

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Сайчук Олександр Васильович



УКД 621.791/792

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ І ВЛАСТИВОСТЯМИ
ЧАВУНІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ

Спеціальність 05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

Лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор,
Скобло Тамара Семенівна,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства ім. Петра
Василенка, професор кафедри «Технологічні
системи ремонтного виробництва».

Офіційні опоненти:

Лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор,
Міщенко Валерій Григорович,
Запорізький національний університет,
завідувач кафедри прикладної фізики і
наноматеріалів.

Лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор,
Санін Анатолій Федорович,
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара,
завідувач кафедри технології виробництва.

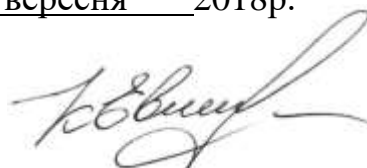
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Черновол Михайло Іванович,
ректор Центральноукраїнського національного
технічного університету.

Захист відбудеться « 16 » листопада 2018р. о 10.⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розіслано « 24 » вересня 2018р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

 С.І. Калінін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективність роботи сучасної техніки машинобудування не можлива без забезпечення стабільно високого рівня її виробництва. Крім того, в останні роки суттєво зросла вартість енергоресурсів та витрати при виробництві виливків з чавунів. Відомо, що якість таких виробів суттєво залежить від вихідної шихти, її спадкоємності, засмічення різними домішками, неметалевими включеннями, зміною хімічного складу.

У машинобудуванні важливе місце займає використання виливків з чавунів які мають тонкі стінки. Це корпусні деталі з сірих і високоміцних чавунів з пластинчастим та кулястим графітом. Їх якість при виробництві в ряді випадків не задовольняє вимогам нормативно-технічної документації (НТД). Це, в першу чергу, формування нестабільних характеристик як в різних виливках, так і в окремих її зонах, що відрізняються за товщиною. Експлуатаційні характеристики, як правило, формуються в залежності від конструктивних особливостей виливків, структури, швидкості кристалізації металу при виробництві.

У представленій роботі для вивчення впливу на структуроутворення обрані об'єкти, у яких зміни суттєво визначаються швидкістю кристалізації при використанні різнотовщинної форми для лиття відцентровим методом – це втулки циліндрів, а також із однаковим тепловідведенням, але з різнотовщинними стінками – корпусні деталі з сірого чавуну.

Незважаючи на однакове завдання одержання однорідних властивостей по висоті та перетину виливків, яке поставлене виробниками підприємств Бериславським машинобудівним заводом та ВАТ «ХТЗ», вирішити його неможливо одним методом. Потрібен спеціальний підхід, який забезпечить ефективність отримання якісних виливків різних типів чавунів, методів їх відновлення в процесі конкретного виробництва.

У зв'язку з цим, для всебічного аналізу обрані виливки, які мають різну форму графіту та його долю, що дозволить оцінити не тільки вплив цієї структури, а й фазовий склад чавуну на властивості, якість та структуру на співвідношення у таких високовуглецевих сплавах.

Тому робота, яка спрямована на пошук інноваційних, ефективних, менш витратних технологій виробництва таких корпусних деталей з чавунів з формуванням найбільш однорідної структури та відновленням їх пошкоджуваності з розробкою параметрів неруйнівного контролю якості, може бути віднесена до важливих та актуальних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до Держбюджетної тематики ХНТУСГ імені Петра Василенка, договорів про співпрацю з підприємствами, згідно діючих програм: «Теоретичне та експериментальне обґрунтування нових технологій виробництва та відновлення деталей з використанням зміцнення модифікуванням» (ДР 0116U005802) у період 2015-2018 р.р.; «Дослідження, наукове обґрунтування та впровадження конкурентоспроможних ресурсозберігаючих технологій, способів реновації, нових матеріалів і технологічних засобів для інноваційного розвитку агропромислового комплексу» (ДР 0109U000362) у період 2009-2013 р.р.;

«Отримання і застосування детонаційної шихти для підвищення експлуатаційної стійкості деталей» (ДР 0117U004157) у період 2014-2017 р.р.

Мета дослідження: теоретичне та технологічне обґрунтування створення нових підходів до керування структуроутворенням і властивостями виливків з чавунів при використанні ефективних та менш витратних процесів у виробництві.

Завдання дослідження:

– провести статистичний аналіз якості виробів та особливостей структуроутворення деталей на промислових підприємствах і встановити їх відповідність вимогам нормативно-технічної документації, згідно хімічного складу, рівня механічних властивостей та співвідношення фазових складових;

– запропонувати методи і розробити бракувальні норми якості виливків при використанні неруйнівного магнітного методу контролю (за коерцитивною силою), оцінити показники зміни з урахуванням найбільш впливових факторів – хімічного та фазового складу, долі та форми графіту, формуємих напружень і дефектів;

– теоретично оцінити умови кристалізації виливків у формі і на цій основі запропонувати нову технологію її підготовки до використання та одержання якісних виробів, які забезпечать діючі НТД, а також механічні властивості та фазовий склад чавуну;

– експериментально оцінити різні способи відновлення дефектів наплавленням з введенням модифікуючих нано- та дисперсних домішок, алмазів з вторинної сировини для забезпечення формування однорідної структури з міцним зчепленням такого покриття з основою;

– теоретично оцінити особливості структуроутворення при відновленні дефектів та на основі таких досліджень запропонувати новий технологічний процес;

– провести зіставні дослідження з визначення ступеню значимості використання розроблених інноваційних технологій;

– розробити НТД на виробництво нових технологічних процесів відновлення корпусних деталей, оцінити їх економічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процес підвищення якості корегуванням структуроутворення та умовами кристалізації і модифікування різнотовщинних виливків з чавунів при їх відновленні заваркою дефектів.

Предмет дослідження: теоретичні та технологічні основи керування структурою і властивостями чавунів різного функціонального призначення.

Методи досліджень. При проведенні досліджень використовували теоретичне та експериментальне моделювання процесів кристалізації виливків з високоміцного чавуну для пошуку найбільш ефективних умов формування однорідної структури, а також оцінювали напружений стан та структуроутворення у різнотовщинних виливках з сірих чавунів з модифікуванням вторинною сировиною. Одночасно використовували комплексну оцінку якості металу різними методами: металографічним, електронікроскопічним, мікрорентгеноспектральним, рівнем твердості, міцності, пластичності, неруйнівним контролем (згідно коерцитивної сили), хімічним та локальним спектральним аналізами. Удосконалено підходи до порівняльних оцінок структуроутворення, згідно різних зон при відновленні (наплавлення, перехідної, основи), оптико-математичним методом.

Методом оптико-математичних досліджень оцінювали зміни структури і напружень в локальних зонах та по всій фотографії, що дозволило виявити локальні зміни і процеси – у цілому.

Використовували нові підходи зі створенням спеціальних програм розрахунків та комплексних оцінюючих параметрів. Досліджували різні комірки пікселів від 2×2 зі скануванням до 50×50 .

Локальні структурні зміни та напруження оцінювали оптико-математичним методом, згідно щільності локальних зон з використанням енергетичних параметрів – міцності дисипації енергії, що характеризує зв'язок дивергенції та лапласіану, відповідно до координат точок металографічних зображень.

Щоб надійно контролювати якість виливків у виробництві із чавуну, їх стан у період експлуатації, а також змінювати параметри технологічного процесу не достатнім є відбір спеціальних проб для оцінки хімічного складу, структури та властивостей. Найбільш ефективним для контролю якості кожного виробу в потоці виробництва є неруйнівний метод. Ця проблема в роботі вирішена статистичним аналізом такої оцінки та на її основі стало можливим запропонувати додаткові внесення для удосконалювання технологічного процесу виробництва. Виконання таких досліджень проводили на підприємствах ВАТ «ХТЗ» (виробляє для використання в сільгоспмашинобудуванні корпусні деталі) і на Бериславському машинобудівному заводі (виробляє і постачає втулки гільз циліндрів дизельних двигунів).

Наукова новизна.

Вперше:

– одержано зв'язок структуроутворення з показниками неруйнівного контролю якості у виробках з високоміцного чавуну, що дозволило встановлювати кількість формування при кристалізації карбідів та ледебуриду, на основі цього рекомендовано проводити корегування технологічного процесу швидкості охолодження рідкого розчину;

– для зменшення напруженого стану та схильності до формування карбідної фази виконані теоретичні дослідження по пошуку способу однорідної швидкості кристалізації втулок гільз циліндрів, відливаємих відцентровим методом у різнотовщинну металеву форму, і розрахунками показано, що це може бути досягнуто лише при індивідуальному її нагріванні струмом промислової частоти (СПЧ);

– на основі теоретичних розрахунків розроблено технологію циклічного нагрівання різнотовщинної металевої форми перед заливанням рідкого чавуну у відцентрову машину для лиття, що забезпечило однорідну структуру кристалізації втулки гільзи циліндра за її висотою та мінімізацію напружень, виключення формування карбідів та ледебуриду;

– для відновлення зон у корпусних деталях з сірого чавуну, які пошкоджені дефектами типу порожнин, неслітін, тріщин розроблена інноваційна технологія їх заварювання сталевим електродом з модифікуванням спеціально підготовленою детонаційною вторинною сировиною, що включає нано- та дисперсні алмази і це забезпечило якісне формування хвилястого з'єднання покриття з основою, мінімальну зону термічного впливу, відсутність дефектів за рахунок зниження температури рідкої ванни та зміну фазових складових;

– теоретичними та експериментальними дослідженнями, моделюванням змін під локальними напруженнями виявлені процеси, які відбуваються у зонах виливків зі змінною товщиною стінки і це супроводжується підвищенням локальної щільності дислокаційної структури, дифузійними процесами, утворенням порожнин у графітових включеннях, що заповнюються киснем та підривають їх, зі створенням дефектів.

Отримав подальший розвиток теоретично обґрунтований спосіб введення модифікуючої домішки вторинної сировини від утилізації спеціального набору боєприпасів, який забезпечує значний зв'язок фазових складових, що формуються у відновленому покритті з основним металом корпусу, і це разом з мікроохолоджувачами (включеннями нано- та дисперсних алмазів) сприяє зміні умов кристалізації з ламінарного на турбулентне.

Удосконалено:

– на основі комплексних статистичних, експериментальних досліджень якості втулок гільз циліндрів встановлені найбільш вагомі впливові чинники – хімічний та фазовий склад на дефектоутворення, напружений стан і це використовували для розробки бракувальних норм неруйнівним методом якості за їх перетином, висотою в різних зонах;

– на основі комплексних досліджень встановлено, що в корпусних деталях, виготовлених з сірого чавуну, найбільша пошкоджуваність дефектами та ступенем неоднорідності структури характеризується їх внутрішня робоча поверхня та для виявлення яких розробили бракувальні норми, згідно вимірів неруйнівним магнітним методом за коерцитивною силою, а також з урахуванням еволюційних змін дислокаційної структури.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розроблених комплексних наукових підходів, експериментальних та теоретичних досліджень, встановлених закономірностей створені нові параметри технологічних процесів для забезпечення підвищеної якості та експлуатаційних властивостей важливих деталей машинобудування з супроводженням контролю їх якості неруйнівним магнітним методом. Розробки захищені 6 патентами України та виконувались на Бериславському машинобудівному заводі та ВАТ «ХТЗ» де для використання інноваційних технологій розроблені і затверджені на їх базі спеціальні технічні умови, які складаються з послідовних операцій від оцінки якості неруйнівним методом і проведення заварювання дефектів. Економічний ефект від впровадження розробок у виробництві та заварки дефектів лиття в корпусах роздавальної коробки за даними виробника складає 746999 грн. на рік. Очікуваний додатковий економічний ефект від впровадження нових технологій відновлення корпусів роздавальної коробки додатково складе 76558,8 грн. на рік. Розробки, які виконані в дисертаційній роботі, використовуються і в учбовому процесі: лекційних курсах для магістрів за напрямом «механічна інженерія» (курси «Матеріалознавство», «Ремонт машин», «Нанотехнології та методологія наукових досліджень»).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, які одержані в роботі, отримані автором самостійно. У наукових публікаціях та співавторстві особистий внесок здобувача складає від 40 до 100%, що включає теоретичні,

експериментальні дослідження, промислові випробування та впровадження.

Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, одержано самостійно та викладені у роботах [1-40]. У наукових дослідженнях, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать такі результати: статистична та математична обробка експериментальних даних, аналіз структуроутворення, виявлення нових фаз [8, 9, 11, 13, 18, 21, 30, 31, 33, 35]; обґрунтування нових параметрів та технологій виробництва, на яких базуються якісні показники властивостей [3, 12, 17, 20, 25, 27-29, 32, 34]; розробки по неруйнівному контролю формуючих фазових складових у чавунах різного функціонального призначення [2, 10, 37]; які є відповідальними за відхилення в структуроутворенні, появі локальних напружень та порушеннях суцільності виливків [4, 15]; теоретичні та експериментальні дослідження по встановленню факторів які забезпечують зміну характеру умов кристалізації з використанням модифікуючих домішок [5-7, 14, 16, 19, 26, 36]. У отриманих патентах запропоновані параметри нових технологічних процесів, методи оцінки якості виробів та технологія модифікування рідкого розчину при відновленні виробів з чавунів вторинною сировиною [22-24, 38-40]. У монографії приймав участь у підготовці результатів, які стосуються технологічних підходів до відновлення та зміцнення покриттями [1].

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-технічних конференціях у період 2010-2018р.р.: «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві» (2010-2018р.р. Харків: ХНТУСГ); Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе» (г. Харьков, 20-23 октября, 2014); 9-th International conference of young scientists on welding and related technologies Proceedings (Kyiv, Ukraine, 23-26 May 2017); восемнадцатая международная научно-производственная конференция «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT-технологий» (БелГСХА им. В.Я. Горина, 26-27 мая, 2014); XII Всеукраїнська науково-практична конференція аспірантів, докторантів та молодих науковців «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кропивницький, 18-20 квітня, ЦНТУ, 2018); Проблеми математичного моделювання: Всеукраїнська науково-методична конференція (ДДТУ. м. Кам'янське, 23-25 травня, 2018).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 40 наукових працях, у тому числі: 1 монографія «Технологія локального легірування при відновленні деталей»; 16 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 2 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз, а саме SCOPUS); 6 публікацій у закордонних виданнях; 11 в інших наукових виданнях України; розробки захищені 6 патентами України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 336 сторінок, у тому числі 6 додатків на 76 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 259 сторінок, 90 рисунків, 57 таблиць. Список використаних джерел нараховує 235 найменувань на 24 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені основні отримані автором результати, визначені практична їх значимість і новизна.

У **першому розділі** «Технології виробництва деталей з чавунів у сільськогосподарському машинобудуванні і умови їх експлуатації» виконано аналіз літературних джерел, стандартів і патентів по використанню чавунів для виготовлення корпусних деталей різного призначення з формою графіту, що відрізняється: кулястою, вермикулярною і пластинчастою. Встановлено, що для забезпечення необхідних властивостей чавуни піддають позапічній обробці модифікуванням сфероїдизуючими, інокулюючими та графітизуючими домішками з різним способом їх введення. Показана ефективність використання модифікаторів нового покоління Supersid і Riesid. Ці домішки містять стронцій, що дозволяє запобігати процесу демодифікації чавуну при тривалій витримці рідкого розчину в ковші в умовах процесу потокового виробництва. Розглянуті умови, за якими надійно усувається відбіл виливків. Для цього використовують вторинне модифікування феросиліцієм ФС75. Обробку чавуну сфероїдизуючими магнійвмісними домішками, які виконують у спеціальних барабанних ковшах. Метод простий і має ряд переваг, однак в ряді випадків не дозволяє якісно видаляти залишки шлаків і досягати однорідного та достатнього засвоєння магнію.

Аналізом встановлено, що особливо високі і стабільні фізико-механічні властивості досягаються у виливках зі ЧКГ при використанні дуплекс-процесу з введенням 15% чушкових рафінованих чавунів і вторинних шихтових матеріалів при заливанні металу в оболонкові форми та на автоматичній лінії імпульсного формування. Однак, ця технологія прийнята для деталей невеликих розмірів.

При виготовленні виливків з високоміцних чавунів запропоновані різні за складом сплави, які спрямовані на одержання, залежно від їхньої маси і товщини стінок, високих механічних властивостей. Пошкоджуваність деталей з високоміцного чавуну при експлуатації визначається ступенем впливу підвищених температур, деформаціями і напруженнями, розвитком процесів корозії та інш.

Корпусні деталі із сірого чавуну є базовими виробами у машинобудуванні. На них монтують складальні одиниці. Розглянуті їх різні конструкції і форми: коробчасті, складної просторової, з напрямними, типу кронштейнів, кришок, косинців та інш. Узагальнені вимоги до якості і способу виробництва, які визначають їх надійну роботу та відносно низьку собівартість. Такі деталі працюють в умовах впливу навантажень, у тому числі ударних, вібраційних, корозійних, кавітаційних. Основними видами їх пошкоджуваності при експлуатації є тріщини, відколи, викришування, задири, обломи шпильок, зрізи і зминання з'єднань, а також руйнування посадкових місць отворів. Основними дефектами пошкоджуваності при виробництві є тріщини, порожниноутворення, невідповідність структури вимогам (за фазовим складом, графіту і неметалевими включеннями).

Розглянуті методи відновлення дефектів у період усього життєвого циклу корпусних виробів: нарізних сполучень, поверхневих тріщин, корозійної пошкоджуваності, а також видаленням різних відкладень, зняттям напружень та інш.

Такі дефекти усувають при технічному обслуговуванні і ремонті техніки з використанням різних технологічних процесів (спеціальним промиванням, заваркою, термообробкою, пластичним деформуванням і додатковим зміцненням), наплавленням.

Виконано аналіз застосовування сірих чавунів для виготовлення корпусних деталей у сільгоспмашинобудуванні.

Розглянуто вплив експлуатаційних факторів на механічні властивості сірого чавуну. Аналізуються можливі зміни властивостей при експлуатації таких деталей в умовах стиснення, крутіння, розтягання, вигину.

Узагальнена інформація і по номенклатурі виготовлення деталей із сірого чавуну. Це корпусні деталі, блоки циліндрів, головка і гільзи циліндрів, гальмівні диски та інш.

Наведена інформація про вимоги до якості чавунів, їх хімічного складу і структури.

Розглянуті міжнародні стандарти провідних країн світу по виробництву чавуну: США, Німеччини, Франції, Великої Британії і Японії. На відмінність від вітчизняних в них містяться додаткові вимоги до рівня пластичності (тільки для високоміцних чавунів) і її показників при певних температурах випробувань для різних марок. У стандартах Великої Британії і Японії регламентуються механічні властивості: σ_b , $\sigma_{0,2}$ і δ . У стандартах США та Німеччини, контрольованими є тільки межа значень твердості. Стандарти Японії розглядають усі типи чавунів, у тому числі, і після різних видів термообробки. В розглянутих стандартах відсутня інформація про використання методів неруйнівного контролю якості.

Узагальнена інформація за типами формування дефектів, що утворюються при відливанні та експлуатації деталей. При виробництві виливків частіше всього мають місце: пригар (оксидні та силікатні фази, які міцно зчеплені з поверхнею); приливи (різні стовщення тіла виливка); дефекти литої поверхні (обумовлені частковим руйнуванням форм та стержнів); тріщини (формується за рахунок різних відхилень у технологічному процесі); газові порожнини; відхилення у хімічному складі та структуроутворенні, відносно конкретно діючої нормативно-технічної документації. Основними дефектами при експлуатації виливків з сірих чавунів є: зношування контактних деталей; утворення мікротріщин, короблення, формування порожнин, нагар, а також зміна структурного стану, задири та деградація металу, які можуть спричинити аварійний стан.

Разом з таким аналізом, слід відмітити, що формування дефектів у виливках суттєво залежать і від вихідної шихти, яка використовується, її засміченості неметалевими включеннями, що не розчиняються при температурах виробництва сірих чавунів, наявністю різних домішок, а також технологічних параметрів, пов'язаних з процесами виробництва, в першу чергу, зі швидкістю кристалізації деталі. Тому при дослідженнях важливим є встановити вплив кожного чинника, що суттєво може впливати на якість продукції та її надійність, роботоздатність у експлуатації.

Узагальнена інформація про виробництво, пропонованим НТД вимогам до якості гільз циліндрів з високоміцного чавуну. Аналізуються технологічні параметри виробництва як з використанням відцентрового способу їх лиття, так і у піщано-

глинисті форми, а також аналізуються дефекти, що формуються. При відцентровому литті використовують різновисинну металеву форму, яка сприяє нерівномірній швидкості кристалізації вилівка, що призводить до одержання неоднорідної структури по висоті гільзи з локалізацією деформацій в окремих зонах.

Попередньо дисертантом проведені дослідження різних підходів з використанням методів зміцнення та відновлення деталей, які можуть бути використані в розробках. Це зміцнення та відновлення ТПЧ, лазерним промінням, газотермічним напиленням, зварюванням, використанням плазово-порошкової технології, а також – комбінованих засобів. Такий підхід є важливим пошуком технологічних проблем по забезпеченню однорідної структури і властивостей для вирішення у відмінних перерізах таких деталей. Одночасно для підвищення довговічності доцільно розробити і стабільну технологію відновлення таких корпусних деталей, які схильні до тріщеноутворення та інших дефектів при виробництві та експлуатації. На основі проведеного аналізу літературних джерел і патентів, попередніх досліджень сформульовані мета та завдання нових, найбільш ефективних розробок.

Другий розділ «Матеріали, методики та методологія досліджень» розглядає підходи для виконання поставленої мети. Розроблена методологія послідовності виконання різних етапів досліджень (рис.1). На основі аналізу вітчизняних і закордонних публікацій визначені основні напрями розробок. Вивчені чинники відмов корпусних деталей при експлуатації, а також оцінена якість при їх виробництві в умовах промислових підприємств. Враховували виявлені чинники відмов при аналізуванні різних технологічних процесів їх усунення.



Рисунок 1 – Напрями досліджень, які використовували для підвищення якості виливків та розробки нових технологій

Теоретично обґрунтовуються методи і нові технологічні процеси виробництва корпусних деталей. Дослідження супроводжуються використанням неруйнівного магнітного методу контролю якості на основі розробки бракувальних норм для конкретних за формою та матеріалами виливків.

При проведенні досліджень контролювали деталі виробництва ВАТ «ХТЗ» (рис. 2) і Бериславського машинобудівного заводу, виготовлені із сірих і високоміцних чавунів, відповідно діючій нормативно-технічній документації на цю продукцію.

Використовували статистичну обробку одержаних експериментальних показників властивостей, структури, які відповідають та мають відхилення від нормативно-технічної документації, що повинна гарантувати якість виливків. Однак, дослідженнями встановлена їх невідповідність цим вимогам. Тому в роботі вивчали вплив основних чинників на показники формуємої структури та показники якості. Це такі впливові показники як хімічний склад, конструктивні особливості виливків, швидкість та однорідність їх кристалізації, засміченість неметалевими включеннями, зміна фазового складу у різних зонах, форма виділення та доля графіту і різних фаз, які можуть вносити зміну в експлуатаційну стійкість виробів, їх пошкодженість дефектами.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд корпусних деталей із сірого чавуну

У дослідженнях використовували сучасні методи аналізу: хімічний, металографічний, електрономікроскопічний (мікроскоп YSM-820 Link «YEOL»), локальний рентгеноспектральний, а також емісійну мікроскопію, визначення механічних властивостей (міцності, пластичності, твердості, мікротвердості). Використовували методи статистичної обробки експериментальних даних і планування експерименту.

Теоретичні дослідження включали пошук оптимального технологічного процесу, при якому використання різнотовщинної металевої форми відцентрової машини для одержання втулок гільз циліндрів дозволяє забезпечити рівномірні умови кристалізації виливка по його перетину та висоті.

Для розробки якісного технологічного процесу відновлення дефектів методом їх заварювання теоретично обґрунтовано метод модифікування рідкої ванни вторинною сировиною – детонаційною шихтою, отриманою при утилізації певних боєприпасів, у яких вийшов термін зберігання. Таку шихту спеціально підготовлювали і розподіляли за фракціями, використовуючи немагнітну складову,

яка включала нано- і дисперсні алмази, графіт та оксиди міді та заліза (3,37-3,43% C; до 3,14% Cu і решта Fe).

В роботі використано обґрунтований метод неруйнівного контролю якості та новий підхід до вимірювань виливків на базі діючих стандартів виробництва високоміцного та сірого чавунів, що дозволило, згідно розробки бракувальних норм, визначати відхилення від нормативно-технічної документації. Такі відхилення стосувалися структури металу (фазового складу, форми та долі графіту), формуванню різних типів дефектів та виявлення у зонах виливків з наявністю і значеним рівнем напружень. Оцінку якості проводили з використанням магнітного аналізатора КРМ-Ц-К2М з різним розмірів магнітних перетворювачів та це використовували для подальшої розробки новітніх, екологічних та менш витратних технологічних процесів виробництва.

Для оцінки структуроутворення при відновленні деталей з сірого чавуну наплавленням з використанням модифікуючої домішки використовували оптико-математичний аналіз мікро- та електронних фотографій структур та новий підхід до оцінювання якісного, кількісного фазового складу, а також взаємозв'язок різних фаз в зонах наплавлення і перехідної з основою, що впливало на міцність зчеплення, зменшувало напружений стан та практичну відсутність дефектів. Такі теоретичні дослідження дозволили підтвердити ефективність розробок та виявити основні технологічні параметри при виробництві, які слід корегувати. Контроль якості виливків, а також кілець, відібраних від них, зони відновлення деталей здійснювали неруйнівним магнітним методом за показниками коерцитивної сили. Одночасно методику оптико-математичного аналізу використовували для оцінювання впливу грубих графітових та кисневих включень на створення напружених зон навколо їх формування, згідно локалізації (щільності) скупчень дислокацій. Для цього теоретичними розрахунками оцінювали їх зміну з використанням енергетичного параметру – міцності дисипації енергії, який описує взаємодію при скануванні різних комірок пікселів, а також дивергенцію та лапласіан у кожній точці металографічного зображення.

Для виявлення максимального зв'язку кольорів між різними зонами наплавлення та перехідної досліджували комірки $C(x,y)$ пікселів (2×2 , 3×3 , 10×10 та інші). Такі дослідження також проводили вперше. Розрахунки виконували на основі аналізу розподілу фаз, згідно комірок. Наприклад, комірка 3×3 пікселя має вигляд:

$$C(x, y) = \begin{pmatrix} C_{i-1 j-1} & C_{i-1 j} & C_{i-1 j+1} \\ C_{i j-1} & C_{ij} & C_{i j+1} \\ C_{i+1 j-1} & C_{i+1 j} & C_{i+1 j+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де i – номер строки, а j – стовпця, колір C_{ij} – середній у форматі *bmp* 256 відтінків.

Отримані у форматі *bmp* фотографії мікроструктур з сірого чавуну розміром 1300×1000 пікселей оброблялися за допомогою комп'ютера. Цей формат має 256 кольорів від 0 до 255 включно. Це число пов'язане з представленням кольорів в пам'яті комп'ютера за допомогою кольорової моделі RGB. Для представлення всіх можливих кольорів і відтінків використовуються комбінації трьох основних кольорів: червоного

(R), зеленого (G) і синього (B). Кожен компонент в моделі RGB кодується числом, яке показує насиченість цього компонента. Причому, число градацій (відтінків) кожного компонента залежить від того, скільки пам'яті виділяється для зберігання його двійкового коду в пам'яті комп'ютера. Традиційно використовувалася 24-бітна модель RGB, де на кожен компонент виділяється по 8 біт. Відповідно у кожного з базових кольорів є $2^8 = 256$ відтінків. Сірий колір являє собою змішування всіх трьох базових кольорів в рівних пропорціях, тому у нього теж 256 відтінків.

Фотографії мікроструктур у форматі *bmp* оцифровувалися у формат *pgm* (формат зображення у відтінках сірого) для розрахунку програмою, що було необхідно через особливості роботи обчислювальної апаратури.

Програма обчислює одну фотографію близько 40 хвилин та видає в файл по кожному фрагменту його координати, кількість сполучень, номера кольорів, що входять в поєднання, середню кількість пікселів і відсоток поєднання всередині фрагмента 10×10 . Розміри файлів отриманих результатів становили близько 3,5 мегабайт. Аналогічно формували і інші комірки.

Для вивчення локальних напружень, згідно зміни щільності дислокаційної структури або зон стиснення та розрядження, при заварюванні дефектів наплавленням електродом з модифікуючою домішкою, використовували енергетичний параметр – міцність дисипації енергії:

$$M = D(x, y) \cdot L(x, y), \quad (2)$$

який представлено у вигляді зв'язку дивергенції (D) та лапсасіану (L) функцій $C(x, y)$, де x, y – координати точок металографічного зображення.

При цьому

$$D(x, y) = \operatorname{div} C(x, y) = \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial C(x, y)}{\partial y} \quad (3)$$

та $L(x, y)$ описує щільність фрагменту зображення (зон стиснення та розрядження)

$$L(x, y) = \Delta C(x, y) = \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2} \quad (4)$$

Кінцево-різницеві представлення $D(x, y)$ та $L(x, y)$ будуть мати вигляд:

$$D_{ij} = C_{ij-1} - 2C_{ij} \quad (5)$$

$$L_{ij} = C_{ij-1} + C_{i-1j} + C_{ij+1} + C_{i+1j} - 4C_{ij}, \quad (6)$$

Переглянемо

$$M_{ij} = (C_{ij-1} + C_{i-1j} + 2C_{ij}) \cdot (C_{ij-1} + C_{i-1j} + C_{ij+1} + C_{i+1j} - 4C_{ij}) \quad (7)$$

Розрахунки напружень локальних зон також проводили, згідно попередньо отриманих зображень структури при вакуумному травленні де виявляли зміни у дислокаційній структурі, декорованої вуглецем та киснем.

У **третьому розділі** «Аналіз факторів, що впливають на якість і властивості виливків із чавуну» виконано статистичний аналіз технологічних факторів виробництва втулок гільз циліндрів з високоміцного чавуну та корпусних деталей з – сірого. Такі виливки одержують відцентровим методом у різнотовщинні за висотою металеві форми та у – земляну відповідно.

Досліджували дві вибірки (57 виливків втулок гільз циліндрів), які відповідали вимогам нормативно-технічної документації (ТІ-78.019-2003І) та мали відхилення (рис. 3), згідно вмісту компонентів С, Si, S, Mg. При цьому, найбільші відхилення характерні для Si, S, і Mg, що пов'язано з низькою якістю процесу модифікування домішкою SiMg.

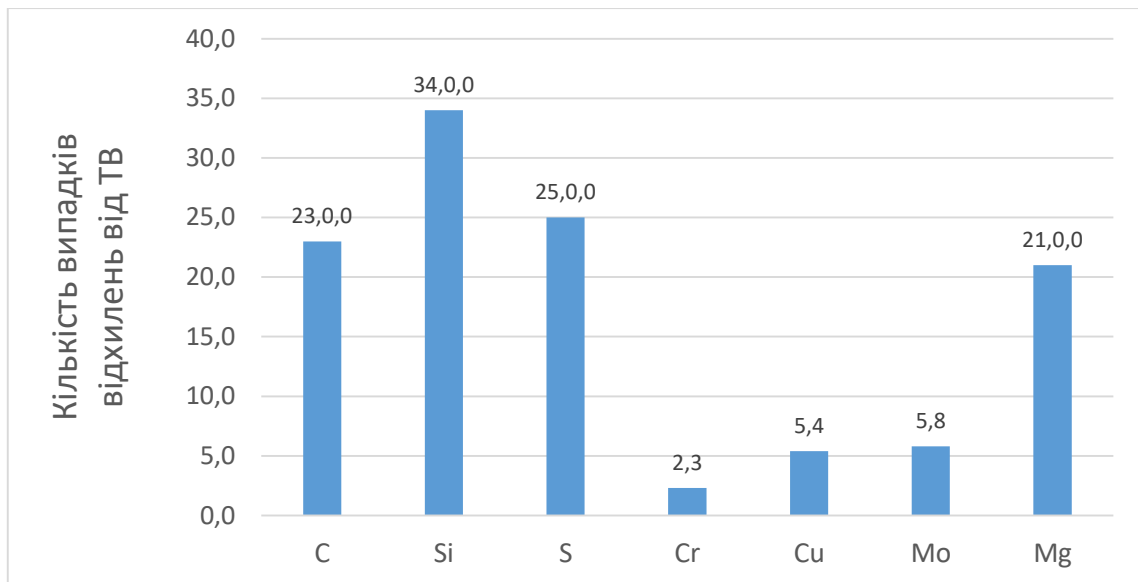


Рисунок 3 – Вплив компонентів на структуроутворення чавуну втулок гільз циліндрів.

Аналізом встановлено, що сума відхилень компонентів, які визначають якість модифікування в умовах нерівномірної кристалізації за висотою втулки дорівнює 80% (локальна концентрація: 34,0%Si + 25,0%S + 21,0%Mg). Сума відхилень компонентів, що визначають можливість появи карбідної фази дорівнює 5,4% (3,6%C + 1,8%Si).

Виготовлені виливки втулок гільз з високоміцного чавуну відрізняються структурою і рівнем напружень, які можна оцінити неруйнівним магнітним методом за коерцитивною силою. Досліджували вибірку із $H_c = 3,6$ до $12,9$ А/см по цьому параметру. Встановили, що при H_c до $\leq 5,1$ А/см металева матриця чавуну виливків представлена ферито-перлітною складовою і частка перліту локально змінюється від 20 до 70-80%, що пов'язано з умовами кристалізації. Максимальна частка перліту (основа) характерна для втулок гільз при $H_c \geq 6,5$ А/см. У цьому випадку феритна складова відсутня, а стабільно виділяється структурно вільний цементит, включення якого не допускаються нормативно-технічною документацією.

Виконане планування експерименту (план 2^2) по встановленню впливу частки феритної і карбідної складових на показання коерцитивної сили. Встановлено, що частка фериту (Ф) інтенсивніше знижує рівень коерцитивної сили, ніж підвищує її цементит (Ц): $H_c = 7,2 - 5,2Ф + 4,1Ц$. Підвищення рівня H_c , починаючи з $8,2$ А/см, супроводжується виділеннями і ледебуритної евтектики, частка якої помітно зростає з > 9 А/см і досягає 20% при $H_c = 12,9$ А/см.

Порівняння двох вибірок за хімічним складом втулок гільз, які відповідають вимогам нормативно-технічної документації і мають відхилення від них за рядом компонентів показали, що рівень механічних властивостей чавунів (твердості, міцності, пластичності) і глибина азотованого шару робочої поверхні цих деталей, і рівень їх мікротвердості, а також розкид показань коерцитивної сили стабільно не визначаються цим фактором. При цьому, твердість тільки в 12% випадків не відповідає вимогам, а середні значення коерцитивної сили змінюються в межах до 65% (рис. 4). Розкид показників коерцитивної сили не зменшується при термічній обробці виливків, що не пов'язано з напруженнями, а залежить від структуроутворення (співвідношення фазових складових).

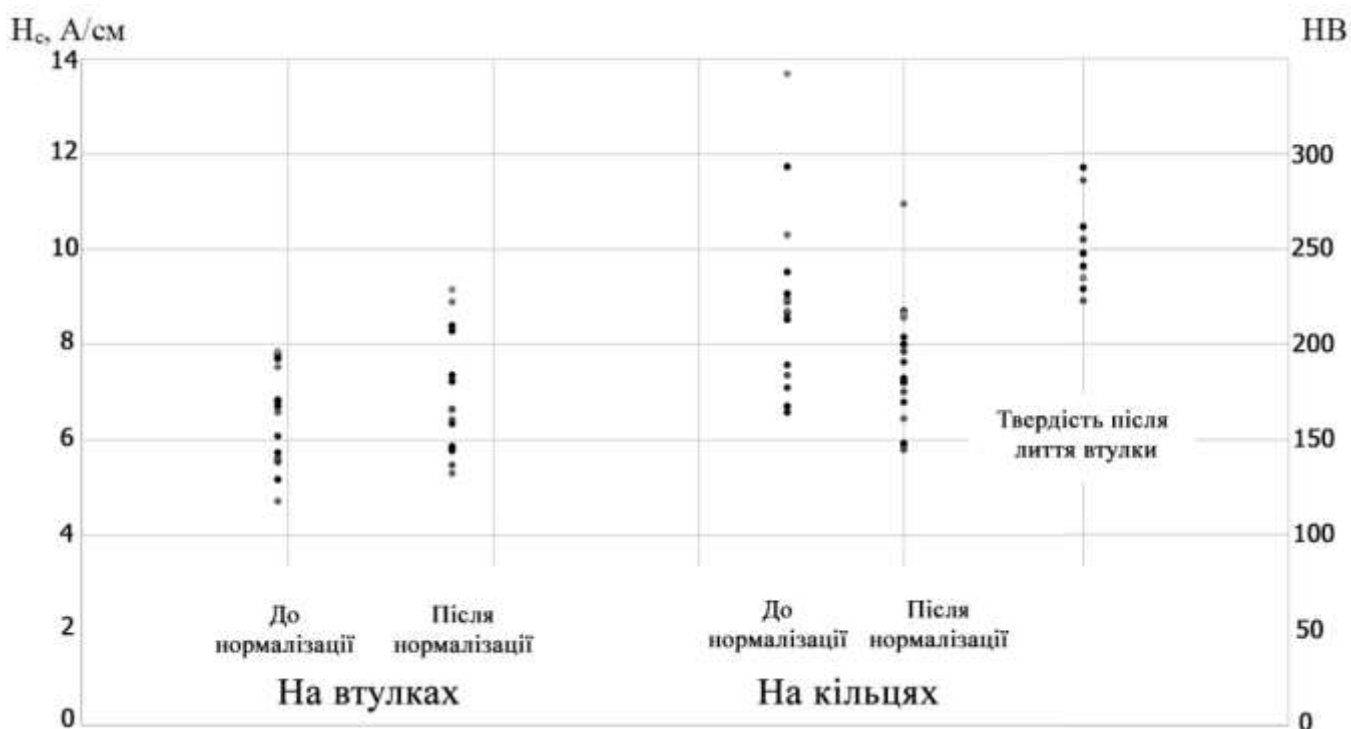


Рисунок 4 – Вплив способу обробки на зміну показників коерцитивної сили

Спостережувані відхилення в коерцитивній силі можуть бути пов'язані із двома факторами: недостатньою засвоюваністю модифікатора, за рахунок демодифікації металу при його тривалій витримці в ковші, а також з умовами кристалізації виливка втулки в різнотовщинній формі, що використовується у відцентровій машині. Зіставні дослідження втулок гільз і кілець, відібраних від них у литому стані, не виявили суттєвих відмінностей у показаннях коерцитивної сили. При термообробці – нормалізації відзначається деяке підвищення цієї характеристики в кільці, причому більшою мірою ніж у виливку та, у середньому становить 10-20%. При проведенні термообробки доля виділення карбідної фази і ледебуриту не змінюються, а подрібнюються лише окремі тонкі пластини цементиту у перліті (рис. 5).

Для оцінки впливу умов кристалізації проведено аналіз змін показань коерцитивної сили за трьома зонами виливка: верхньої, середньої та нижньої (по перетину), а також по його висоті. Показано, що вимірювання за кожною зоною по перетину мають близькі значення та змінюються в межах від 0 до 0,4 А/см.

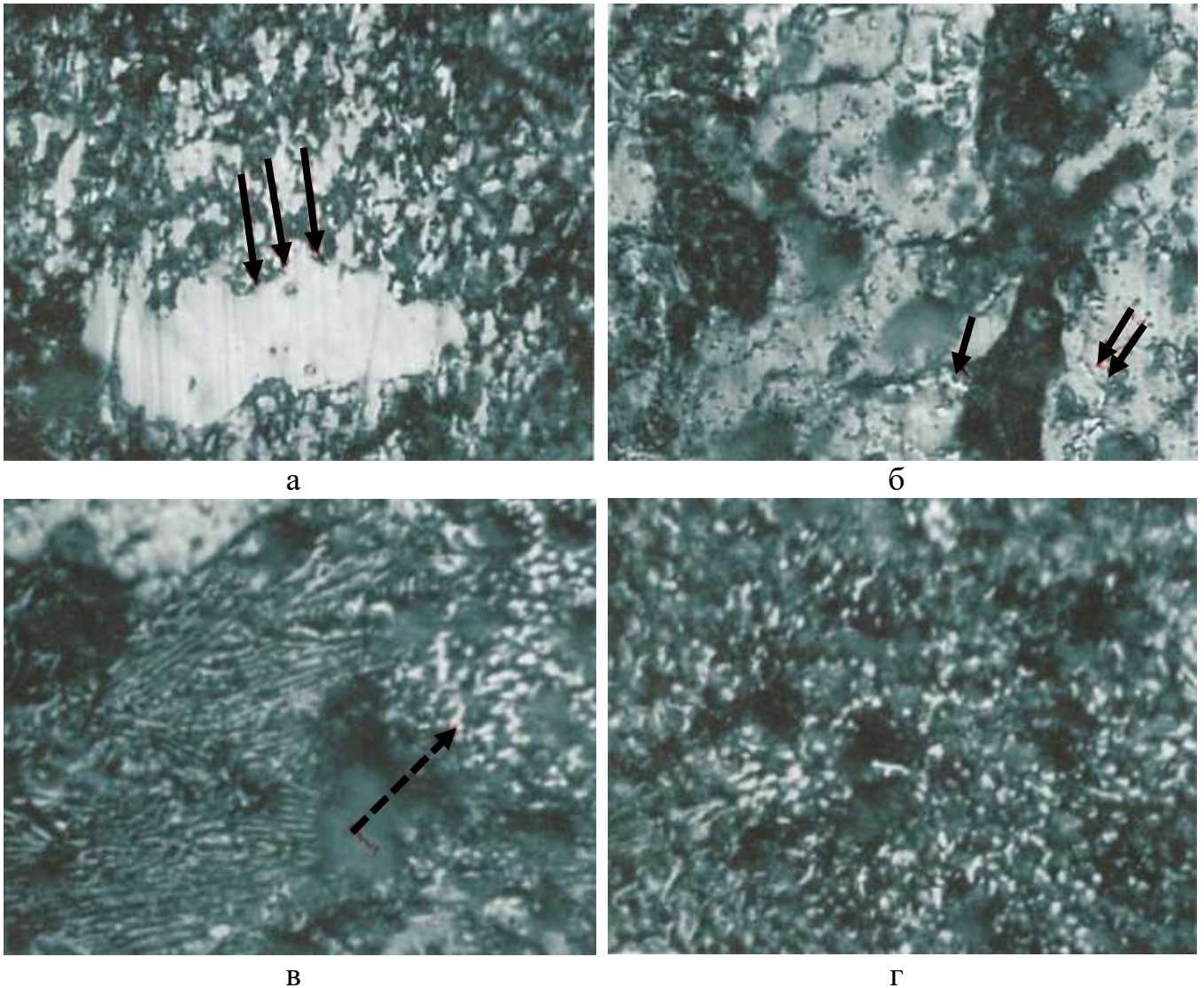
Разом з тим, рівень показань між різними втулками суттєво відрізняється. Так, розкид показань H_c у верхній зоні (відповідає найбільш стовщеній металевій формі і має меншу швидкість кристалізації), розкид значень H_c становить 50%, а у середній і нижній – досягає 72-74%, що підтверджує істотний вплив цього фактору.

Спостережуване пов'язане з мінливістю структури і формуванням карбідів та ледебуриту при більшій швидкості кристалізації в зоні, що відповідає тонкостінній частині металевої форми, яка використовується у виробництві.

Результати вимірювань коерцитивної сили не виявили суттєвих переваг втулок гільз, у яких відсутні відхилення, згідно вмісту компонентів в порівнянні з тими, які їх мають. Найбільший вплив на структуроутворення та формування дефектів мають умови кристалізації (швидкість процесу, його нерівномірність).

Виконано статистичний аналіз якості корпусних деталей, проведений в умовах

виробництва ВАТ «ХТЗ». У якості критерію теж використовували магнітний метод неруйнівного контролю якості за коерцитивною силою. Статистичну оцінку проводили на двох типах деталей: корпусах роздавальної коробки передач і картерах коробки зміни передач, які виготовлені із чавунів СЧ15, СЧ18 і СЧ20 відповідно. Обидва типи деталей характеризуються близькою товщиною стінок.



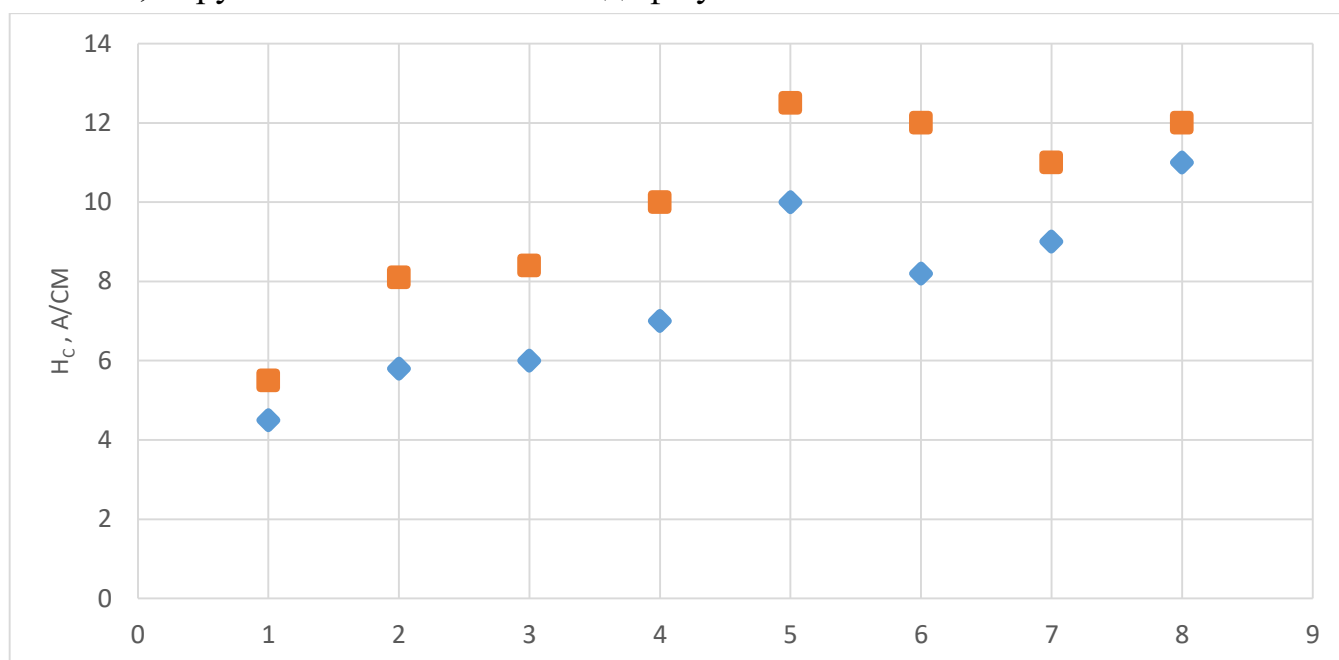
- > цементит у вигляді дуже дрібних включень (б);
- ====> цементит по границях зерен (б);
- ====> грубі виділення цементиту (а);
- > подрібнені включення цементита перліту (в, г)

Рисунок 5 – Структуроутворення після нормалізації виливків

Встановлено, що в першій групі деталей показник H_c змінювався в межах 4,3-8,0 А/см, а в – другій 5,0-9,4 А/см. Найбільш високі значення характерні для внутрішніх поверхонь таких деталей, що пов'язано з більшою схильністю у формуванні в них дефектних зон (рис. 6).

Аналіз зон, що характеризуються порушенням суцільності та відхиленнями в структурі металу, мають підвищений рівень коерцитивної сили, який досягає $H_c = 7,8-11,3$ А/см. Металографічним аналізом виявлені дефекти, що формуються в корпусних деталях. Це неслітини і тріщини, а також структурна неоднорідність, пов'язана з

використанням неякісної, достатньо не контрольованою шихтою при виробництві виливків, порушеннями технології модифікування.



1,2 – зовнішня і внутрішня поверхня без дефектів відповідно; 3,4 – теж саме в зонах ребер; 5 – неслітин; 6 – тріщин; 7 – газових порожнин; 8 – зонах зварювання

Рисунок 6 – Граничні показники зміни коерцитивної сили в залежності від якості корпусних деталей з сірого чавуну

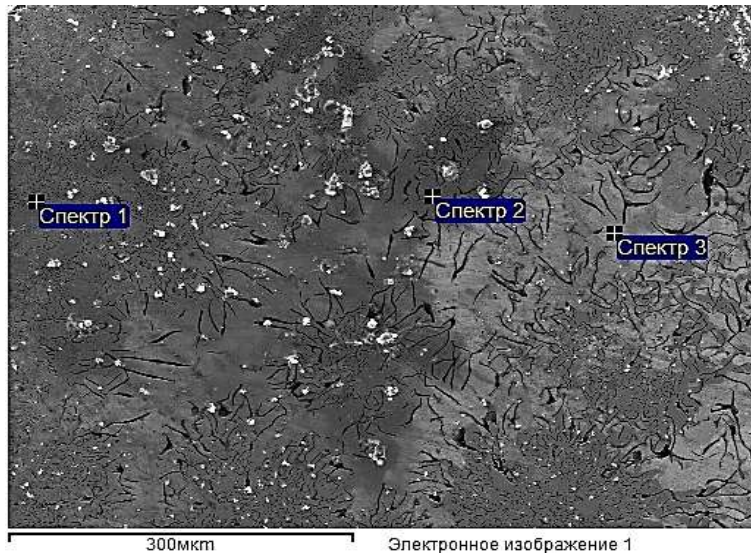
Виконані комплексні дослідження з використанням мікрорентгеноспектрального аналізу і електронної мікроскопії для виявлення чинників, що найбільш частіше пошкоджують виливки в процесі їх виробництва. Показано, що незначні відхилення у локальному вмісті компонентів, згідно нормативно-технічної документації, не мають істотного впливу на рівень споживчих властивостей і показники коерцитивної сили.

Порушення технології модифікування SiMn та неякісна шихта, її засміченість призводять до кристалізації зон у деталях із сірого чавуну різних неметалевих включень (MnFe)O; MnSiO₃, Mn₂SiOH, MnS, Fe₃N, FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeP₂, Al₂O₃, Si₂O₃, і інш.. В окремих випадках локальним методом мікрорентгеноспектральним аналізом виявлений і локальний вміст V і Ti, які досягають 0,48 і 0,40% відповідно, що призводить до формування карбідів цих компонентів. Хімічна неоднорідність у вигляді оксидів характерна і для границь евтектичних (первинних) зерен як біля поверхні виливків, так і в їх центральній зоні за перерізом (рис. 7). Усе це створює локальні напруження та сприяє тріщеноутворенню.

Методом термоелектронної емісії показано, що основними чинниками тріщеноутворення також є неякісна підготовка форми для відливання корпусних деталей. Її волога при контакті з рідким розчином металу розкладається з утворенням газів, які проникають у найбільш грубі включення графіту і «підривають» його (рис. 8). Локальним аналізом показано, що частка кисню в таких зонах досягає 34,4%.

В **четвертому розділі** «Теоретичне обґрунтування розробки інноваційних технологій у машинобудуванні» виконана на основі проведеного аналізу теоретичних

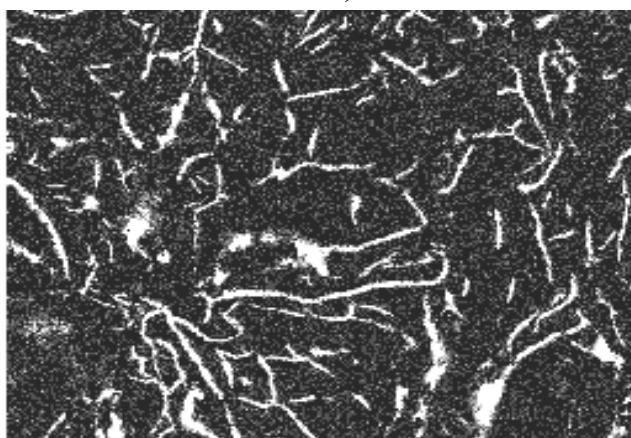
підходів, математичного опису впливу параметрів підігріву металевої форми з різним перетином її стінки за висотою для виливків втулок гільз циліндрів і мінімізації рівня напружень. Запропоновано спосіб найбільш ефективного, з погляду забезпечення зменшення енерговитрат, екології, економії модифікуючих домішок, а в технічному аспекті – забезпечення програмованого процесу з оптимальними параметрами СПЧ при циклічній обробці з відключенням індукторів. Розглянуті різні параметри та схеми нагрівання металевої форми для її використання в машині відцентрового лиття. Дослідженнями встановлено, що сумарний час нагрівання форми СПЧ в оптимальному варіанті повинен становити 4,2 год, а відключень в період пауз – 1,2 год.



Спектр	C	O	Si	P
Спектр 1	13,14	34,40	0,97	-
Спектр 2	8,43	4,57	1,95	-
Спектр 3	7,43	-	1,47	0,17
Спектр	S	Cr	Mn	Fe
Спектр 1	0,20	-	0,39	50,90
Спектр 2	-	-	0,55	84,50
Спектр 3	-	0,18	0,99	89,76

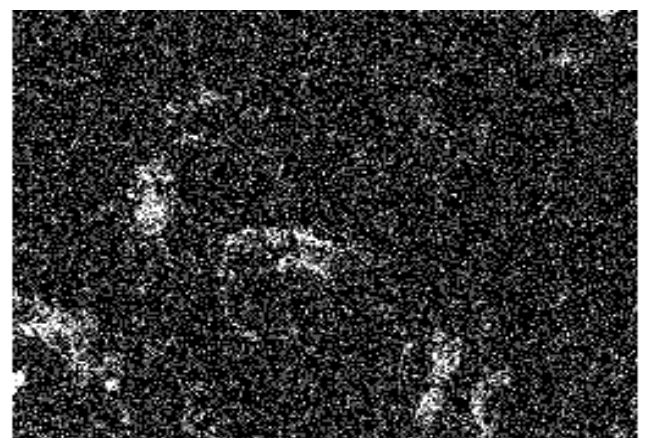
Рисунок 7 – Мікроструктура середньої зони проби і розподіл оксидів. Термоелектронна емісія

Число циклів, що забезпечують рівномірне нагрівання за висотою металевої форми повинно становити не менше трьох (рис. 9). Температура представлена двома відтінками червоного кольору: більш темний відповідає внутрішньому шару (1); світлий – зовнішньому (2). Внутрішньому шару відповідають напруження, позначені темно-зеленим кольором (3), зовнішньому – зеленим (4), а жовтим (5) – середній зоні перерізу металевої форми. Синім кольором (6) наведена зміна відносної потужності джерела за часом (відношення потужності в розглянутий момент часу до максимальних значень).



C Ka1_2

а



O Ka1

б

а – графіт, б – кисневі включення у графіті, $\times 100$. Термоелектронна емісія

Рисунок 8 – Наявність кисню в графіті

У програмі використовували 4 параметра:

два за часом і два за товщиною форми (q_0 і qt_e)

$q_0 = 20000$: $qt_e = 15000$ для товстої частини металевої форми

$q_0 = 15000$: $qt_e = 15000$ для тонкої частини металевої форми

У цьому випадку теплові потоки майже пропорційні товщині металевої форми. При розрахунках використаний замість степеневого розподілу потужності окремих випадок експонентного закону з обчисленням параметрів, при яких зберігалася б задана сумарна потужність. У первинному обґрунтуванні вибору і оцінки впливу потужності джерела нагрівання не враховувався розподіл струмів Фуко за товщиною металевої форми, тому він є недостатньо надійним.

У новому варіанті розрахунків при нагріванні металевої форми напружень, в одмінних за товщиною зонах, виявилися суттєво більш низькими і їх взагалі можна не враховувати (рис. 10). Незалежно від товщини стінки металевої форми температура і її розподіл стабільні.

Запропоновані і обґрунтовані розрахунками технологічні параметри підігріву металевої форми СПЧ в порівнянні з – пічним дозволяє збільшити ККД процесу з 60 до 80% і одночасно підвищити їх експлуатаційну стійкість на 15%.

З одержаних залежностей видно, що при трьох циклах підігріву зовнішній шар більш товстої частини досягає $t = 500-520^\circ\text{C}$, а внутрішній – $330-345^\circ\text{C}$. Для тонкої частини зовнішнього шару температура дорівнює $480-490^\circ\text{C}$, а внутрішнього – $390-415^\circ\text{C}$.

Стабілізація температур у цьому варіанті підігріву металевої форми відбувається, згідно закону:

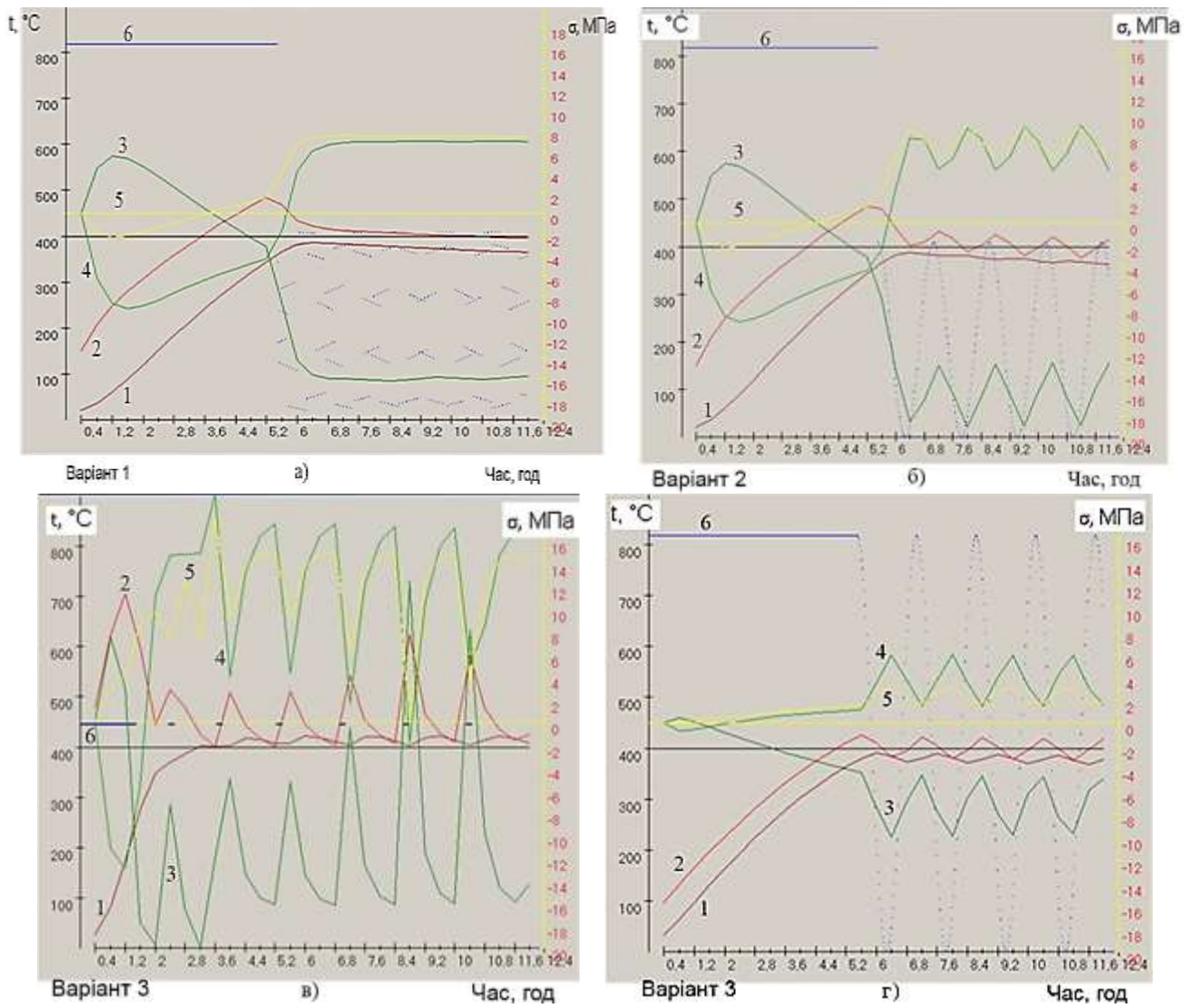
$$Q(t) = qt_e \times \sin(4 \times i \times dt) \quad (8)$$

та це для випадку, якщо \sin не негативний, а коли дорівнює 0 – негативний, то відповідає періоду відключення.

Запропоновано новий підхід до оцінки структуроутворення у корпусних деталях з сірого чавуну при різних методах відновлення дефектів заплавленням оптико-математичним методом (рис. 11), який базується на оцінках типу формуємих фаз, їх кількісному співвідношенні, а також зв'язках між ними.

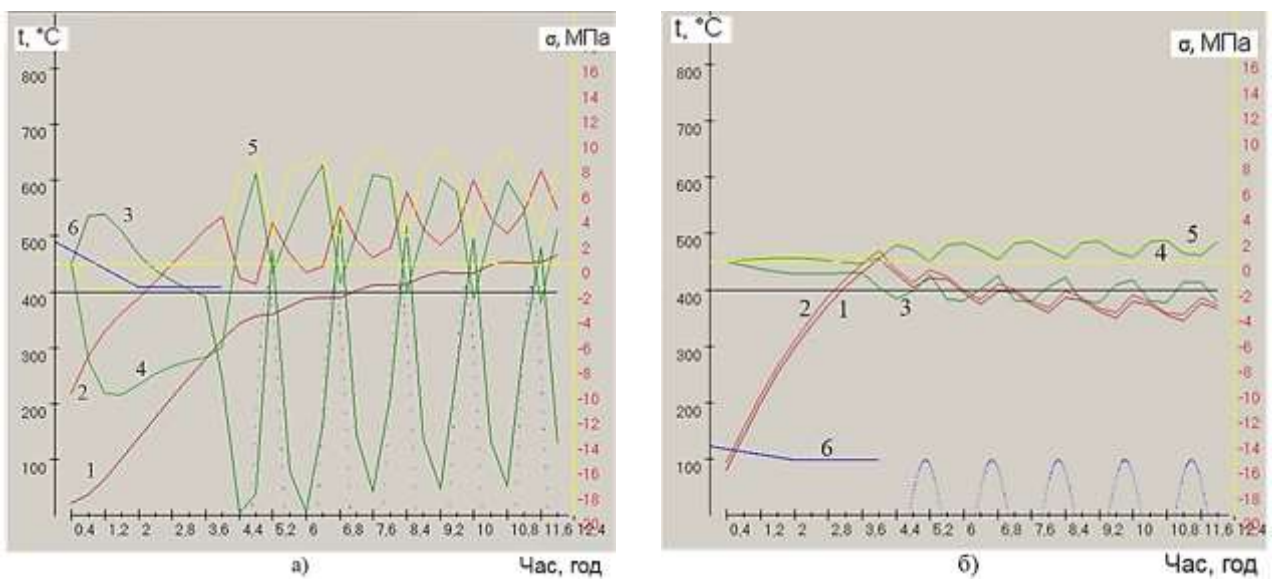
Розглянуто 256 відтінків кольорів, які відповідають: 0-1 – вуглецевим фазам (графіт, кольори до 32); 2-8 – феритним фазам (кольори 33-146 по-різному насичені вуглецем); 9,10 – аустенітним (кольори 147-164) і 11-16 (кольори 165-255) карбідним – різних типів (Fe_3C , Fe_xC_y , і FeC). Аналіз, проведений на основі пікселів у комірках 2×2 , 3×3 і 10×10 та інш., дозволив не тільки локально виявити наявність різних структурних складових, але і чітко визначити границю зони сплавлення з перехідним шаром, його форму (суцільна, хвиляста). Для комірок пікселів розглядали різні та однакові комбінації кольорів.

При цьому аналізували як окремо різні зони (наплавлення, перехідні – табл. 1), так і по всій фотографії без їх врахування. Встановлено, що залежно від способу введення модифікуючої домішки, спеціально підготовленої детонаційної не магнітної складової шихти від утилізації боєприпасів, формується різна кількість фазових складових, яка визначається ступенем неоднорідності розподілу нано- і дисперсних алмазів при їх введенні. Одночасно виявлено взаємозв'язок між різними складовими ферит-аустеніт; ферит-аустеніт-карбіди; аустеніт-карбіди; ферит-карбіди.



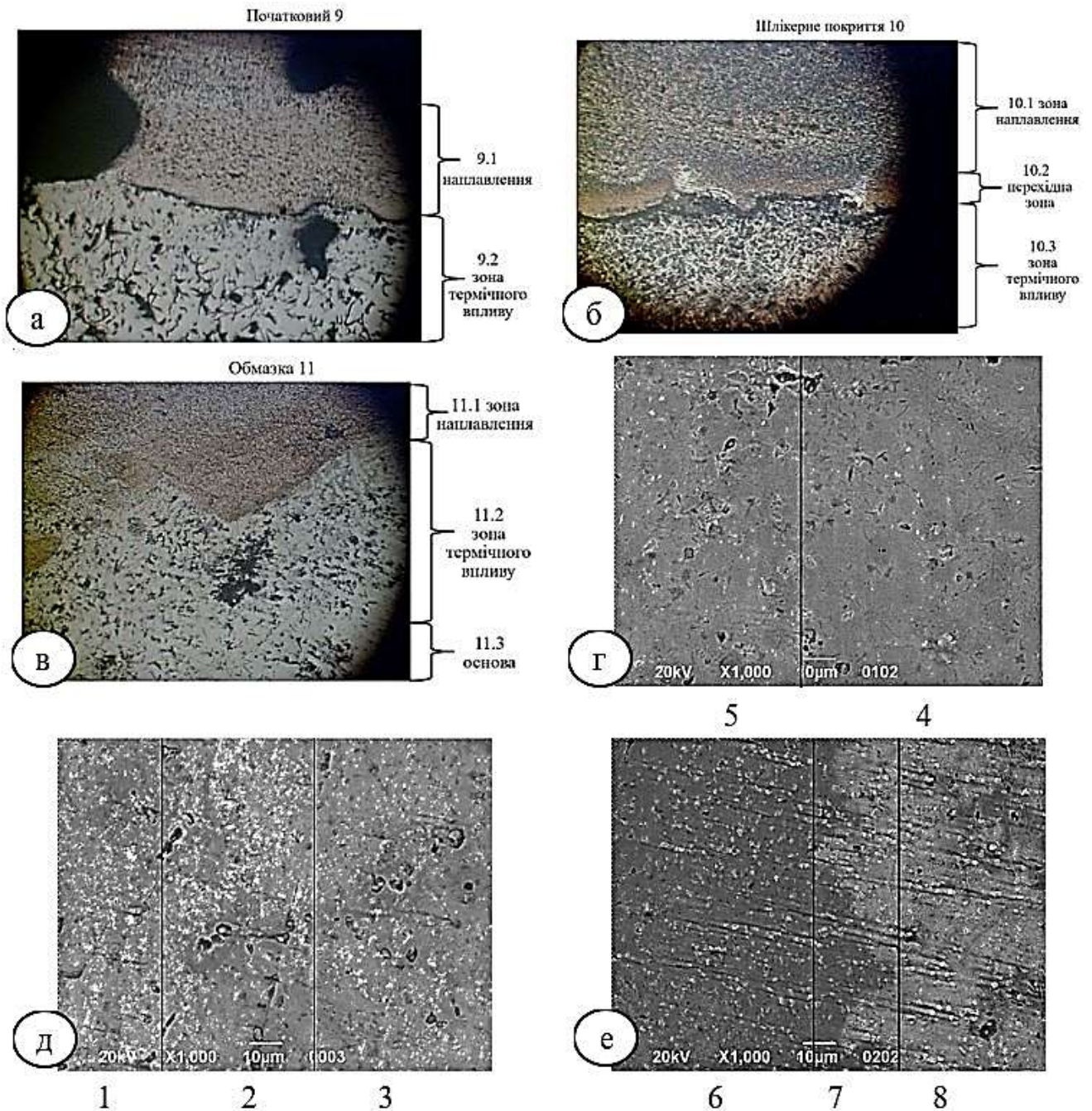
а, б, в – товста частина форми; г – тонка

Рисунок 9 – Залежності: температура – час обробки СПЧ – напруження



а – товста частина форми; б – тонка

Рисунок 10 – Розподіл температур і напружень у різних зонах втулки при зміні параметрів обробки СПЧ



а, г – структура без модифікуючої домішки; б, д – шлікерне покриття; в, е – обмазка електрода при дозованому введенні модифікатора; а-в×100; г-е×1000

Рисунок 11 – Досліджувані фотографії з використанням розробленої методики оптико-математичного аналізу

Вони визначають роль модифікуючої домішки у підвищенні якості відновленого шару (відсутність дефектів), формуванні зони сплавлення, що супроводжується зменшенням тепловкладення і, відповідно змінам умов кристалізації. Зіставний аналіз зон відновлення, згідно різних технологій (з нанесенням модифікуючої домішки у вигляді шлікерного покриття та наступним оплавленням, а також обмазкою електрода) заварюванням дефектів корпусних деталей роздавальної коробки передач сільськогосподарської техніки, виконано і для варіанту без введення модифікуючої домішки.

Таблиця 1 – Сумарні комбінації за лівою і правою частинами фотографій (відображають зони наплавлення та – перехідну і частково основи)

1	номер фотографії				
2	сума відсотків правих частин в парних поєднаннях				
3	сума відсотків лівих частин в парних поєднаннях				
4	сума відсотків правих частин в непарних поєднаннях				
5	сума відсотків лівих частин в непарних поєднаннях				
1	2	3	4	5	
1	71.2	58.8	0.0	1.1	відсотки однакових поєднань правої частини більше лівої
	27.4	38.4			відсотки однакових поєднань правої частини менше лівої
2	85.6	74	0.0	0.6	відсотки однакових поєднань правої частини більше лівої
	13.4	23.9			відсотки однакових поєднань правої частини менше лівої
3	61.8	12.4			відсотки однакових поєднань правої частини більше лівої
	34.6	86.1	1.5	0.0	відсотки однакових поєднань правої частини менше лівої

Для оцінки використовували однакові параметри процесу, штучно сформованої тріщини. Аналіз структури проводили зіставно за фотографіями мікро- і електронних зображень за однаковими збільшеннями мікроскопа. Встановлено, що найбільш стабільні результати досягаються при модифікуванні з обмазкою електрода. В цьому випадку при дозованому введенні домішки розмір зерна зменшується і у відновленому шарі збільшується частка феритної складової, а також суттєво зростає доля зв'язків у фериті різної насиченості вуглецем і меншою мірою з іншими фазами (аустеніт, карбіди). Розрахунками показано, що при традиційному методі заварювання дефектів і модифікуванні нанесенням шлікерного покриття, різниця у фазовому складі між основним металом і зоною наплавлення не перевищує змін в 1,3 рази (сумарне відношення $71,2/58,8 = 1,3$), однак, при дозованому введенні воно досягає 5 ($61,8/12,4 > 5$). Спостережувані структурні зміни, які забезпечили найбільшу ефективність, досягнуті за рахунок зменшення тепловкладення, а також розвитку явища турбулізації при введенні нано- і мікроалмазів, які не розчиняються та відіграють роль локальних мікроохолоджувачів. Особливості структуроутворення виявлені та оцінені за фотографіями зображень фаз та їх комбінацій також описані алгебраїчними гістограмами Бозе.

У **п'ятому розділі** розглядаються «Теоретичні і експериментальні дослідження впливу графітових включень та особливості структуроутворення при відновленні корпусних деталей». При виробництві та експлуатації значна роль в пошкодженості, розвитку деградаційних явищ у структурі чавуну з порушенням суцільності виливків належить грубим графітовим включенням, які при локальних напруженнях є осередками цих змін. Тому важливо встановити вплив цього фактору в розвиток деградаційних явищ, які мають місце особливо у локальних зонах навколо найбільш грубих графітових включень.

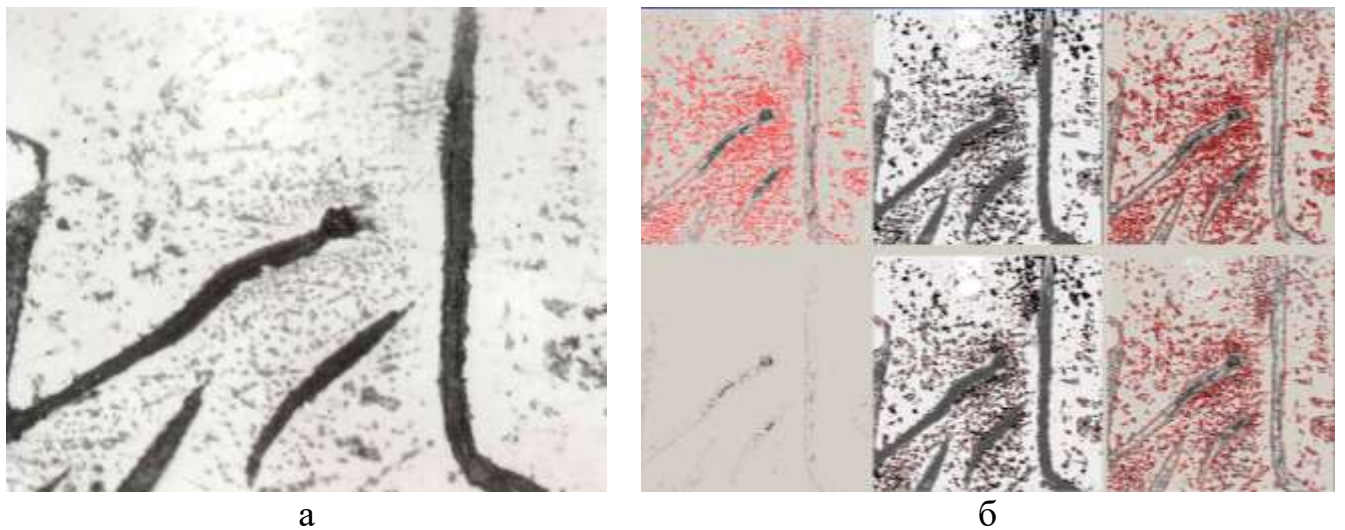
Для цього, за допомогою неруйнівного контролю якості, знаходили виливки, які мали підвищений рівень коерцитивної сили, що характеризувало суттєві відхилення в структурі на етапі періоду деградаційних явищ в металі, яке пов'язане зі зростанням скупчення дислокацій.

Для досліджень кінетики цих процесів використовували і моделювання на зразках $3 \times 4 \times 80$, у яких середня їх частина відповідала локальній зоні напружень. Виявлення цих зон з підвищеною щільністю дислокацій також проводили методом

моделювання при вакуумному травленні (3×10^{-3} мм рт.ст.) в умовах різних температур (200, 400, 600°C). Зміни, що відбувалися при деформації фіксували в мікроскопі системи Лозинського. Дослідження показали, що з підвищенням температури рівень напружень зростає та структура суттєво змінюється. На границі з графітовими включеннями формуються дислокаційні стінки, комірки, які за рахунок дифузійних процесів декоруються вуглецем та киснем, накопиченими у цих зонах. Найбільша щільність дислокацій накопичується не тільки поруч з включеннями графіту, а особливо на їх кінцях де, в ряді випадків, створюються порожнини та тріщини.

На рис. 12 показано характерну дислокаційну структуру, що формується навколо скупчень грубих включень графіту, яка виявлена, згідно підвищеного рівня коерцитивної сили, вакуумного травлення та опису фотографій оптико-математичним методом. Для таких зразків не використовували хімічного травлення, щоб виявити тільки вплив графіту та дифузійних явищ, з ним пов'язаних.

Розрахунок алгебраїчної гістограми кольорів показав, що графіт та вуглець, який декорує дислокації, відрізняються кольором та складають 88,7 - 95,7 % та 4,3 - 11,3 % відповідно. Крім того, в зонах з підвищеними напруженнями виявлена частка 0,01 - 0,03 % створення дуже дрібних карбідів нестехіометричного вмісту складових типу Fe_xC_y . Такі дослідження базувалися на оцінках енергетичних параметрів – міцності дисипації, що описує взаємодію фаз при скануванні, а також дивергенцією та лапласіаном у кожній точці металографічного зображення. Виявлена неоднорідність локальних змін цих показників, пов'язаних з різним ступенем напружень, що формуються в залежності від стану зони графітових включень, які впливають на розвиток локальної дифузії вуглецю. Це підтверджує і різний колір, який з'явився у графітових включеннях при оптико-математичних обробках фотографій, для виявлення яких не використовували попереднє травлення хімічними реактивами, щоб одержати тільки вплив цієї фази. В зонах, де навколо графіту має місце підвищена щільність дислокацій (див. рис. 12) має вигляд пори (чорний колір).



а – вихідний стан; б – верхній ряд відповідає напруженням (негативним, нуловим і позитивним), а нижній – щільності дислокацій у зонах локальних деформацій

Рисунок 12 – структуроутворення в чавуні виливків

Для розробки якісної технології заварювання дефектів у виливках корпусних деталей з сірих чавунів досліджували особливості структуроутворення при використанні модифікуючих домішок для одержання стабільної якості виливків. Для такої оцінки використовували дослідження за різними комірками пікселів, що дозволило оцінити нейтральності, згідно критерію Колмогорова. При цьому, порівняльно аналізували варіанти вихідного стану, а також з використанням введення модифікуючої домішки від утилізації боєприпасів з обмазкою її електроду та шлікерним покриттям.

Співвідношення зон, які оцінювали оптико-математичним методом, виявили локальну різницю у структуроутворенні. На рис. 13-15 в якості прикладу представлені результати оптико-математичної обробки електронних фотографій мікроструктур, згідно комірок 2×2 пікселів, які відображають максимальні (за перетином) параметри нейтральності лапласіанів та дивергенцій. На кожній фотографії: верхній знімок – вихідна структура, а потім продовження цього ряду та – другий відображають інтервали алгебраїчних гістограм нейтральності величини лапласіанів (0-1/9; 1/9-2/9; 2/9-3/9; 3/9-4/9; 4/9-5/9; 5/9-6/9; 7/9-8/9; 8/9-1). Інші дві строки (третя та четверта) характеризують ті ж самі інтервали абсолютних значень алгебраїчних гістограм дивергенцій. Фактор нейтральності розглядався як ступінь зарядження зон (стиснення та розрядження).

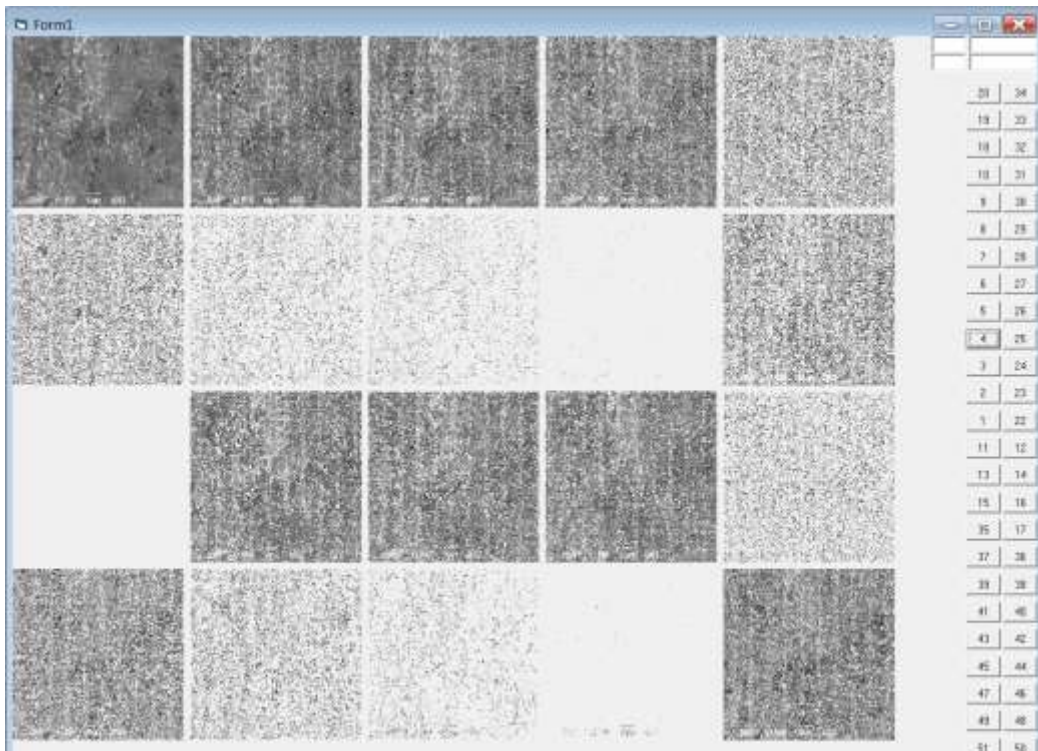


Рисунок 13 – Структуроутворення при відновленні корпусної деталі з сірого чавуну заварюванням сталевим електродом

Встановлено, що такі зони формуються у вигляді смуг – горизонтальних та вертикальних напрямках, але їх виявлення відбувається в залежності від способу наплавлення і при використанні різних комірок пікселів. Горизонтальні формування упорядкованих структур (смуг) виявляються при менших комірках пікселів, а вертикальні при більших, і це пов'язано з напрямом тепловідведення при наплавленні та напруженнями.

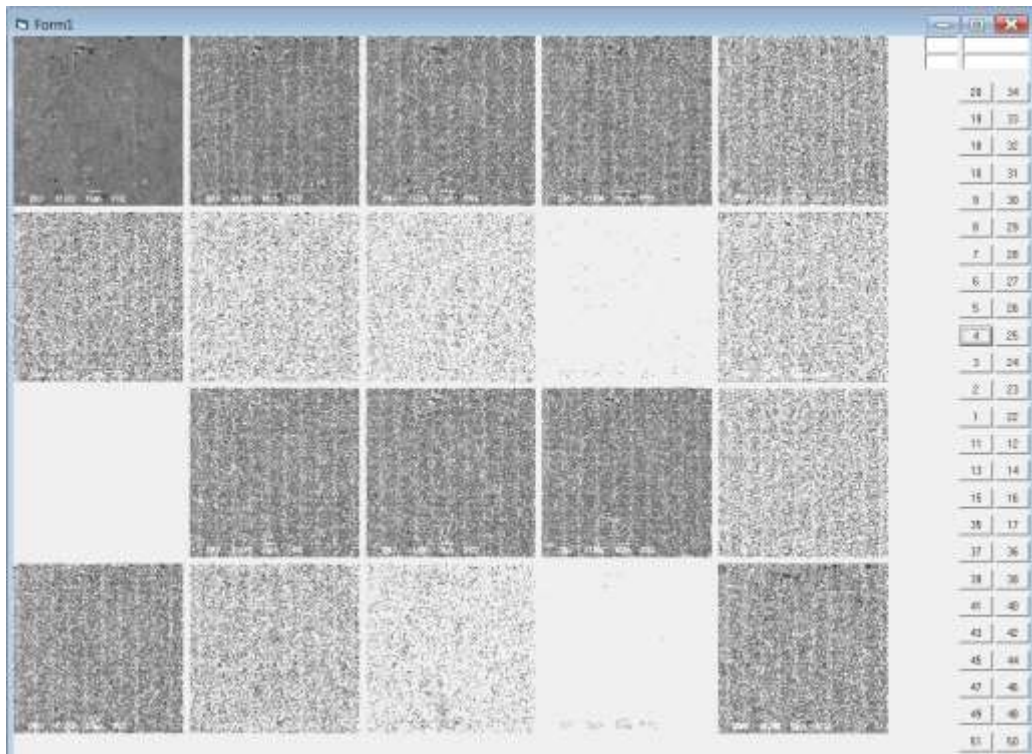


Рисунок 14 – Структуроутворення при відновленні корпусної деталі з сірого чавуну з використанням модифікуючої домішки, нанесеної у вигляді шлікерного покриття та послідуочим заварюванням електродом

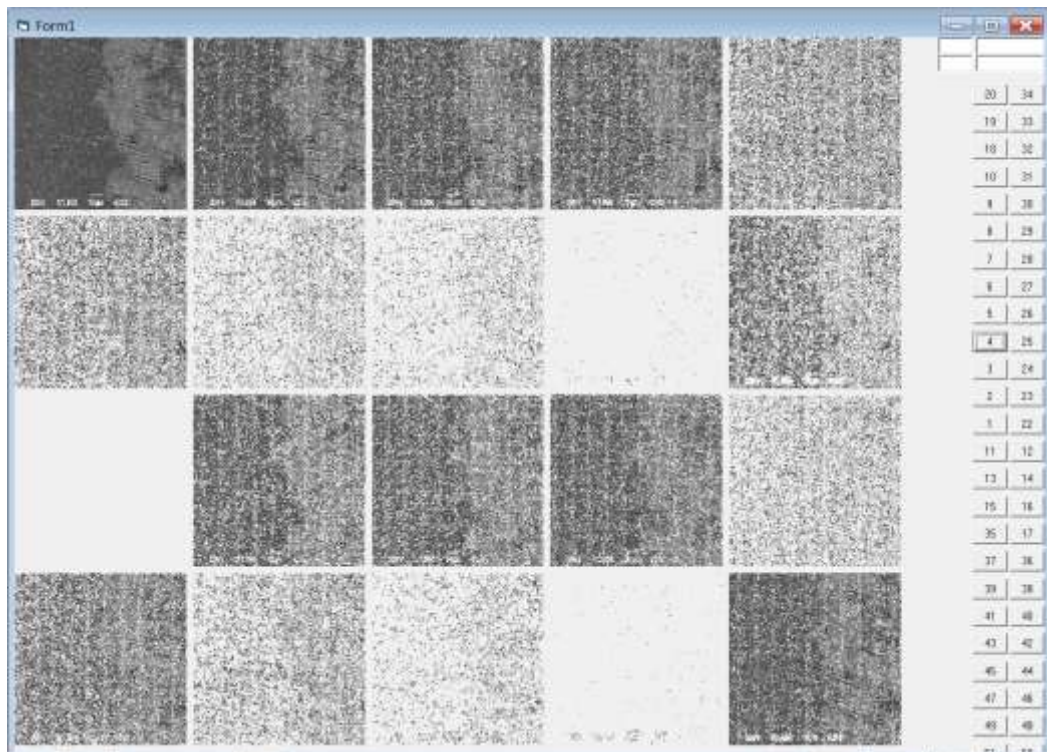


Рисунок 15 – Структуроутворення при відновленні корпусної деталі з сірого чавуну з використанням модифікуючої домішки з обмазкою електроду (дозоване внесення при наплавленні)

Мінімальна комірка 2×2 пікселі достатня для оцінки напруженого стану нової технології відновлення (обмазка електроду шихтою). В умовах дії трьохмірності таких напружень, одне з них є головним. В даному випадку це горизонтальний

напрям, та його можливо характеризувати зі знаком «плюс». Його вплив на створення напружень при заварюванні дефектів в два рази більш значний, ніж останні зі знаком «мінус» та такими, що відносяться до «нульових».

При введенні домішки з вторинної сировини більш інтенсивний розподіл напружень можливо віднести за рахунок пошарового внесення модифікатора з нано- та дисперсними алмазами, що не розчиняються, а відіграють роль мікроохолоджувачів та мають додатковий вплив на умови кристалізації покриття за рахунок зниження температури рідкої ванни.

У шостому розділі «Розробка методів підвищення технологічної стійкості деталей машинобудування. Оцінка економічної ефективності» проведені дослідження по впровадженню розроблених нових технологічних процесів виробництва і ремонту деталей для потреб машинобудування, а також метод та підходи до оцінки їх якості неруйнівним методом з встановленням бракувальних норм.

Експериментально підтверджено, що при використанні циклічного методу нагрівання різновисочинної металеві форми, за якого забезпечується досягнення рівномірної температури перед її використанням у відцентровому відливанні втулок гільз циліндрів, досягається формування найбільш однорідної структури по всіх зонах та зменшується рівень напружень. Виключення впливу фактору швидкості кристалізації за висотою різновисочинної втулки на напруження та неоднорідність формування структури, з високоміцного чавуну виявили незначні зміни в показниках коерцитивної сили і відхиленнях у хімічному складі (згідно норм НТД). Одночасно з цим показано, що найбільший вплив мають вміст C та Si. В цьому випадку рівень в показниках H_c між різними втулками може досягати 30 % (рис. 16). Це стосується вмісту вуглецю вже на рівні 3,45 - 3,51 %. Вплив Si не однозначний. Він проявляється, як при його підвищеній концентрації до 2,12 - 2,45 %, так і зниженої до 1,6 - 1,64 %, що пов'язано з неякісним процесом засвоєння компонентів при модифікуванні рідкого розчину SiMg.

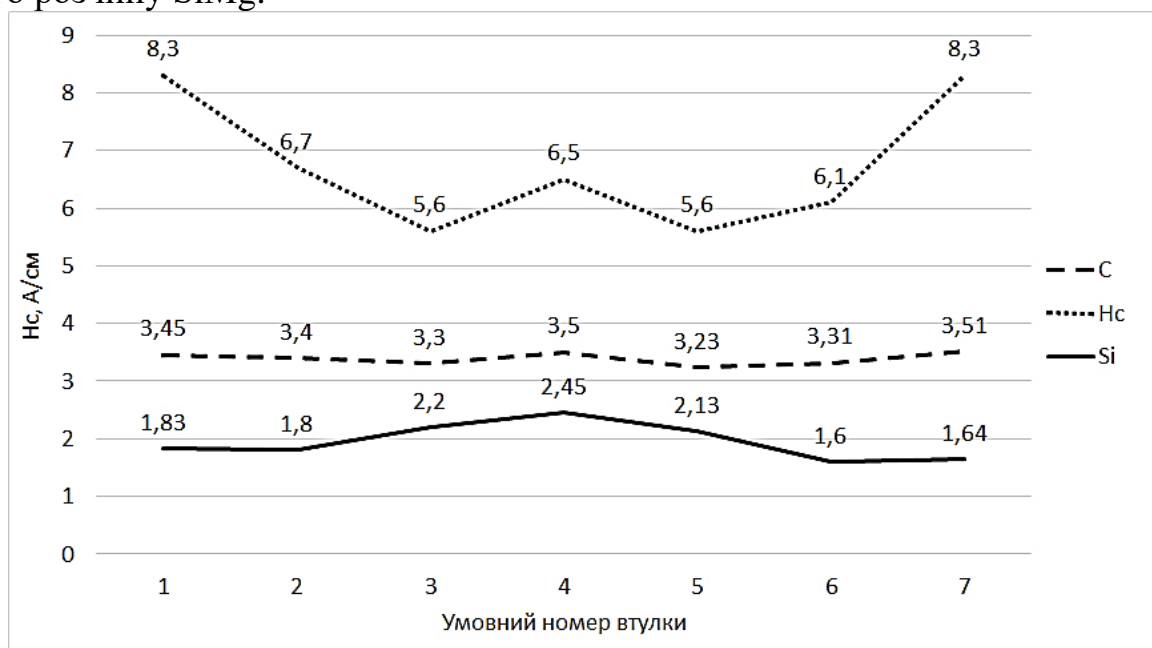


Рисунок 16 – Зміна коерцитивної сили у виливках залежно від вмісту в модифікованому чавуні компонентів C та Si

Якість корпусних деталей з сірого чавуну теж оцінювали за коерцитивною силою порівняльно на деталях одного перерізу і – змінного, щоб виявити вплив локальних напружень, які сприяють істотному внеску у цю характеристику. Досліджували накладку, яка має плоску поверхню і однаковий переріз у всіх її зонах (формується однакова дендритна будова, структура і фазовий склад), що дозволило більш точно виявляти і характеризувати дефекти ливарного походження. Аналізом встановлено, що якісні показники суттєво залежать від типу дефектів, які оцінювали згідно коефіцієнта анізотропії K (де $K = \frac{H_{\text{стоп.}}}{H_{\text{сповз.}}}$, рис. 17). Якісні показники зон без

дефектів мають розкид, який не перевищує 18 % (середнє значення $K = 1,1$). Зона з ситовидною пористістю підвищує $K_{\text{сер.}}$ до 1,25 та розкид значень досягає 35 %. При цьому якісні показники H_c співпадають з цим дефектом. Наявність пісчаних включень підвищує $K_{\text{сер.}}$ до 1,87, розкид значень досягає 68%. Найбільший рівень $K_{\text{сер.}} = 2,35$ мають зони з газовими порожнинами, хоча розкид їх показників H_c не перевищує 36 % та вони знаходяться за межами – якісних.

Розробку процесу модифікування та способу внеску домішок, а також вибір основних компонентів такої суміші для відновлення корпусних деталей (заварюванням) з сірого чавуну досліджували з використанням різних підходів. На першому етапі вивчали введення чистих наноалмазів детонаційного виробництва. Встановили, що така модифікуюча домішка, яку вводили дозовано у рідкий розчин разом з вуглецевим або низьколегованим дротом, на який наносили чарунки, заповненими наноалмазами, забезпечує не тільки зміцнення відновлювального шару, а і – перехідної зони. При цьому перехідна зона змінюється від рівної до хвилястої та наявність її перепадів складає від 15 до 30 мкм. Таке відбувається за рахунок нерівномірного осідання наноалмазів, які не розчиняються та є включеннями – мікро охолоджувачами, і впливають на локальні зміни кристалізації границі відновлений шар – основа. Враховуючи високу вартість наноалмазів, на другому етапі досліджень для модифікування рідкого розчину використовували детонаційну шихту від утилізації боєприпасів, які втратили термін використання, та включали нано- і дисперсні алмази, невелику долю графіту, домішку оксидів Cu та Fe .



Рисунок 17 – Характер зміни показників коерцитивної сили від значень коефіцієнтів K у якісній зоні та при наявності різних дефектів

При відновленні дефектів проводили вибір найбільш ефективного технологічного процесу, який забезпечує рівномірне засвоєння модифікатора, формування хвилястої зони сплавлення та формування якісного покриття, не має тріщин, порожнин та інших дефектів. Це відбувається за рахунок дозованого введення домішки, забезпеченням зниження температурного режиму процесу на 300°C , який наблизився до температури плавлення сірого чавуну. Дослідження проводили разом зі співробітниками ВАТ «ХТЗ» на корпусних деталях сільськогосподарської техніки, які виготовляють з чавунів близького хімічного складу та властивостей СЧ-15, СЧ-18, СЧ-20 з товщиною стінок 30-55 мм. Такий чавун модифікують SiMn або FeSi.

Встановлено, що в залежності від способу введення модифікуючої домішки (детонаційної шихти) у сірий чавун при відновленні виливків має місце кристалізація різної долі фазових складових, які відрізняються ступенем неоднорідності їх розподілу і взаємозв'язком між ними. Такі зв'язки взаємоутворення між фазами забезпечують якість відновленої зони без дефектів, характеризуються суттєвим зменшенням тепловкладення при наплавленні. Найкращі результати досягнуті при заплавленні дефектів з обмазкою електроду ЦЧ-4 (\varnothing 3 мм), що забезпечує дозоване введення модифікуючої домішки з накладенням коротких валиків – 25-30 мм, зварювальним струмом 60-110 А та охолодженням кожного шару до 60°C з послідуною проковкою зони наприкінці відновлення легким деформуванням при $t = 400^{\circ}\text{C}$. Така обробка забезпечує зменшення розміру зерен, підвищення зв'язків у фериті з різним насиченням вуглецю та іншими фазовими складовими, а також за рахунок зменшення тепловкладення та розвиток явища турбулізації (дії локальних мікроохолоджувачів-алмазів) і створення зон стиснення та розрядження.

Вивчені чинники, які впливають на тріщеноутворення в корпусних деталях. При виробництві та експлуатації основна роль в порушеннях цілісності таких деталей мають напруження, формування структурно вільних карбідів і неметалевих з'єднань, а також грубого графіту та його заповнення кисневими включеннями. Вплив на тріщеноутворення при виробництві корпусів може мати і неякісна підготовка форм, яка насичена вологою.

Проведені дослідження на основі нових підходів до структуроутворення сірих чавунів при їх кристалізації дозволили виявити зони локальних напружень, оцінити за величиною дисперсність фаз, зміни функцій потужності дисипації та щільності дислокацій, енергетичний стан системи, яка є характерною для такого матеріалу і виявляти можливі чинники розвитку пошкоджень. Новий підхід в оцінках властивостей рекомендується для використання визначення впливу різних умов кристалізації сірого чавуну, його зміцнення та відновлення при виробництві та експлуатації, а також прогнозування надійності, згідно забезпечення необхідних споживчих потреб.

Промислові дослідження корпусних деталей сільськогосподарської техніки з товщиною стінок 30-55 мм показали, що при якісному модифікуванні SiMn або FeSi таких виливків з чавунів СЧ-15, СЧ-18, СЧ-20, забезпечується частка пластинчастого графіту на рівні 5-7% та H_c в них досягає 7 А/см. При відхиленнях в структурі графіту $< 5\%$ рівень H_c підвищується в 1,3- 1,6 разів та в металевій матриці з'являється структурно вільний цементит і частка фериту зменшується.

Відновлення дефектів заплавленням з використанням детонаційної шихти від утилізації боєприпасів підтвердило ефективність використання такої модифікуючої домішки при дозованому її введенні у рідкий розчин.

Нові технологічні рішення, які доведені до промислового використання захищені патентами України, та два з них впроваджені у виробництво. Економічний ефект від використання технології відновлення дефектів лиття в корпусах роздавальної коробки на ВАТ «ХТЗ» при відновленні 348 шт. складає 746999 грн. на рік. Додатково очікуваний економічний ефект від впровадження розробок складе 76558,8 грн. на рік. Ефективність розробок у виробництві підтверджена розробкою НТД на технологічний процес та актом впровадження.

Очікуваний економічний ефект від застосування технології підігріву різнотовщинної металевої форми, згідно розробленої технології, для виливків втулок гільз циліндрів буде досягнутий за рахунок збільшення терміну служби обладнання на 15 %, зменшення енерговитрат на 20 % для підігріву металевої форми та підвищення якості таких деталей.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені нові, науково-обґрунтовані результати досліджень, які узагальнюють та забезпечують вирішення проблеми, що стосується підвищення властивостей втулок гільз циліндрів дизельних двигунів та корпусних деталей сільськогосподарської техніки з сірих чавунів за рахунок розробки нових підходів до структуроутворення та технологічних процесів їх виробництва і відновлення.

В результаті виконаних розробок одержані наступні результати:

1. З аналізу науково-технічної літератури, стандартів та патентів виявлені основні напрями досліджень по виробництву та використанню деталей з високоміцного та сірого чавунів. Для підвищення якості таких виробів використовують модифікування рідких розчинів домішками з різними способами їх введення, які дозволяють керувати структуроутворенням та властивостями. Розглянуті умови, що забезпечують відсутність формування карбідних включень в структурі металу виробів з чавунів.

Узагальнені вимоги до якості, властивостей та технологій виробництва корпусних деталей, які забезпечують їх надійну роботу та відносно низьку собівартість. Розглянуті основні типи їх пошкоджень при експлуатації в умовах дії різних навантажень (ударних, вібраційних, корозійних середовищ, зношування, кавітації та інш.)

Основними чинниками порушення якості при виробництві є тріщини, пороутворення, не відповідність вимогам за структурою металу і діючій нормативно-технічній документації, Міжнародним стандартам (США, Німеччини, Франції, Японії), які в окремих випадках відрізняються від тих, що використовуються на Україні, та вони враховують механічні властивості, термообробку, але не використовують неруйнівні методи контролю якості.

2. Для досягнення мети роботи, яка спрямована на обґрунтування нових технологій виробництва та відновлення корпусних деталей з чавунів, розроблено методологічний підхід, який базувався на досягненнях, відображених в публікаціях, а також спрямованих на вивчення безпосередньо чинників відмов їх у виробництві та

експлуатації, дослідженнях впливу різних параметрів на якість металу, що використовували при розробках бракувальних норм магнітним неруйнівним методом контролю.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження структуроутворення також спрямовані на визначення основних напрямів пошуку найбільш ефективних технологій виробництва та відновлення, які дозволяють забезпечити підвищення працездатності виливків.

Для оцінки напружень, зав'язків фаз, що забезпечують необхідні споживчі властивості, розроблені та використані нові методики, які базувалися на поєднанні експериментальних досліджень з оптико-математичним методом опису змін.

3. Статистичний аналіз впливу технологічних параметрів виробництва втулок гільз циліндрів з високоміцного чавуну, які відливаються в різнотовщинні металеві форми методом відцентрового лиття, виявив дві групи деталей. Перша – відповідає діючим ТУ 78.019-2003У за структуроутворенням, але має деякі відхилення по вмісту Si, S та Mg, що пов'язано з неякісним модифікуванням рідкого розчину чавуну. Друга – не відповідає вимогам згідно цієї характеристики. Структура їх включає карбідну фазу, а в деяких випадках і ледебурит, що є неприпустимим у діючій нормативно-технічній документації.

4. Для контролю якості втулок гільз на відповідність їх структурного стану діючим ТУ розроблені бракувальні норми, згідно неруйнівного магнітного методу за коерцитивною силою, H_c . Вимірюваннями встановлено, що при $H_c \leq 5,1$ А/см структура чавуну втулок гільз складається з ферито-перлітної суміші, а – $H_c \geq 6,5$ А/см металева матриця чисто перлітна. При $H_c \geq 8,2$ А/см в структурі з'являється цементит, а – ≥ 9 і ледебурит, доля якого до 20% призводить до суттєвого підвищення $H_c = 12,9$ А/см.

Методом планування експерименту встановлено, що вміст ферриту більш інтенсивно знижує коерцитивну силу, ніж доля цементиту, яка її підвищує.

5. Статистичний аналіз якості корпусних деталей з сірого чавуну сільськогосподарської техніки, згідно якого проводили виміри H_c , дозволив виявити, що рівень цієї характеристики на зовнішній поверхні має різні показники, які змінюються від 4,3 - 8,0 А/см, а на внутрішній вони досягають 5,0 - 9,4 А/см, що свідчить про формування дефектів частіше в цій зоні. Металографічними та мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлені зони з порушеннями якості металу (тріщини, пори, локальні напруження, структурні відхилення, ліквіційні явища з формуванням неметалевих включень) де показники H_c підвищуються та досягають 7,8-11,3 А/см.

Поява скупчень неметалевих включень є результатом неякісної підготовки форми при її використанні та засміченістю шихти, що використовується.

6. На основі розрахунків впливу різних методів та параметрів підігріву різнотовщинної металевої форми для формування виливків втулок циліндрів було показано, що досягти необхідних однорідних умов їх кристалізації в машині відцентрового лиття з рівномірним тепловідведенням можливо лише при циклічному нагріванні одночасно всіх зон.

Теоретичними розрахунками встановлено, що загальний час нагрівання індуктором форми СПЧ (струм промислової частоти) складає 4,2 год, а період пауз

відключення – 1,2 год. Число циклів повинно бути не менш ніж – три.

Така обробка металевої форми перед заливанням металу в порівнянні з пічним її нагрівом забезпечує зростання ККД процесу на 20% та підвищує стійкість оснащення на 15%.

7. Розроблено новий підхід до оцінки структуроутворення при відновленні корпусних деталей з сірого чавуну на основі виявлення в них дефектів та структури оптико-математичним і неруйнівним методами за показниками H_c . Аналізували структуроутворення по всій мікрофотографії та в різних локальних зонах: наплавлення, перехідної та основи. Такий підхід у дослідженнях виявив тип феритних фаз, які при модифікуванні забезпечують зв'язок зон наплавлення та основного металу та достатню міцність перехідного шару.

8. Теоретичними і експериментальними дослідженнями та розрахунками встановлено, що тріщеноутворення в корпусних деталях з сірих чавунів відбувається за рахунок створення напружень у перехідних зонах зміни товщини стінки корпусної деталі де формуються більш грубі включення графіту. За рахунок напружень, а також в умовах не якісної підготовки форми до використання при кристалізації виливків, навколо цих включень має місце скупчення дислокацій, які декоруються за рахунок дифузії вуглецю та кисню. Дослідження таких зон виконані на зразках відібраних з виливків та при моделюванні процесу.

Розрахунками показано, що при цьому доля графіту зменшується та не перевищує 88,7 - 95,7 % а виділення вуглецю на дислокаціях досягають 4,3 - 11,3 %. Одночасно встановлено, що у зонах з підвищеними локальними напруженнями формуються дуже дисперсні нестехіометричні карбіди Fe_xC_y , доля яких не перевищує 0,01 - 0,03 %.

Напруження різних знаків та напрямів їх формування досліджували при наплавленні оптико-математичним методом, згідно оцінки показників нейтральності лапласіанів та дивергенцій. Показано, що інтенсивніше зміни структури відбуваються при модифікуванні з дозованим введенням домішки. При цьому формуються зони, які відображають смуги стиснення та розрядження. Найбільше цей ефект проявляється за напрямом інтенсивного тепловідведення.

9. Промисловими дослідженнями підтверджено, що основним фактором зниження якості втулок гільз циліндрів є нерівномірна їх кристалізації в металевій формі при відцентровому відливанні за рахунок структуроутворення з відхиленнями та напруженнями у відповідних зонах з формуванням карбідної фази. Показано, що при виключенні дії цих факторів відхилення в структурі не перевищують 1-3%.

10. Промислові дослідження корпусних деталей сільськогосподарської техніки з товщиною стінок 30-55 мм підтвердили результати теоретичних та експериментальних досліджень і показали, що при якісному модифікуванні SiMn або FeSi чавунів СЧ-15, СЧ-18, СЧ-20, забезпечується частка пластинчастого графіту на рівні 5-7% та H_c не перевищує 5-7 А/см. При відхиленнях в структурі графіту < 5 % рівень H_c підвищується в 1,3-1,6 разів та в структурі металевої матриці з'являється структурно вільний цементит і частка фериту зменшується.

Відновлення дефектів заплавленням з використанням вторинної сировини – детонаційної шихти від утилізації боєприпасів підтвердило ефективність такої модифікуючої домішки при дозованому її введення у рідкий розчин.

Нові технологічні рішення, які доведені до промислового використання також забезпечують зменшення енерговитрат та вони захищені 6 патентами України (з яких 2 патенти впроваджені у виробництво).

Економічна ефективність від впровадження розробок в об'ємі 348 корпусів з сірого чавуну з підвищеними експлуатаційними властивостями складає 746,999 тис. грн. на рік.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Технология локального легирования при восстановлении деталей: Монография / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. Под ред. проф. Т.С. Скобло Х.: ТОВ «Щедра садиба плюс», 2014. 208с.

2. Оценка качества отливок из серого чугуна методами неразрушающего контроля / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Международный научно-технический журнал «Литейное производство»*. 2014. №12. С. 2-4.

3. Эффективная технология восстановления корпусных деталей из серого чугуна методом заварки дефектов / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., Белкин Е.Л. *Ежемесячный научно-технический и производственный журнал Сварочное производство* 2017. №12 (997). С. 33-39.

4. Сайчук А.В. Отклонения в структурообразовании при производстве корпусных деталей. *Научно-технический и производственный журнал «Компрессорное и энергетическое машиностроение»* декабрь. 2014. №4 (38). С. 53-55.

5. Изготовление и обработка корпусных деталей из чугуна / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Вісник ХНТУСГ ім. П Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»* Випуск 158. Х.: ХНТУСГ, 2015. С. 126-133.

6. Сайчук А.В. Технология восстановления трещинообразования корпусных деталей при их производстве. *Вісник ХНТУСГ ім. П Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»* Випуск 168. Х.: ХНТУСГ, 2016. С. 64-68.

7. Сайчук А.В. Влияние способа введения модификатора на качество восстановления дефектов в сером чугуне отливок. *Вісник ХНТУСГ ім. П Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»* Випуск 183. Х.: ХНТУСГ, 2017. С. 3-7.

8. Сайчук А.В. Оценка структурной неоднородности в отливках корпусных деталей из серого чугуна. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»* Х.: ХНТУСГ, 2017. №9. С. 21-27.

9. О причинах трещинообразования в корпусных отливках сельскохозяйственных машин / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»* Орел, 2015. №2 (6). С. 6-14.

10. Применение неразрушающего контроля для оценки качества отливок из серого чугуна / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»* Орел, 2015. №4 (8). С. 15-25.

11. Анализ качества втулок цилиндров двигателей методом неразрушающего контроля / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»* Орел, 2015. №5 (9). С. 26-32.
12. Разработка технологии подогрева разнотолщинной металлической формы для отливки втулок гильз цилиндров / Скобло Т.С., Сайчук А.В., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»* Орел, 2017. №2 (15). С. 50-61.
13. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Скобло Т.С., Сайчук А.В., Сидашенко А.И., Клочко О.Ю. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»* Орел, 2017. №4 (17). С. 141-150.
14. Теоретическое обоснование параметров локального легирования при восстановлении деталей наплавкой / Скобло Т.С., Сайчук А.В., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* ноябрь. 2014. №11 |23|. С. 54-58.
15. Скобло Т.С., Сайчук А.В., Клочко О.Ю. Особенности структурной деградации в отливках из серых чугунов, работающих в условиях нагружения. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* апрель. 2016. №4 |41|. С. 55-57.
16. Влияние модифицирования углеродосодержащими порошковыми присадками на износостойкость при нанесении покрытий / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* октябрь. 2016. №10 |47|. С. 54-58.
17. Сайчук А.В. Технология производства корпусных деталей из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* январь. 2017. №1 |50|. С. 54-58.
18. Особенности структурообразования в чугунах при их выплавке и кристаллизации / Скобло Т.С., Сайчук А.В., Сидашенко А.И., Манило В.Л. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* январь. 2017. №11 |60|. С. 56-58.
19. Сайчук А.В. Сіряк Б.С. Відновлення дефектів корпусних деталей модифікуванню вторинною сировиною. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* март. 2018. №3 |64|. С. 53-58.
20. Качество чугуна при различных способах модифицирования его магнием / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., Рыбалко И.Н. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* май. 2015. №5 |29|. С. 56-58.
21. Сайчук А.В. Позняков Н.Г., Кохан И.Р. Анализ методов упрочнения и восстановления гильз цилиндров автотракторной техники. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Випуск 96. Х.: ХНТУСГ, 2010 С. 475-481.
22. Способ восстановления и повышения свойств рабочей поверхности деталей / Сайчук А.В., Телятников В.В., Марков А.В., Рыбалко И.Н. *Информационно-*

аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе» октябрь. 2014. №10 |22|. С. 56-57.

23. Спосіб оцінки якості виробів з сірого чавуну неруйнівним методом: пат. 100780 Україна, МПК: G01N 27/82, G01N 27/00 № u201501491; заявл. 20.02.15; опубл. 10.08.2015, Бюл. №15.

24. Спосіб рівномірного нагріву конусної різнотовщинної металевої форми струмами промислової частоти: пат. 105644 Україна, МПК (2016.01) C21D 1/00 C21D 1/34 (2006.01) № u 201510204. заявл. 19.10.15.; опубл. 25.03.16., Бюл. № 6.

25. Спосіб підвищення якості відновлення тонкостінних виробів з сірого чавуну: пат. 114950 Україна, МПК B23K 9/04 (2006.01), B23K 35/22 (2006.01) № u201610481; заявл. 17.10.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. №6.

26. Спосіб відновлення та зміцнення деталей: пат. 48353 Україна, МПК: B24B 39/00 (2009). № u200910791; заявл. 26.10.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. №5.

27. Спосіб відновлення та підвищення властивостей робочого шару деталей: пат. 92472 Україна, МПК: B23K 26/00 (2014.01). № a201403324; заявл. 01.04.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. №16.

28. Спосіб оцінки якості виробів неруйнівним методом: пат. 95287 Україна, МПК G01N 27/82 (2006.01). № a201406020; заявл. 02.06.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. №24.

29. Сайчук О.В. Економічна ефективність від відновлення дефектів лиття при виробництві корпусних деталей. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 13. С. 143-148.

Праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

30. Saychuk A. Rybalko I. Method of defects restoring in parts made from gray cast iron by hardfacing with recyclable materials modifying. *9-th International conference of young scientists on welding and related technologies Proceedings* Kyiv, Ukraine, 23-26 May 2017. P. 156-159.

31. Сайчук А.В. Комбинированный способ восстановления деталей сельскохозяйственной техники. *Материалы восемнадцатой международной научно-производственной конференции. «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT-технологий»*, 26-27 мая, БелГСХА им. В.Я. Горина, 2014. 188 с.

32. Сайчук О.В. Розробка нового технологічного процесу відновлення корпусних деталей з сірого чавуну. *Збірник тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Підвищення надійності машин і обладнання»*. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 137-138.

33. Сайчук О.В. Обґрунтування інноваційної технології відновлення втулок циліндрів з високоміцного чавуну. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф.* 23-25 травня, ДДТУ. м. Кам'янське, 2018. С. 213-215.

Праці які додатково відображають наукові результати дисертації:

34. Исследование микроструктуры после комбинированных методов упрочняющей обработки / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні*. Випуск 106. Х.: ХНТУСГ, 2010. С. 13-16.

35. Разработка способа предварительного поверхностного упрочнения деталей при газотермическом напылении / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., и др. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»*. Випуск 110. Х.: ХНТУСГ, 2011. С. 93-98.

36. Экономическая эффективность восстановления деталей машин плазменно-порошковым методом / Сайчук А.В., Харьяков А.В., Науменко А.А., Беловол В.С. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»* Випуск 110. Х.: ХНТУСГ, 2011. С. 336-341.

37. Разработка технологии восстановления с использованием лазерного луча / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., Манило В.Л. *Науковий вісник ЛНАУ присвячений 111-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка*. 2011. №30. С. 257-265.

38. Анализ процессов легирования при нанесении покрытий лазерным лучом / Сидашенко А.И., Скобло Т.С., Сайчук А.В. и др. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»* Випуск 122. Х.: ХНТУСГ, 2012. С. 56-63.

39. Теоретическое обоснование температуры нагрева детали при механизированной наплавке по винтовой линии для проведения термомеханической обработки / Сидашенко А.И., Скобло Т.С., Сайчук А.В., Манило В.Л. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»* Випуск 133. Х.: ХНТУСГ, 2013. С. 15-22.

40. Оценка качества литых стальных изделий неразрушающим методом / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., и др. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»* август. 2014. №8 |20|. С. 56-57.

АНОТАЦІЯ

Сайчук О.В. Теоретичні та технологічні основи керування структурою і властивостями чавунів різного функціонального призначення. – На правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, м. Харків, 2018.

У дисертаційній роботі виконано науково обґрунтовані розробки у галузі матеріалознавства, які забезпечили вирішення актуальної науково-технічної проблеми обґрунтування нових технологій виробництва і відновлення деталей з чавуну, що використовуються у машинобудуванні та розробляються на основі особливостей структуроутворення.

Розв'язання проблеми базувалося на дослідженнях та вивченні чинників, які знижують якісні показники деталей у виробництві і експлуатації.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблені нові технологічні процеси, які дозволили корегувати структуроутворенням у втулках гільз циліндрів з високоміцного чавуну, що виробляються відцентровим методом відливання з використанням різновисхідної металевої форми.

Для забезпечення необхідного співвідношення фазового складу, відсутності формування карбідної фази, одержання однорідної структури розроблено спосіб контрольованої кристалізації деталей як по їх перетину, так і висоті виливка.

Це стало можливим завдяки рівномірного підігріву різнотовщинної металевої форми перед заливанням металу з використанням струму промислової частоти.

Розроблена технологія підігріву СПЧ передбачає використання циклічного режиму нагрів-охолодження. Для досягнення стабілізації процесу достатнім є три цикли обробки.

Для підвищення якості корпусних деталей з сірих чавунів розроблено технологію їх відновлення в умовах виробництва, яка передбачала виявлення відхилень від діючої технології та на цій основі створено новий підхід до відновлення дефектів, що формуються як в процесі відновлення, так і при експлуатації.

Нова технологія передбачає якісне відновлення заплавлення дефектів вуглецевим електродом з дозованим модифікуванням рідкого розчину нано- та дисперсною домішкою спеціальною вторинною детонаційною сировиною, яка одержана від утилізації боєприпасів і включає алмази, графіт мідь та залізо.

Нові технологічні процеси супроводжувалися розробкою бракувальних норм, згідно неруйнівного контролю якості.

Впровадження результатів нових розробок, захищених патентами на ВАТ «ХТЗ» в об'ємі 348 корпусів з підвищеними експлуатаційними властивостями складає 746,999 тис. грн. на рік.

Ключові слова: контрольована кристалізації, модифікування, чавун, нано- та дисперсні домішки, властивості, керування структуроутворенням, наплавлення, вторинна сировина.

АННОТАЦІЯ

Сайчук А.В. Теоретические и технологические основы управления структурой и свойствами чугунов различного функционального назначения. – На правах рукописи

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко Министерство образования и науки Украины, г. Харьков, 2018.

В диссертационной работе выполнены научно обоснованные разработки в области материаловедения, которые обеспечили решение актуальной научно-технической проблемы обоснования новых технологий производства и восстановления деталей из чугунов, используемых в машиностроении и разрабатываемых на основе особенностей структурообразования.

Разработки выполнены на основе детального изучения причин отказов по несоответствию структуры и механических свойств относительно действующей нормативно-технической документации, а также с учетом характера формирования дефектов и повреждаемости отливок при их производстве и эксплуатации.

Для выявления отклонений в структуре и качестве отливок разработаны браковочные нормы, оцениваемые неразрушающим методом таких деталей. Контроль осуществляли магнитным методом при использовании анализатора КРМ-

Ц-К2М с различными размерами магнитных преобразователей по H_c , а также при использовании комплексных методов (оптической и электронной микроскопии, термоэлектронной эмиссии, спектрального и локального анализа компонентов, микротвёрдости, механических характеристик и разработки новых методик оценки структурообразования).

Для обеспечения необходимых свойств, структуры и качества втулок гильз цилиндров предложена новая технология их отливки центробежным методом путем контролируемой скорости кристаллизации в металлической разнотолщинной форме. Формирование однородной структуры по периметру и высоте формы достигнуто за счет предварительного ее нагрева перед заливкой ТПЧ по циклическому режиму нагрев-охлаждение. При такой технологии в различных зонах по толщине формы обеспечивается близкая температура внутренней ее поверхности до 330-390°C и это достигается уже через три цикла обработки. Такая технология обоснована теоретически, а также подтверждена экспериментально и по сравнению с печным нагревом позволяет повысить КПД процесса с 60 до 80% и увеличить эксплуатационную стойкость оснастки на 15%.

Известно, что изделия из серого чугуна эффективны в производстве, однако они не технологичны при сварке (формируются поры, трещины), что связано с большой разницей в температурах плавления такого материала и стального электрода.

Для решения проблемы качественного восстановления корпусных деталей из серого чугуна на основе экспериментальных и теоретических исследований показано, что снизить температуру жидкой ванны на $\sim 300^\circ\text{C}$ возможно при дозированном ее модифицировании вторичным сырьем – детонационной шихтой, полученной и специально подготовленной при утилизации боеприпасов (содержит: нано- и дисперсные алмазы, графит, медь и железо). Использование такого материала в качестве модифицирующей присадки позволяет не только снизить температуру жидкой ванны, но и существенно изменить число взаимосвязей формируемых фаз (оценено новым подходом на основе метода оптико-математического описания изменений в различных зонах), уменьшить зону термического влияния.

Новизна научных разработок защищена 6 патентами Украины.

Экономический эффект от внедрения технологии в условиях ОАО «ХТЗ» составил 746,999 тыс. грн. в год при объеме внедрения 348 корпусов из серого чугуна.

Ключевые слова: контролируемая кристаллизация, модифицирование, чугун, нано- и дисперсные примеси, свойства, управление структурообразованием, наплавка, вторичное сырье.

ABSTRACT

O. Saichuk. Theoretical and technological bases of control of the structure and properties of pig iron of various functional purposes. - Manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.02.01 - Material Science. – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Kharkiv, 2018.

In the dissertation work, scientifically substantiated developments in the field of materials science were carried out, which provided a solution to the current scientific and technical problem of justifying innovative technologies for the production and restoration

of cast iron parts used in engineering and are developed on the basis of structural features.

The solution to the problem was based on research and investigation of failures causes due to structural mismatch and mechanical properties of current technical documentation, as well as nature of defects and damage formation of castings during its production and exploitation.

To identify deviations in structure and quality of castings rejection norms of such details estimated by the non-destructive method of such details were developed. The control was carried out by a magnetic method using the KRM-C-K2M analyzer with different size of magnetic transducers in H_c , as well as complex methods (optical and electron microscopy, thermionic emission, spectral and local analysis of components, microhardness, mechanical characteristics and development of new evaluation techniques structure formation).

To provide necessary properties, structure and quality of cylinder liners, the innovative technology for its casting by centrifugal method by controlling of crystallization rate in a metallic multilayer form is proposed. Formation of a homogeneous structure along the perimeter and height of form was achieved by means of its pre-heating before filling of AC current in a cyclic heating-cooling mode. Using such technology in different zones along mold thickness a close internal surface temperature of 330-390°C is provided and it can be achieved in as little as three processing cycles. This technology is justified theoretically, and also confirmed experimentally and, in comparison with furnace heating, it allows to increase the efficiency of the process from 60 to 80% and to increase the serviceability of the tooling by 15%.

It is known that gray cast iron products are effective in production, but they are not technologically efficient during welding (pores and cracks are formed), which is connected with large difference in melting temperatures of such material and steel electrode.

To solve the problem of the qualitative restoration of gray cast iron hull details, it is shown on the basis of experimental and theoretical studies that reduction of water-bath temperature by $\sim 300^\circ\text{C}$ is possible by means of its proportioned modification with secondary raw materials - a detonation charge obtained and prepared specially for ammunition disposal (it contains: nano- and micro-diamonds, graphite, copper and iron). Use of such material as a modifying additive allows not only to lower the temperature of water bath, but also to change the number of interactions of the phases formed significantly (estimated by a new approach based on method of opticomathematical description of changes in various zones), and to reduce the zone of thermal influence.

Novelty of scientific development is protected by 6 patents of Ukraine.

Implementation of the results of new developments protected by patents at Trading House "KhTZ" in the volume of 348 body frames with increased operational properties is 746.999 UAH per year.

Key words: controlled crystallization, modification, cast iron, nano-and disperse impurities, properties, control of structuring, surfacing, secondary raw materials.

Підписано до друку 18.09.2018 р.

Формат 60x84 1/16. Обл.-вид. арк. 2. Тираж 120 прим.
Друк цифровий. Папір офсетний. Замовлення №
Видавництво та друк ТОВ «Діса плюс»
61029, Україна, м. Харків, шосе Салтівське, буд. 154

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 4047 від 15.04.2011 р.

