров М.Г.,Подрезов Ю.М.// Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2017. – №4(133) – С 81 – 87. – *Дисертантом наведені результати польових випробувань лемішей і лап культиваторів та можливості використання бейнітного високоміцного чавун для широкого спектру виробів сільгосптехніки.*

19. Гогаев К.А. Влияние температури и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна / Подрезов Ю.Н., Волощенко С.М.,Гринкевич К.Є., Ткаченко И.В.,Коваленко М.В.//Проблеми тертя та зношування. − 2017. – № 3(76) − С.42 −51. – *Дисертантом проведено аналіз впливу температури і рівня напруження на зносостійкість зразків бейнітного чавуну, загартованого при температурі 310$^{o}$С та 350$^{o}$С.*

20. Волощенко С.М. Спосіб виготовлення модифікатора / С.М. Волощенко, К.О. Гогаєв, О.К. Радченко, О.І. Шейко, М.Г. Аскеров // Патент України на винахід № 88530, Бюл. № 20 – 2009.

21. ВолощенкоС.М. Спосіб виготовлення робочих органів навісного обладнання сільськогосподарської техніки / С.М. Волощенко, К.О. Гогаєв, О.М. Миропольский, В.В. Хлівний, М.Г. Аскеров // Патент України на винахід № 99797, Бюл. №18 – 2012.

**ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ НА КОНФЕРЕНЦІЯХ:**

22. Волощенко С.М. Формування багатокомпонентних систем важкопресуємих порощків/ С.М. Волощенко, К.О. Гогаєв, О.К. Радченко, М.Г. Аскеров, В.К. Грибков, / Матеріали двадцять шостої міжнародної конференції

та виставки. – 2006. – С. 291 – 292. – *Особистий внесок здобувача: вибір порошкових композицій модифікаторів – Очна участь.*

23. Волощенко С.М. Перспективы использования литых тормозных колодок из высокопрочных чугунов для подвижного состава железнодорожного транспорта / С.М.Волощенко, А.К. Радченко, М.Г. Аскеров //Труды четвертой международной конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» – 2006. – С. 351. –*Особистий внесок здобувача: Проведення експлуатаційних випробувань гальмівних колодок. – Очна участь.*

24. Радченко О.К. Технологічні властивості порошків, їх сумішей та міцності одержаних з них пресовок /К.О. Гогаєв, С.М. Волощенко, М.Г. Аскеров , Д.Г.Вербило , О.С.Коряк , Я.І. Євич //Тези конференції HighMatTech, К. – 2009. – С. 159. – *Особистий внесок здобувача: запропоновано частково замінити ФС-75 алюмінієм .– Очна участь*

25. Волощенко С.М. Повышение ресурса эксплуатации лемехов при пахотных работах за счет использования высокопрочного бейнитного чугуна / С.М.Волощенко, К.О.Гогаєв, М.Г.Аскеров //Матеріали міжнародної конференції Sixth International Conference «Materials and Coatings for Extreme Performances». – 2010. – С.338. – *Особистий внесок дисертанта: участь в проведенні польових випробуваннях деталей із бейнітного високоміцного чавуну та вибір конструктивних змін. – Очна участь.*

26. Волощенко С.М. Исследование физико-механических свойств модификаторов. Используемых для обработки железо-углеродистых сплавов / С.М.Волощенко, Т.В.Мосина, К.А.Гогаєв, В.В.Непомнящий, М.Г.Аскеров //Ежегодная международная конференция огнеупорщиков и металлургов М. – 2012. – С. 60. – *Дисертант встановив склад порошкових сумішей та оптимізував співвідношення пластичних та крихких складових для забезпечення необхідних властивостей матеріалу в литому стані при їх використанні .– Очна участь.*

27 Волощенко С.М. Сменные детали для почвообрабатывающей сельхозтехники из бейнитного высокопрочного чугуна /С.М.Волощенко, К.А. Гогаев, М.Г. Аскеров // Труды 5-1 международной конференции HighMatTech, К. – 2015 – С.91. –*Дисертант забезпечив проведення польових випробувань в різних регіонах України литих деталей із високоміцного бейнітного чавуну та провів оцінку їх результатів. – Очна участь.*

**ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:**

28. Волощенко М.В. Композиційний комплексний модифікатор /М.В. Волощенко, С.М. Волощенко, А.П. Пшенний // Деклараційний патент України № 40039А. – 2001. – Бюл. № 6. – *Дисертантом встановлено оптимальний склад модифікатора, який забезпечує мінімальний рівень усадкових дефектів.*

29. Волощенко М.В. Чавун для гальмівних колодок для локомотивів та вагонів/ М.В. Волощенко, С.М. Волощенко, А.П. Пшенний // Деклараційний патент України № 40045 А. – 2001. – Бюл. № 6. – *Дисертантом запропоновано склад феритного високоміцного чавуну з великім вмістом кремнію. Який забезпечує підвищення зносостійкості гальмівних колодок більше ніж в 2 рази при швидкості до 100 км/год без викидів газу фосфіну.*

30. Антонець С.С. Робочий орган культиватора / С.С. Антонець, С.М. Волощенко, К.О. Гогаєв, О.М. Миропольский, Г.М. Резинка, Г.І. Семчук // Патент України № 97146 на корисну модель. – 2015. – Бюл. №12. – *Дисертантом запропоновано ввести пласку поверхню в нижній поверхні лапи культиватора що забезпечує підрізання кореневої системи бур'яну і тим самим дає можливість не використовувати гербициди.*

31. Антонець С.С. Робочий орган культиватора /С.С. Антонець, С.М.Волощенко, К.О. Гогаєв, О.М. Миропольский, Г.М. Резинка, Г.І. Семчук // Патент України № 99964 –. Бюл. № 14 05.06.15. .– *Дисертантом запропоновано зменшити площину поверхні пласкої частини, ширину якої повинна складати не більш 10 мм. Це дало можливість забезпечити само загострення леза крил лап культиватора.*

32. Гогаєв К.О. Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей сільгосптехніки / К.О. Гогаєв, С.М. Волощенко // Вісник Національної академії наук України № 9 – 2015. – С. 64 – 68. – *Дисертантом розглянуті загальні результати експлуатаційних випробувань деталей ґрунтообробної сільгосптехніки у різних регонах України.*

33. Гогаев К.А. Особенности термообработки литых деталей навесного оборудования для сельхозтехники / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко // в Сб. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. ІЄС ім. Є.О. Патона. Київ. – 2012. – С. 464 – 467. – *Дисертантом проведено польові випробування лап культиваторів та плоскорізів. Дослідні деталі були виконанні із внесеними змінами в конструкцію з урахуванням потреб сільгоспвиробників.*

34. Волощенко С.М. Использование метода прокатки для производства комплексних композиционных модификаторов / С.М. Волощенко, К.А. Гогаев, А.К. Радченко, М.А. Аскеров, Я.И. Евич // Процессы лиття. – 2007.− № 5 . – С. 41 – 44. – *Дисертантом проведені досліди прокатки порошкових сумішей на стані з діаметром валков 200мм та виявлено необхідний рівень тиску для отримання необхідної сирої міцності.*

35. ВолощенкоС.М. Бейнітний високоміцний чавун для ґрунтообробної техніки.// Агроперспектива. № 7 – 2006.– С. 50 – 51. – *Дисертантом проведені перші досліди по виявленню можливості використання високоміцного чавуну для виготовлення лемішей стандартних плугів виробництва України.*

36. Волощенко М.В. Тормозные колодки / М.В. Волощенко, С.М. Волощенко, А.П. Пшенный // Металл. – 2001. – № 10 – С. 30 – 31. – *Дисертантом проаналізовано вплив складу чавуну з високим та низьким вмістом фосфору при різній концентрації кремнію на гальмівні характеристики гальмівних колодок мотторвагонного рухомого складу.*

37. Волощенко С.М. Возможности и перспективы использования литых лемехов из высокопрочного бейнитного чугуна / С.М. Волощенко, А.И. Шейко, В.Ф. Ващенко, М.Д Топчев // Изобретатель и рационализатор. – 2006. – № 1– С. 18 – 24. – *Дисертантом наведені перші попередні результати випробувань литих лемешів з бейнітного високоміцного чавуну в порівнянні з серійними сталевими та литими після гартування в масло з відпуском.*

38. Подрезов Ю.М. Механічні властивості бейнітного чавуну при підвищених температурах / Подрезов Ю.М., Гогаєв К.О. , Коряк О.С., Вербило Д.Г, Волощенко С.М., Холявко В.В.// Электронная микроскопия и прочность материалов. вып. 21. – 2016. – С. 91 – 101. – *дисертантом запропоновано температурні режими випробувань за результатами польових випробувань*

## АНОТАЦІЯ

Волощенко С.М. СТВОРЕННЯ НАУКОВИХ ЗАСАД СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ВИСОКОМІЦНОМУ ЧАВУНІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗМІННИХ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬГОСПТЕХНІКИ ТА ТРАНСПОРТУ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01–матеріалознавство. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича Національної академії наук України, Київ, 2018.

В роботі запропоновані науково-технологічні принципи формування структури і механічних характеристик бейнітних високоміцних чавунів в залежності від легування, модифікування та термочасових режимів термообробки. Був визначений вплив залишкового аустеніту на триботехнічні характеристики змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки при експлуатації в ґрунтах різного типу та різних швидкостях роботи. Встановлено граничні умови появи TRIP-ефекту в бейнітних високоміцних чавунах під час перетворення залишкового аустеніту на мартенсит в залежності від силових навантажень та температури гартування. Поява TRIP-ефекту різко збільшує швидкість зміцнення і, як наслідок, службові характеристики змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. Розроблено технологію виготовлення комплексних композитних модифікаторів прокатуванням на валках великого діаметру, яка забезпечує точний хімічний склад модифікатора та безвідходність процесу. Встановлені необхідні співвідношення пластичних та крихких компонентів модифікатора, які забезпечують необхідну сиру міцність виробу. Наведені результати польових випробувань литих деталей ґрунтообробної сільгосптехніки різних конструктивних варіантів в порівнянні з серійними стальними. Доведено зростання ресурсу експлуатації змінних деталей з високоміцного бейнітного чавуну в 3 – 7 разів в порівнянні з серійними стальними вітчизняного виробництва і 1,5 – 3 рази в порівнянні з зарубіжними зразками.

Оптимізовані технологічні умови виготовлення гальмівних колодок рухомого складу залізничного транспорту з високоміцного чавуну без усадкових дефектів з високими ресурсом і гальмівними характеристиками. Наведено результати стендових та натурних випробувань гальмівних колодок з

спеціального високоміцного чавуну в залежності від швидкості та гальмівних зусиль.

*Ключові слова:* високоміцний чавун, модифікатор, термічна обробка, ізотермічне гартування, залишковий аустеніт, прокатка.

## АННОТАЦИЯ

Волощенко С.М. СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ПРИНЦИПОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ И ТРАНСПОРТА. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Киев. 2018.

В работе предложены научно-технологические принципы формирования структуры и механических характеристик бейнитных высокопрочных чугунов в зависимости от легирования, модифицирования и термовременных режимов термообработки. Определено влияние остаточного аустенита на триботехнические характеристики сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники при эксплуатации в грунтах разного типа при различных скоростях работы. Установлены граничные условия появления TRIP-ефекта в бейнитных высокопрочных чугунах при превращении остаточного аустенита в мартенсит в зависимости от силових нагрузок и температуры закалки. Появление TRIP-ефекта резко увеличивает скорость упрочнения и, как следствие, служебные характеристики сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники. Разработана технология изготовления комплексних модификаторов композиционных прокатыванием на валках большого диаметра, которая обеспечивает получение точного химического состава модификатора и безотходность процесса. Установлены необходимые соотношения пластических и хрупких компонентов, обеспечивающих необходимую сырую прочность изделия. Приведены результаты полевых испытаний литых деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники разных конструктивных вариантов в сравнении с серийными стальными. Доказано возрастание ресурса эксплуатации сменных деталей из высокопрочного бейнитного чугуна в 3 – 7 раз в сравнении с серийными стальными отечественного производства и в 1,5 – 3 раза в сравнении с зарубежными образцами.

Оптимизированы технологические условия изготовления тормозных колодок подвижного состава железнодорожного транспорта из высокопрочного чугуна без усадочных дефектов с высоким ресурсом и тормозными характеристиками. Приведены результаты стендовых и натурных испытаний тормозных колодок из специального высокопрочного чугуна в зависимости от скорости и тормозных усилий.

*Ключевые слова:* высокопрочный чугун, модификатор, термическая обработка, изотермическая закалка, остаточный аустенит, прокатка

## ANNOTATION

Creation of Scientific Foundations of Structure-Formation in High-Resistant Pig-Iron for Increasing Endurance and Durability of Replaceable Parts for Agricultural Equipment and Transport. – Manuscript. Doctoral Theses for Scientific Degree of Doctor of Sciences. Speciality 150201 – Material Science. Institute of Problems of Material Science of I.N.Frantsevitch
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The work offers scientific technological principles of formation of structure and mechanical characteristics of Beinit high-resistant pig-iron depending on alloyage and modification and thermo- temporal regimes of processing. The influence of left-over austenite upon tribotechnical characteristics of replaceable parts of soil-processing agricultural machines when working in various soils with different speeds of soil processing has been defined. Marginal conditions of TRIP-effect appearing in Beinit high-resistant pig- iron under the transformation of left-over austenite into martensite depending on working load and quenching temperature have been scientifically and practically specified. TRIP – effect radically increases hardening speed and as a consequence – working characteristics of replaceable parts of soil processing agricultural machines. There has been worked – out and offered the technology of manufacturing of complex compositioned modifiers by the way of ralling on large diameter rallers. This technology makes sure (guarantees) getting accurate chemical composition of modifier and waste-free process. There have also been defined ductile and fragile components ratios which ensure necessary raw resistance of a product. There have been presented the results of field tests of casted parts of soil processing agricultural machines of different constructions in comparison with serial steel parts. There has also been proved 3 – 7 times increase of life-time of exploitation of replaceable parts made of Beinit high- resistant pig iron in comparison with serial ones home-made of steel, and 1,5 – 3 times longer life-time in comparison with imported analogical parts.

Technological conditions for manufacturing break-shoes made of high resistant pig iron without shrinkage with high life-time resource and breaking characteristics for rail transport have been optimized. The results of stand and full-scale tests of break-shoes made of special high-resistant pig iron depending on velocity and breaking efforts have been presented.

*Key words:* high-resistant pig-iron, modifier, thermo-processing, isothermal hardening, remaining austenite, rolling.

Підписано до друку 2018р. Формат 60х90 1/16
Папір офсетний. Умовн. Др. арк. 1,6
Тираж 100 прим.