ΡΕΦΕΡΑΤ

Магістерська робота за темою «Підвищення зносостійкості та ресурсу роботи упорів проміжних дисків гальмівних механізмів автотракторної техніки шляхом їхнього поверхневого зміцнення з локальним оплавленням»: 73 с., 11 табл., 15 рис., 34 джерел.

ФРИКЦІЙНИЙ ЧАВУН, ГАЛЬМІВНІ КОЛОДКИ, АУСТЕНІТ, МАРТЕНСИТ, КАРБІДИ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ЛАЗЕРНА ОБРОБКА, ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА, ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ.

Об'єкт дослідження – електронно-променева та лазерна зміцнювальна обробка фрикційних марганцевих чавунів аустенітного класу.

Мета магістерської роботи – удосконалення технології виготовлення гальмівних колодок з аустенітного марганцевого чавуну шляхом їхнього поверхневого зміцнення з локальним оплавленням електронним або лазерним променем.

Методи дослідження – метод кінцевих різниць, методи математичної статистики, методи вимірювання твердості та мікротвердості, методи визначення інтенсивності зношування.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан технологій зміцнення чавунів електронно-променевою та лазерною обробкою. Показано, що чавуни найбільш доцільно обробляти з локальним оплавленням поверхні. Обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

У другому розділі наведено методику досліджень.

У третьому розділі запропоновано дві інженерні методики розрахунку основних параметрів режиму електронно - променевої та лазерної обробки.

У четвертому розділі експериментально оптимізовано хімічний склад зносостійких аустенітних марганцевих чавунів з використанням методики повного факторного експерименту 2³, а також підтверджено достовірність математичних моделей, розроблених у третьому розділі.

3MICT

	C.					
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ						
ВСТУП	5					
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОННО - ПРОМЕНЕВОЇ						
ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНІВ						
2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ						
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ	24					
ЛАЗЕРНІЙ ТА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ						
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ						
4.1 Аналіз вихідних даних. Методика проведення експерименту						
4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту						
4.3 Побудова неповної квадратичної регресійної моделі						
4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії						
4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії	56					
4.3.3 Перевірка адекватності регресійної моделі експерименту	58					
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	64					
ВИСНОВКИ						
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ						

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

Н – мікротвердість, МПа.

НВ – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

 δ – відносне подовження, %.

 σ_m – межа текучості, МПа.

 σ_{e} – межа міцності, МПа.

 $\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості, МПа.

 σ_{-1} – границя втоми, МПа.

 ψ – відносне звуження, %.

 μ – коефіцієнт Пуасона.

А – поглинальна здатність матеріалу, що обробляється.

W_p – просторовий розподіл потужності в плямі фокусування.

φ(t) – функція, що описує тимчасову структуру імпульсу.

Ре-число Пєклє.

Fo – число Фур'є.

Т – температура деталі.

τ_u – тривалість імпульсу.

t – час нагрівання або охолодження.

δ₁ – товщина плівки, через яку здійснюється теплообмін.

δ₂ – товщина двошарової системи "плівка - основа".

α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні основи.

T_c – температура охолоджувального середовища.

о – швидкість руху джерела нагрівання.

Р – ефективна теплова потужність джерела нагрівання.

q – щільність теплового потоку.

ВСТУП

Використання електронно-променевої та лазерної обробки для зміцнення та підвищення зносостійкості матеріалів шляхом зміни структури поверхневого шару або нанесення покриттів стало об'єктом пильної уваги вчених та інженерів - матеріалознавців завдяки унікальним можливостям цих технологій. Станом на сьогодні виконано достатньо великий об'єм досліджень у цьому напрямку. Існують результати промислової апробації та використання у конкретних виробничих процесах технологій електронно променевого і лазерного зміцнення, які доводять їхню високу ефективність та перспективність.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНІВ

Чавуни, також само як і сталі, з самого початку вивчення впливу лазерного зміцнення на структуру та властивості залізовуглецевих сплавів стали об'єктом уваги фахівців. Це було обумовлено щонайменше двома обставинами: 1) чавуни (як білі, так і графітизовані) являють собою логічне продовження сплавів системи залізо-вуглець, фактично завершуючи серію цих сплавів; 2) чавуни, особливо графітизовані чавуни, відрізняються багатофакторністю відгуку на поверхневе опромінення (як лазерне, так і електронно-променеве); при цьому водночас збільшується цілий комплекс характеристик чавунів: твердість, міцність, зносостійкість, корозійна стійкість.

Слід також зауважити на те, що чавуни знаходять широке застосування у машинобудуванні; це обумовлено їхніми високими ливарними властивостями, хорошою оброблюваністю різанням, невеликою чутливістю до поверхневих дефектів.

У науковій літературі найменша увага приділяється дослідженню впливу лазерного та електронно-променевого опромінювання на структуру та властивості білих чавунів. Це обумовлено тим, що білі чавуни у будь-якому разі кристалізуються згідно метастабільної діаграми "залізо - цементит".

При поверхневому лазерному оплавленні білих чавунів, в оплавленій зоні, в якій температура залізовуглецевого сплаву знаходиться вище лінії ліквідус, формується високодисперсна стовбчаста аустенітно-ледебуритна структура [1; 2]. Перший шар зони нагрівання містить дисперсну ледебуритну евтектику: діаметр прошарків аустеніту, що входить до складу ледебуритної евтектики, не перевищує 0,5 мкм. Відокремлені аустенітні зерна також характеризуються невеликим розміром, що є наслідком високошвидкісної кристалізації із значним переохолодженням [3]. У другому шарі спостерігається нагрівання сплаву між критичною точкою A_{c1} та лінією солідусу. У процесі нагрівання (лазерного або електронно-променевого) відбувається повне перетворення перліту в аустеніт. При подальшому високошвидкісному охолодженні аустеніт,що утворився на стадії нагрівання, переходить у мартенсит. Мартенсит має характерну голчасту структуру. При цьому спостерігається зменшення розміру зерен мартенситу по мірі віддалення від обробленої поверхні: більш дрібнозерниста структура мартенситу відповідає меншій температурі нагрівання.

Більш складні структурні перетворення відбуваються у цементиті. В оплавленому шарі утворюється голчаста структура вторинного цементиту: голки вторинного цементиту розташовуються усередині аустенітних зерен – фактично утворюється відманштетова структура. Така морфологія вторинного цементиту в оплавленому шарі обумовлена високою швидкість охолодження із розплавленого стану. Верхня частина другого (не оплавленого) шару, що напряму контактує з оплавленим шаром, містить видозмінений вторинний цементит, який має підвищену мікротвердість (12700 - 14800 МПа). Слід зауважити, що мікротвердість цементиту, що знаходиться за межами зони термічної обробки, не перевищує 8400 - 9400 МПа [4]. Ділянки, що було сформовані як за участю вторинного цементиту, так і за участю аустеніту, що входить до складу ледебуриту, отримали назву «z - складової» або «байковиту».

У роботі [5] було проведено рентгеноструктурне дослідження шарів, що утворились при імпульсному лазерному нагріванні синтетичного білого чавуну, що містить близько 3 % вуглецю. У поверхневій зоні був виявлений лише аустеніт, α - фаза та карбіди цементитного типу в оплавленому шарі відсутні. Тобто, у процесі високошвидкісного охолодження із розплавленого стану увесь вуглець розчиняється в аустеніті. Починаючи з 0,5 % вуглецю, кожний 0,1 % вуглецю, розчинений в аустеніті, знижує температуру початку перетворення "аустеніт-мартенсит" на 19,6°С [6]. Якщо здійснити екстраполяцію вищезгаданої залежності в область більш високого вмісту вуглецю, виявиться, що температура початку мартенситного перетворення повинна знаходитись в області кріогенних температур. Це припущення При підтверджується експериментальними ланими. подальшому охолодженні оплавленого чавуну до кімнатної температури (20°С), також само, як і при його охолодженні у рідкому азоті (-196°С), утворення мартенситу не відбувається. Із результатів проведених розрахунків витікає, що аустеніт має містити близько 3,1 % вуглецю. Схожі результати відносно концентрації вуглецю в аустеніті (2,7 - 3,1 % С) були отримані при вимірюванні періоду решітки у-фази. Мікротвердість у-фази (6100 - 6370 МПа) також відповідає концентрації розчиненого в неї вуглецю на рівні 3,1 %. Все це дозволяє зробити висновок про те, що в умовах імпульсного опромінення білого чавуну з поверхневим оплавленням може утворюватись надзвичайно стабільний аустеніт з надвисоким вмістом вуглецю.

Набагато більш широке застосування знаходить лазерне та електроннопроменеве зміцнення графітизованих чавунів. При лазерній обробці використовуються як імпульсні, так і безперервні лазери. Найчастіше лазерна обробка графітизованих чавунів здійснюється із поверхневим оплавленням.

Лазерній обробці найчастіше піддаються чавуни з перлітною або перлітно-феритною металевою основою [1, 2, 4]. Зона термічного впливу (зона обробки) складається з двох шарів. Структура першого шару формується в умовах високошвидкісного охолодження з розплавленого стану. Цей шар має високодисперсну аустенітно-цементитну структуру. У разі обробки безперервним лазером, діаметри головних вісей дендритів аустеніту та цементиту практично не залежать від потужності лазерного випромінювання. Зростання дендритів відбувається під певним кутом до поверхні зразка, що обробляється [7]. Це можна пояснити наступним: коли зразок, що обробляється, переміщується відносно лазерного променя, створюється додаткова різниця температур вздовж напрямку переміщення зразка. Після лазерної обробки відстань між вісями дендритів зменшується у чотири рази, середній діаметр вісей зменшується майже у 60 разів. Виходячи з розміру дендритів, можна стверджувати, що швидкість охолодження у першому оплавленому шарі складає не менше ніж 5·10³°C/с. За таких умов кристалізація відбувається згідно метастабільної діаграми "залізо цементит", тому у першому шарі утворюється структура білого чавуну. У проміжках між дендритами аустеніту розташовується дрібнодисперсний ледебурит [8].

Таким чином, при лазерній обробці сірих чавунів, на відміну від лазерної обробки сталей, зміцнювального ефекту можна досягти за рахунок поверхневого оплавлення із подальшим прискореним охолодженням із рідинного стану, внаслідок чого відбувається відбілювання чавуна.

У разі обробки з поверхневим оплавленням, незважаючи на невелику тривалість дії лазерного опромінення, відбувається повне розчинення включень графіту у рідинній фазі. За таких умов досягається надвисока концентрація розчиненого вуглецю в аустеніті з одночасним збільшенням більше ніж на порядок корозійної стійкості [10].

Включення графіту розчиняються неповністю лише у нижній частині першого шару, оскільки температура нагрівання у цій області була трохи вищою за температуру солідуса [11].

У сучасній літературі [12, 13] наводяться різні дані щодо швидкості охолодження чавунів з розплавленого стану при лазерній та електроннопроменевій обробці – від $5 \cdot 10^3$ до 10^5 °C/с. Незважаючи на досить великий інтервал можливих швидкостей охолодження, навіть мінімальна швидкість охолодження гарантовано перевищує критичну швидкість. Дані щодо вмісту мартенситу та залишкового аустеніту у шарі, що утворюється внаслідок гартування з рідкого стану, є досить суперечливими. Найчастіше вміст мартенситу та залишкового аустеніту визначається рентгеноструктурним аналізом, електронною мікроскопією, ядерною гамма-резонансною спектроскопією. При цьому робиться висновок про те, що перший шар, загартований з рідкого стану, містить: 40 - 50% залишкового аустеніту, 30 % мартенситу, 15 - 35 % цементиту. Для надшвидкісного охолодження з рідкого стану таке співвідношення між вмістом мартенситу та залишкового аустеніту є цілком природнім, оскільки вміст розчиненого вуглецю в аустеніті складає 1,3 - 1,5 % [12].

Мікротвердість першого шару, що формується внаслідок надшвидкісного охолодження із рідкого стану, може змінюватись у дуже широких межах – від 6700 до 14200 МПа. Значний вміст залишкового аустеніту не призводить до суттєвого зменшення мікротвердості. Це пояснюється ефектом фазового наклепу аустенітної фази та високою щільністю дислокацій.

У роботі [14] було досліджено вплив температури відпуску на структурні перетворення в оплавленому шарі, сформованому при лазерній обробці сірих чавунів. Встановлено, що навіть тривалий відпуск (від 2 до 4 годин) при температурі, що не перевищує 200°С, не призводить до розпаду аустеніту. Різке зменшення вмісту залишкового аустеніту спостерігається при збільшенні температури відпуску до 300°С. Розпад залишкового аустеніту супроводжується деяким збільшенням мікротвердості оплавленого шару [14]. У разі збільшення температури відпуску до 400°С, розпадається не тільки залишковий аустеніт, але і мартенсит гарту. Це призводить до зменшення мікротвердості.

Швидкість охолодження чавунів з розплавленого стану при лазерній та електронно-променевій обробці з локальним поверхневим оплавленням може варіюватись у дуже широких межах. Це, насамперед, обумовлено відмінностями в режимах обробки, що, в решті решт, призводить до суттєвих відмінностей у глибині оплавленого шару, а глибина оплавленого шару, у свою чергу, є одним з найбільш значимих параметрів, що визначають швидкість охолодження. При досягненні певної критичної швидкості охолодження, кристалізація чавуна з розплавленого стану може піти за іншими механізмами, що не можуть бути описані класичною діаграмою стану "залізо - цементит" та відомими термокінетичними діаграмами розпаду переохолодженого аустеніту, оскільки замість аустеніту із розплаву виділяються зовсім інші фази. При швидкості охолодження з рідинного стану не менше $5 \cdot 10^{50}$ C/c в сірому чавуні, що містить 3,8 % C та 4,7 % Si [15, 16], утворюються метастабільні є та є'-фази, а також χ -фаза, що має орторомбічну кристалічну гратку.

Подальше збільшення швидкості охолодження з рідкого стану може призвести до утворення аморфної структури. Аморфна структура в оплавленому шарі чавуна, що піддавався обробці імпульсним лазерним випромінюванням, була зафіксована у роботі [16]. Оброблюваний чавун містив 3,20 % вуглецю; 2,67 % кремнію; 0,64 % марганцю; 0,014 % сірки і 0,06 % фосфору. Цікавим є те, що хімічний склад оброблюваного чавуна не є типовим для сплавів з аморфною структурою: чавун не містить бор, який активно сприяє утворенню аморфної фази, а концентрація фосфору, котрий також є активним елементом - аморфізатором, є дуже низькою. В оплавленому шарі, у безпосередній близькості до границі оплавлення, було ділянки, в яких були повністю відсутні будь-які ознаки виявлено кристалічної структури. Таких ознак не було виявлено навіть після дослідження структури загартованого шару з використанням електронного мікроскопа. Вміст вуглецю в цих ділянках складає біля 6 %, а мікротвердість цих ділянок дорівнює близько 12000 МПа. Після 2-годинного відпуску при температурі 400°С мікротвердість цих ділянок зростає на 500 - 1000 МПа. При кристалізації аморфної фази під час відпуску утворюється байковит. Байковит є дрібнодисперсною сумішшю, до складу якої входять аустеніт та цементит. При цьому, аустеніт розташований вздовж кристалографічних площин Fe₃C (001) [15].

Інша особливість будови зони термічного впливу, що утворюється при лазерній обробці сірих чавунів із локальним поверхневим оплавленням, полягає у невеликій товщині другого шару порівняно із товщиною першого шару, сформованого внаслідок надшвидкісного охолодження із рідинного стану. Відносно невелика товщина другого шару обумовлена тим, що цей

шар формується в досить вузькому інтервалі температур (мається на увазі інтервал температур між температурою солідусу та температурою, що відповідає критичній точці A_{c1}). Слід також мати на увазі, що сірі чавуни містять підвищену кількість кремнію, який сприяє підвищенню критичної точки A_{c1}, що призводить до ще більшого звуження інтервалу температур, в якому формується структура другого шару.

Усі структурні перетворення, що мають місце у другому шарі, відбуваються лише у твердій фазі. На етапі нагрівання відбувається перетворення перліту в аустеніт. При подальшому охолодженні з великою швидкістю відбувається утворення мартенситу згідно класичних термокінетичних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту. Включення графітної фази частково розчиняються в аустенітній фазі. Ступінь розчинення графіту в аустеніті збільшується із збільшенням температури нагрівання. Саме тому товщина включень графіту у верхній частині другого шару значно менша за товщину включень графіту у нижній частині другого шару. В деяких випадках, залежно від режимів обробки, може відбуватись часткова сфероїдізація графітних включень. Таким чином, структура другого шару, що утворюється при лазерній обробці сірих чавунів, мастить дрібноголчастий мартенсит, залишковий аустеніт та включення графу. Мікротвердість другого шару [15, 16] складає 7000 - 14000 МПа.

Слід зауважити, що другий шар може містити оплавлені ділянки, що утворюються при контактному плавленні навколо великих включень графітної фази або фосфідної евтектики [15].

Якщо лазерна або електронно-променева обробка сірого чавуна проводяться без локального поверхневого оплавлення [10, 11], вибілений шар не утворюється. В такому разі зміцнювальний ефект може бути досягнений лише за наявності мартенситного перетворення. При цьому слід враховувати відносно невелику товщину зміцненого шару, що має мартенситну структуру. Невелика товщина зміцненого шару обумовлюється досить вузьким інтервалом температур, в якому можливе утворення цього шару (у більшості випадків ширина цього температурного інтервалу, що заключний між температурою солідусу та критичною точкою A_{c1}, дорівнює близько 150°С). Ця обставина накладає суттєві обмеження на поверхневе зміцнення сірих чавунів без їхнього локального поверхневого оплавлення.

У роботі [16] запропоновано технологію зміцнення сірих чавунів лазерним випромінюванням з попередньою деграфітизацією поверхневого шару. При такій обробці замість вибіленого шару утворюється шар, що має однорідну структуру мартенситу гарту. Включення графітної фази відстані утворюються тільки деякій від поверхні. Недолік на запропонованого способу полягає в тому, що зміцнений шар містить оксидні включення.

Окрім нелегованих сірих чавунів, для зміцнення лазерним та електронним променем використовувались леговані чавуни марок ХНМЧ та СЧХНМД [17]. В цілому, закономірності формування структури зміцненого шару при обробці легованих сірих чавуні мало чим відрізняються від закономірностей формування структури зміцненого шару при обробці нелегованих сірих чавунів. Однак, внаслідок більш низької теплопровідності легованих чавунів, задля того, щоб отримати зміцнений шар достатньої довжини, необхідно суттєво зменшувати швидкість обробки (порівняно з обробкою нелегованих сірих чавунів). Легований чавун проявляє меншу схильність до утворення тріщин та газових пор. У разі обробки легованих чавунів без локального поверхневого оплавлення, в структурі зміцненого шару містяться дрібноголчастий бейніт, карбіди та пластинчастий перліт.

У роботі [18] досліджувався вплив лазерної обробки на структуру високоміцного чавуна ВЧ 60-2: структура металевої матриці – сорбітоподібний та тонкопластинчастий перліт. Кулясті включення графітної фази розчиняються у розплаві повільніше, ніж пластинчасті включення. Тому у першому оплавленому шарі частина включень графітної фази залишається нерозчиненою. Однак мікротвердість першого шару, що утворюється в чавуні ВЧ 60-2 (9000-10000 МПа) перевищує мікротвердість першого шару, що утворюється в сірих чавунах СЧ 18-36 та ХНМЧ (7500 - 8500 МПа) [18].

Цей феномен може бути пояснений двома факторами: наявністю у складі чавуна магнію, що має модифікуючу та вибілюючу дією; високою дисперсністю металевої матриці високоміцного чавуна. 3a рахунок підвищеної дисперсності металевої матриці у високоміцному чавуні зменшується дифузійний шлях атомів вуглецю під час перетворення перліту в аустеніт і збільшується довжина міжфазних границь між феритом та цементитом, на яких відбувається зародження кристалів аустенітної фази. Співставлення результатів, отриманих при лазерній обробці високоміцного чавуна, за результатами, отриманими при лазерній обробці сірих чавунів, призводить до висновку, що структура металевої матриці та її дисперсність чинять більш суттєвий вплив на структуру загартованого шару, ніж форма включень графітної фази в чавунах.

У другому шарі, сформованому при лазерній обробці манієвого чавуну ВЧ 60-2, міститься мартенсит, залишковий аустеніт та графітна фаза. Нижня частина другого шару, що сформувався при гартуванні з твердого стану, містяться залишки вихідного перліту. Наявність залишків перліту у другому загартованому шарі обумовлена високою швидкістю нагрівання і, як наслідок, неповним перетворенням перліту в аустеніт.

Залишки перліту у загартованому шарі також було виявлено під час зміцнення лазерним променем колінчастих валів, виготовлених з магнієвого чавуна (3,74 % вуглецю; 2,14 % кремнію; 1,3 % марганцю; 0,04 % хрому; 0,11 % нікелю; 0,069 % магнію; 0,051 % фосфору; 0,011 % сірки). Після нормалізаційного відпалу, проведеного при температурі 890°С) металева матриця містить 85 - 95 % перліту та 5 - 15 % фериту. Наявність залишків перліту в нижній частині другого зміцненого шару сприяє зменшенню кількості залишкового аустеніту. У верхній частині другого зміцненого шару залишків перліту немає, а вміст залишкового аустеніту (близько 30 %) є більш високим, ніж у нижній частині цього ж самого шару. Верхня частина другого зміцненого шару містить, окрім мартенситу, бейніт. Утворення бейніту може бути обумовлене дендритною ліквацією у вихідній структурі чавуна. Велика кількість факторів, що впливають на формування структури другого зміцненого шару, є основною причиною того, що мікротвердість цього шару може змінюватись в достатньо широких межах: 6000 - 9000 МПа.

У процесі відпуску загартованих чавунів [12, 14] при температурі нижче 500°С залишковий аустеніт розпадається. При розпаді залишкового аустеніту збільшується мікротвердість чавуні. Максимум збільшення мікротвердості спостерігається при температурі відпуску 350 - 400°С. При температурі відпуску більше 500°С спостерігається сильне зниження твердості загартованих чавунів внаслідок того, що відбувається коагуляція цементитної фази. За таких же самих умов відпуску твердість загартованого високоміцного чавуна додатково знижується внаслідок графітизації. При цьому твердість загартованого високоміцного чавуна стає меншою за твердість загартованого сірого нелегованого чавуна (СЧ 20 тощо).

Висока швидкість графітизації загартованого високоміцного чавуна у процесі високотемпературного відпуску може бути пояснена наступними причинами: високою концентрацією в чавуні кремнію (3,2 %), який є сильним графітизатором; неоднорідним розподілом вуглецю та кремнію у твердому розчині, що формується в умовах надшвидкісного охолодження (при наступному відпуску відбувається прискорення дифузії вуглецю); високою дисперсністю ледебуритної евтектики, що збільшує довжину між аустенітною та цементитною фазами. Графітизація границь загартованого шару може відбуватись і в разі відпуску сірих чавунів, але для цього необхідні більш високі температури.

При лазерному зміцненні ковкого чавуна КЧ 35-10, що має феритну металеву матрицю [14], безперервними та імпульсними лазерами з локальним поверхневим оплавленням, структура першого оплавленого шару при його подальшій кристалізації формується згідно метастабільної діаграми стану "Fe-Fe₃C". Усередині першої (оплавленої) зони домінуючою

структурною складовою є ледебурит, а по периферії – великі аустенітні дендрити. Як свідчить рентгеноструктурний аналіз, вміст розчиненого вуглецю в аустеніті складає близько 2 % вуглецю. Мікротвердість аустеніту суттєво залежить від типу лазерного випромінювання, що використовується для обробки чавуна. У разі імпульсного випромінювання твердість аустеніту складає 6700 МПа, у разі безперервного випромінювання – 4700 МПа. При використанні імпульсного випромінювання вдається досягнути більш високої швидкості охолодження і, відповідно, біль високої щільності дефектів кристалічної гратки. Це, зокрема, і зумовлює суттєву різницю У імпульсного мікротвердості аустенітної фази при використанні та безперервного лазерного випромінювання. Мікротвердість евтектичного цементиту, незалежно від типу лазерного випромінювання, залишається однаковою, а саме 9200 - 10000 МПа.

Другий шар містить подрібнені і деформовані феритні зерна. Мікротвердість феритної фази зростає з 1500 МПа у вихідному стані до 2200-2500 МПа (як при імпульсній, так і при безперервній лазерній обробці).

Аустеніт, що утворюється при обробці чавуна безперервним лазерним характеризується більш випромінюванням, високою стійкістю проти відпуску у порівнянні з аустенітом, що утворюється при обробці чавуна імпульсним лазерним випромінюванням. Підвищення температури відпуску супроводжується інтенсифікацією розпаду аустеніту з утворенням механічної суміші фериту та графіту. На початкових етапах графітизації може відбуватись деяке збільшення мікротвердості. Але такий ефект досягається при відносно невеликій температурі відпуску, при перевищенні якої стрімко мікротвердість знижуватись. Такою починає граничною температурою відпуску для чавуна, зміцненого імпульсним лазерним випромінюванням, є 200°С, для чавуна, зміцненого безперервним лазерним випромінюванням – 300°С.

Обробку високоміцних та сірих чавунів з локальним поверхневим оплавленням використовують, в основному, задля того, щоб отримати високу

абразивну зносостійкість. Але останнім часом з'являються статті, автори яких вказують на можливість використання обробки високоміцних та сірих чавунів з локальним поверхневим оплавленням для підвищення фрикційних властивостей чавунів [17, 18]. Переважна більшість фрикційних чавунів містять графіт у вигляді пластинчастих включень [19 - 34]. Фрикційні чавуни не повинні містити грубі включення ледебуриту. Вміст вторинного цементиту у фрикційних чавунах не може перевищувати 8 %. Задля того, щоб підвищити фрикційні властивості чавунів, до їхнього складу додають фосфор. Але фосфор, сприяючи підвищенню фрикційних властивостей чавунів, водночас значно погіршує їхню тріщиностійкість в умовах термоциклювання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Вплив фосфору на зносостійкість, твердість і тріщиностійкість фрикційних сірих чавунів

	існта НВ	Характеристики зносостійкості			ИІ	
1c. %		Збільшення коефіцієнта тертя, % Твердість чавуну, HB		при сухому терті	ПЦИКЛ	
Вміст фосфору, ма	Вміст фосфору, м		Твердість чавуну,	Швидкість зношування у процесі прироблення, мкм/г	Зношування при торцевому терті на машині И47-К54, мг/г	Відносна зносостійкість при терті котіння із ковзанням, %
0,05	101	173	17 - 18,5	261	101	139
0,12	113	181	14 - 14,4	183	113	131
0,17	123	190	10,5 - 11,1	167	117	125
0,31	129	197	8,9 - 10,5	150	131	113
0,54	133	219	7,6 - 8,8	131	143	85
0,95	139	226	7,1 - 7,9	115	155	72
1,34	145	234	6,3 - 7,3	109	164	61
1,84	149	242	5,7 - 6,8	86	177	35

Обробка 3 поверхневим локальним оплавленням € ОДНИМ 3 перспективних напрямків підвищення фрикційних властивостей чавунів [21-25]. Оплавленню має піддаватись не уся контактна поверхня гальмівного елементу, а приблизно 40 % від загальної площі контактної поверхні [18]. Оброблені зони містять вибілений шар, що має високу твердість та зносостійкість. Необроблені зони мають вихідну структуру сірого чавуну, що не містить карбідної фази. Вибілений шар, що утворюється при локальному характеризується поверхневому оплавленні, високою дисперсністю структури, в якій відсутні крупні включення ледебуриту. За рахунок того, що під час обробки досягаються надвисокі швидкості охолодження із рідинного стану, замість ледебуриту із розплаву виділяються високодисперсні карбіди, які потім рівномірно розташовуються у металевій основі. Високодисперсний вибілений шар забезпечує суттєве підвищення фрикційних властивостей чавунів при одночасній відсутності абразивного впливу на гальмівний диск. Пластинчастий графіт, що залишається в необроблених зонах гальмівних відігравати продовжує роль твердого колодок, мастила, зменшуючи інтенсивність зношення елементів трибосполучення.

Обробка з поверхневим локальним оплавленням дозволяє відмовитись від використання легованих фрикційних чавунів (чавунів, легованих бором, фосфором, алюмінієм [18].

При оптимізації технології обробки фрикційних чавунів з оплавленням поверхні актуальними є наступні завдання:

1. Оптимізація глибини проплавлення для отримання максимально дисперсної структури вибіленого шару.

2. Розрахунок та вибір оптимальних режимів обробки для отримання заданої глибини проплавлення.

3. Оптимізація хімічного складу чавунів під задані режими обробки.

Усі ці завдання вирішуються індивідуально з урахуванням специфіки роботи гальмівного вузла.

2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Установка призначена для обробки матеріалів електронним променем у вакуумі до 6,6·10⁻³ Па (напилювання покриттів, термічна обробка, паяння, зварювання) (рис. 2.1).

До складу електронно-променевої установки входять:

1. Електронно-променева апаратура ЕЛТА-60.

2. Силова шафа.

3. Стояк керування.

4. Пульт керування.

5. Пристрій технологічної розгортки електронного променя.

6. Системи формування початку і закінчення зварювального процесу.

7. Додаткові пристрої і системи електронно-променевої апаратури ЕЛТА
- 60: пристрій низькочастотної технологічної розгортки; система фіксованого відхилення електронного променя; пристрій відеоконтролю; система реєстрації і документування параметрів процесу обробки; відеосистема; принтер; робоче місце оператора; форвакуумний та паромасляний насоси.

Вакуумпроводи 12 та 13 призначені для з'єднання комплекту форвакуумних насосів 3 з вакуумною камерою 1, а також з комплектом паромасляних насосів, один з яких входить до складу вакуумної станції 4. Вакуумпроводом 14 призначений для під'єднання паромасляного насосу вакуумної станції 4 до електронної гармати 5. Для електроживлення електронної гармати 5 призначене високовольтне джерело живлення 6, яке підключається до електронної гармати через високовольтний кабель 15. Високовольтний кабель 16 призначений для підключення високовольтного джерела живлення 6 до керуючої лампи 7. Механічні форвакуумні насоси 3 встановлені за межами лабораторії.

Особливості установки ЕЛТУ-60.15/1.1: вакуумна система управляється автоматизовано; електронно-променева обробка може здійснюватись в ручному і в автоматичному режимі за заданою технологічною програмою; виведення на

екран монітора поверхні виробу, що обробляється, і точне наведення електронного променя на необхідну точку поверхні виробу в режимі малих струмів; діагностика функціонування основних компонентів комплексу; – технологічна розгортка електронного променя по колу, еліпсу, лінії.



Рисунок 2.1 – Блок-схема електронно-променевої установки: 1 – вакуумна камера; 2 – станина; 3 – механічні форвакуумні насоси; 12, 13, 14 – вакуумпроводи; 15, 16 – високовольтні кабелі; 4 – вакуумна станція та енергокомплекс ЕЛТА-60, що складається з електронної гармати 5, високовольтного джерела живлення 6, блока керуючої лампи 7, силової шафи 8, пульта керування 9, шафи керування 10, відеопристрою 11

До складу базової частини електронно-променевої апаратури ЕЛТА-60 входять: електронно-променева гармата; високовольтне джерело живлення; силова шафа; стояк керування; пульт керування.

Електронна гармата 5 (рис. 2.1) дозволяє формувати, прискорювати, фокусувати та відхиляти потік електронів. Електронна гармата містить наступні

основні вузли: джерело електронів 1, проміжний корпус 2, систему фокусування та відхилення потоку електронів (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Схема електронно-променевої гармати: 1 – джерело електронів;
2 – проміжний корпус; 3 – система фокусування та відхилення електронного променя за допомогою електромагнітних котушок 8; 4 – заземлений анод;
5 – електрод для фокусування електронного променя; 6 – ізолятор; 7 – фокусуюча електромагнітна лінза; 9 – шлюзовий механізм; 10 – привод шлюзового механізму; 11 – патрубок, призначений для під'єднання вакуумпроводу від паромасляного насоса; 12 – катодний вузол

Утворення вільних електронів відбувається за механізмом термоелектронної емісії. Електрони емітуються з поверхні катода. Катод представляє собою таблетку, виготовлену з гексабориду лантану. Нагрівання таблетки відбувається внаслідок того, що вона бомбардується електронами, які емітуються поверхні нагрівача прискорюються напругою, 3 та ЩО прикладається між нагрівачем та катодом.

Нагрівач представляє собою танталовий дріт діаметром 0,2 мм, для закріплення якого використовується спеціальний тримач. Для проходження електронного променя до виробу, що обробляється, призначений отвір, виконаний у заземленому аноді 4, що підключається до позитивної клеми високовольтного джерела живлення. Для фокусування електронного променя призначений фокусуючий електрод 5. Фокусуючий електрод 5 розташований між анодом 4 та катодом. До фокусуючого катоду прикладається напруга, що регулює електропровідність гармати. Прискорювальна напруга (30 - 60 кВ) прикладається між фокусуючим електродом 5 та анодом 4.

Пройшовши заземлений анод 4, підключений до позитивної клеми основного джерела живлення (30 - 60 кВ), електрони починають рухатись рівномірно (без прискорення), але, внаслідок того, що електрони мають заряд одного знака, вони починають відштовхуватись один від одного. Через це відбувається збільшення діаметру променя електронів.

Задля того, щоб збільшити щільність енергії в електронному пучку, після того, як електрони проходять анод 4, відбувається їхнє фокусування. Для фокусування променя електронів призначена електромагнітна лінза 7. Конструктивно ця лінза представляє собою котушку, намотану на немагнітний каркас, через котру пропускається постійний струм. Потрапивши у магнітне поле, створене електромагнітною лінзою, електронний промінь фокусується на певній відстані від котушки. Положення точки, в якій фокусується електронний промінь, залежить від величини струму, що протікає через котушку електромагнітної лінзи. Задля того, щоб переміщувати електронний промінь відносно деталі по тій або іншій траєкторії, призначена магнітна відхиляюча система 8. Вона встановлена після фокусуючої лінзи 7. Магнітна відхиляюча система містить чотири котушки, які попарно встановлені в пази магнітопроводу. Зміщення кожної пари котушок відносно іншої пари складає 90°. За рахунок цього досягається відхилення електронного променя у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

У проміжному корпусі електронної гармати 2, за допомогою якого здійснюється з'єднання джерела електронів 1 та системи фокусування та відхилення електронного променя 3, знаходиться шлюзовий механізм 9. Шлюзовий механізм відділяє джерело електронів від решти об'єму вакуумної системи та пушки. В якості привода шлюзового механізму використаний електричний двигун 10. Відкачування електронної гармати з метою створення в неї високого вакууму здійснюється через патрубок 11, розташований у проміжному корпусі 2. Високий вакуум в електронній гарматі створюється окремим паромасляним насосом.

У корпусі джерела електронів 1 та системи фокусування і відхилення потоку електронів змонтовано охолоджувальну систему. Для охолодження верхньої частини катодного вузла 12 використовується кремнійорганічна рідина. Для відведення надлишкової теплоти від кремнійорганічної рідини призначений спеціальний змійовик, що назовні охолоджується проточною водою.

Електронно-променева гармата може встановлюватись як зовні робочої вакуумної камери, так і усередині неї в будь-якому просторовому положенні. Вага і габаритні розміри електронно-променевої гармати дозволяють встановлювати її усередині робочої вакуумної камери на маніпуляторі.

Конструктивні особливості електронної гармати: катод з непрямим підігрівом, виконаний з монокристала LaB₆, емітує потік електронів, що формується далі в аксіально-симетричний електронний пучок; прикатодний керуючий електрод (електрод Венельта) забезпечує формування заданого значення струму електронного променя; анод, що має корпусний потенціал, забезпечує прискорення електронів (до катода прикладена напруга прискорювальна напруга 30-60 кВ) до необхідної швидкості у напрямі оброблюваної поверхні. Для отримання гостросфокусованого електронного пучка, служить фокусуюча лінза. Для відхилення електронного пучка на кут до 7 градусів від осі гармати застосована електромагнітна відхильна система. У разі, коли електронно-променева гармата встановлюється усередині вакуумної підведення всіх необхідних комунікацій камери, для до гармати використовується прохідний фланець (гермоввод). На фланці встановлені всі необхідні прохідні роз'єми, штуцери, що забезпечують введення/виведення води для охолоджування гармати. Також на фланці є спеціальний отвір для високовольтного кабелю Цей В камеру гармати. фланець введення встановлюється в зручному місці на вакуумній камері.

Високовольтне джерело живлення функціонально складається з наступних вузлів: джерела прискорювальної напруги; джерела напруги і зсуву.

В якості джерела прискорювальної напруги в апаратурі ЕЛТА-60 використовується високовольтний блок з високочастотним перетворювачем, побудованим i3 застосуванням сучасних потужних напівпровідникових елементів, виготовлених по ІGBT-технології. Конструкція і схемотехнічне рішення, закладені В джерелі прискорювальної напруги, дозволяють здійснювати плавний вихід на робочий режим прискорювальної напруги при його включенні і приглушення електричних розрядів в електронно-променевій гарматі у разі їх виникнення.

Основні характеристики джерела живлення:

-час виходу на робочий режим прискорювальної напруги при включенні: 0,2 - 2 с;

-час, протягом якого прискорювальна напруга відключена в результаті виникнення розряду в електронно-променевій гарматі: 2 - 100 мс;

-час виходу на робочий режим прискорювальної напруги після переривання в результаті виникнення розряду в електронно-променевій гарматі: 5 - 125 мс;

-пульсації прискорювальної напруги: ≤ 100 В;

-зміна прискорювальної напруги при зміні навантаження в межах 0 - 100%: не більше 100 В;

коефіцієнт корисної дії джерела живлення при повному навантаженні:
 ≥90 %.

Оптимальні значення вказаного часу встановлюються оператором.

Основою джерела напруги і зсуву є блок напруги і зсуву, що забезпечує регулювання струму електронного пучка і живлення катода електроннопроменевої гармати. Високовольтний блок і блок напруги та зсуву знаходяться в баку з трансформаторним маслом, яке виконує як роль високовольтного ізолятора, так і охолоджувача. У свою чергу, відведення тепла від трансформаторного масла здійснюється водяною системою охолоджування. Циркуляція трансформаторного масла усередині бака забезпечується за допомогою спеціального насоса.

Силова шафа виконана у стандартному 19" - стояку, усередині якого встановлюються: регулятор напруги; блок стабілізаторів; силовий блок.

Регулятор напруги працює спільно з високовольтним блоком високовольтного джерела живлення. Регулятор напруги здійснює контроль і стабілізацію прискорювальної напруги.

Блок стабілізаторів забезпечує стабілізацію струму електронного променя, струму бомбардування, індикацію напруги зсуву. Силовий блок є набором комутаційних пристроїв, що забезпечують підключення апаратури до мережі живлення, а також автоматичне включення і відключення апаратури. Силова шафа встановлюється на відстані, не більше 1 м від високовольтного джерела живлення.

У стояку управління розміщені такі блоки: системний блок промислового комп'ютера (індустріальне виконання) з набором модулів введення/виведення;

панель управління; мікроконтролер Simatic S7-200 (на базі CPU 224); вторинні джерела живлення; блок управління.

Широкофункціональний і високонадійний програмований логічний контроллер SIMATIC S7-200 фірми SIEMENS забезпечує контроль і аналіз сигналів зворотних зв'язків, а також: включення/відключення мережі живлення; аварійне відключення прискорювальної напруги i катода гармати; включення/відключення режиму тренування гармати; включення та відключення регулятору зміни прискорювальної напруги в режимі тренування гармати; індикацію прискорювальної напруги.

На панелі пульта керування розташовані такі органи керування і індикації: включення/відключення прискорювальної напруги; включення/відключення гармати; живлення катода регулятор струму бомбардування; аварійне відключення прискорювальної напруги і катода електронного гармати; регулятор струму променя; регулятор струму фокусування.

Пристрій (генератор) технологічної розгортки виробляє сигнали, що дозволяють здійснювати технологічну розгортку електронного пучка по колу.

Частота генератора регулюється ступінчасто, забезпечуючи набір частот технологічної розгортки: 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 і 1200 Гц.

Максимальний кут відхилення електронного променя від осі електроннопроменевої гармати складає 3 град.

Розгортка електронного променя здійснюється за допомогою керуючої програми.

Система формування початку і закінчення процесу обробки. Система дозволяє здійснювати керування струмом електронного променя на початку процесу обробки та струмом фокусування при закінченні процесу обробки. Струм електронного променя на початку процесу обробки (перехід з режиму СТОП в режим ОБРОБКА) зростає до встановленого значення за лінійним законом протягом встановленого часу. Тривалість початку обробки може бути встановлена від 0 до 10 с з дискретністю 1 с. При закінченні процесу обробки (перехід з режиму ОБРОБКА у режим СТОП), за заданими програмами за встановлений час змінюється струм електронного променя і струм фокусування. Програма розбита на 20 інтервалів, на кожному з яких струм електронного променя може приймати значення 0 - 1,2 крат від встановленої величини струму електронного променя, а струм фокусування – 0,9 - 1,1 крат від встановленої величини струму фокусування. Тривалість закінчення процесу обробки може бути встановлена в діапазоні 2...140 с з дискретністю одна секунда.

Додаткові пристрої і системи електронно-променевої апаратури ЕЛТА -60. Базова частина електронно-променевої технологічної апаратури ЕЛТА-60 може комплектуватись однією або декількома пристроями і системами, що розширюють її можливості. Отже, вибір необхідних пристроїв і систем дозволяє одержати електронно-променеву технологічну апаратуру ЕЛТА-60, максимально адаптовану для вирішення поставлених завдань. До додаткових пристроїв і систем відносяться: пристрій низькочастотної технологічної розгортки; система фіксованого відхилення електронного променя; пристрій відео контролю SeoTECH VIDEO; система реєстрації і документування основних параметрів процесу обробки; робоче місце оператора; вакуумна камера; вакуумна система; маніпулятор.

Пристрій низькочастотної технологічної розгортки забезпечує низькочастотну технологічну розгортку електронного променя по колу подачею струмів синусоїдальної і косинусоїдальної форми на відхиляючі котушки X–X і Y–Y електронно-променевої гармати. При включеній високочастотній розгортці забезпечується накладення розгорток і регулювання параметрів кожної з розгорток.

Система фіксованого відхилення електронного пучка дозволяє відхиляти електронний промінь на необхідний фіксований кут від осі електроннопроменевої гармати в будь-якому напрямі. Здійснюється це подачею фіксованих струмів на відхиляючі котушки X-X і Y-Y електронно-променевої гармати.

Основні характеристики системи відхилення електронного пучка:

1. Максимальний кут відхилення від осі гармати: не більше 7 град.

2. Діапазон зміни струмів відхилення в котушках X-X і Y-Y: ± 600 мА.

3. Нестабільність струмів відхилення: $\pm 0,5\%$.

Встановлення фіксованого відхилення електронного променя здійснюється зміною величини струмів в котушках відхилення X–X і Y–Y у межах – 600…+ 600 мА з дискретністю 1 мА.

Пристрій відеоконтролю дозволяє здійснювати спостереження поверхні виробу, що обробляється, і забезпечує точне наведення електронного променя на поверхню виробу, що обробляється. Виведення зображення здійснюється на екран монітора ПЕОМ. Точне наведення електронного променя забезпечується за рахунок встановлення маркера у формі перехрестя на зображення поверхні виробу, що обробляється.

Основні характеристики пристрою відеоконтролю: розмір зображення: 256×256 пікселів; розмір контрольованої ділянки виробу при відстані від нижнього краю електронно-променевої гармати до виробу 100 мм: не менше 20×20 мм; формат збереження зображення: jpg, bmp; швидкість виведення зображення на екран монітора: при повільній розгортці 2 кадр/с, при швидкій розгортці – 4 кадр/с.

Поточне зображення може бути збережено і при необхідності виведено на екран монітора в інтерфейсі програми. Оптимальне за чіткістю і різкістю зображення може бути одержано як за допомогою регулювань, що знаходяться в меню програми, так і встановленням максимально допустимого значення струму електронного променя, або фокусуючої лінзи електронно-променевої гармати.

Система реєстрації і документування основних параметрів процесу обробки здійснює запам'ятовування: струму електронного променя; струму

фокусування; напруги на катоді Венельта; струму бомбардування; прискорювальної напруги в процесі обробки.

У окремому вікні інтерфейсу керуючої програми забезпечується побудова залежностей струмів і напруг, заданих на початку обробки, та реальних значень цих струмів та напруг від часу обробки. Ці залежності можуть бути збережені на диск і при необхідності виведені на екран монітора в інтерфейсі програми.

Відеосистема забезпечує: візуалізацію на екрані додаткового монітора зони ДЕТАЛЬ – ГАРМАТА у робочому об'ємі (у вакуумній камері); спостереження процесу обробки та процесу формування обробленого шару; виключення необхідності використання оператором оглядових вікон в робочій камері у процесі обробки.

До складу відеосистеми входять: ССD відеокамера SPT-M32OCE (Sony); монітор SSM-930CE (Sony).

Принтер призначається для виведення на друк необхідної інформації, а саме: одержаного зображення при використанні ПВК; графіків, одержаних при використанні системи моніторингу і документування процесу обробки.

Робоче місце оператора включає в себе: стіл для розміщення монітора промислового комп'ютера, монітора відеосистеми і пульта керування; стілець.

Пристрій відеоконтролю (ПВК) SeoTECH VIDEO призначений для формування цифрового зображення поверхонь виробів, що обробляються електронним променем. Одержане зображення виводиться на екран монітора комп'ютера і дозволяє забезпечити точне наведення електронного променя на необхідну точку поверхні виробу, що обробляється.

При використанні ПВК: забезпечується точність наведення електронного променя в задану точку не менше ± 0,05 мм; забезпечується швидкість виведення зображення, що є достатньою для точного наведення електронного променя та виключає появу сліду на поверхні виробу; надається можливість запам'ятовування одержуваного зображення, а також виведення заздалегідь збереженого зображення на екран монітора і на принтер.

Робота ПВК основана на прийомі і декодуванні сигналу, що надходить з датчика вторинних електронів при роботі електронно-променевої апаратури в режимі малих струмів (0,5…1,0 мА).

При скануванні поверхні деталі сфокусованим електронним струмлом за

допомогою відхиляючої системи відбувається вибивання вторинних електронів з поверхні деталі. Потік вторинних електронів уловлюється металевою пластиною. Інтенсивність цього потоку залежить від величини струму електронного пучка і рельєфу сканованої поверхні. Сигнал, одержаний з датчика вторинних електронів і посилений відеопідсилювачем, оцифровується в кожній точці растра. Набуте значення струму вторинних електронів зберігається у вигляді масиву значень в пам'яті комп'ютера. Потім, при виведенні зображення на екран монітора, масив значень зчитується і відображається у вигляді набору пікселів різної яскравості, прямо пропорційної інтенсивності потоку вторинних електронів.

Вакуумна камера зварна, безкаркасного типу, прямокутної форми із знімною кришкою. Внутрішні розміри камери: 1400x1200x700 мм. Мінімальний залишковий тиск у камері на рівні 1,5·10⁻⁴ мм рт. ст. забезпечується за час, що не перевищує 30 хвилин Час досягнення необхідного вакууму може збільшитьсь, якщо відбуватиметься обробка матеріалу, що містить розчинені гази.

Камера виготовляється з нержавіючої сталі. Конструкція камери забезпечує необхідну механічну міцність – деформація камери під вакуумом відсутня. На задній стінці камери встановлені три фланці для під'єднання вакуумної системи і введення необхідних комунікацій всередину камери.

Доступ в робочий об'єм камери здійснюється через двері. Двері відкриваються і закриваються вручну. На дверях встановлено оглядове вікно. Оглядове вікно двошарове. Воно має внутрішнє ілюмінаторне скло, товщина якого складає 30 мм. Внутрішнє скло призначене для сприйняття усіх навантажень від атмосферного тиску. За внутрішнім склом знаходиться спеціальне захисне скло Тф-5, яке має трохи більший діаметр, ніж внутрішнє скло. Товщина захисного скла залежить від прискорювальної напруги та струму електронного променя. Товщина захисного скла обирається таким чином, щоб надійний забезпечити захист оператора установки від гальмівного випромінювання. Ілюмінаторне рентгенівського скло має періодично очищуватись з внутрішньої сторони тампоном, змоченим в ацетоні, бензині або у технічному спирті, для видалення залишків матеріалів, що осаджуються на скло з парової фази.

Конструкція механізму переміщення, відкривання і закривання дверей з забезпечує при закриванні надійне стикання вакуумного ущільнення дверей з площиною дверного отвору камери, а при відкриванні – надійний зазор між вакуумним ущільненням дверей і камерою. Механізм дозволяє легко регулювати ступінь притиснення дверей до початку процесу вакуумування і встановлювати її оптимальне положення.

Вакуумна система, схема якої наведена на рис. 2.3, призначена для створення і підтримки у процесі роботи необхідного вакууму в робочому об'ємі вакуумної камери.



Рисунок 2.3 – Схема вакуумної системи

Вакуумна система включає в себе наступні елементи: форвакуумний агрегат N1, що складається з пластинчасто-роторного (N1a) та двороторного

(N1b) вакуумних насосів; паромасляні насоси N2 та N3; вакуумні клапани V1, V2, V3, V4, V5; вакуумні датчики P1, P2 і P3; вентиль V4 для напуску повітря.

Комутація силових кіл керування здійснюється в силовому блоці. Управління вакуумною системою здійснюється контролером (PLC) SINATIC-S7-200 за допомогою керуючого комп'ютера.

Комплектність вакуумної системи:

1. Форвакуумний агрегат N1: E2M175/EH1200 (EDWARDS) – 2 шт. Комрлектність: пластинчасто-роторний насос E2M175 – 1шт; двороторний насос EH1200 – 1 шт.

2. Паромасляні насоси N2 та N3 НВДМ-250 – 2 шт. Комплектність: корпус з паропроводом – 1 шт.; нагрівач – 1 шт.

3. Вакуумний клапан з електромагнітним приводом V1: КВМ-63 – 1 шт.

4. Вакуумний клапан з електромагнітним приводом V4 і V5: КВМ-25 – 2 шт.

5. Вакуумний затвор з електромеханічним приводом V2: 23ВЭ-100 – 1 шт.

6. Вакуумний затвор з електромеханічним приводом V3: 23ВЭ-250 – 1 шт.

7. Датчики вакууму (EDWARDS):

-низьковакуумний датчик P1 i P2: APG-L-MW16 – 2 шт.;

-високовакуумний датчик РЗ: AIM-X-NW25 – 1 шт.

8. Силовий блок – 1 шт.

9. Силові кабелі і сигнальні джгути – 1 комплект.

10. Водяні шланги – 1 комплект.

Маніпулятор встановлюється у вакуумну камеру для лінійного переміщення і обертання виробу, що обробляється. Характеристики маніпулятора: точність позиціонування: +0,005 мм; швидкість переміщення: до 20 мм/с.

Маніпулятор може бути одно- або двокоординатний. Обертачі, які використовуються для обертання деталей, можуть бути з вертикальною або горизонтальною віссю обертання.

Система позиціонування включає в себе: прецизійні лінійні столи переміщення і обертач; датчики переміщення; крокові приводи.

Прецизійні лінійні столи переміщення дозволяють встановлювати вироби вагою до 500 кг. Столи мають стандартний фланець для кріплення двигунів NEMA-34. Столи обладнані датчиками переміщення кінцевими i мікровимикачами, що обмежують хід столу. Для захисту частин, що труться між собою, стіл оснащений захисним металевим кожухом. Для здійснення обертання виробу, що обробляється, на маніпуляторі може бути встановлений обертач. Обертач забезпечує: максимальну вагу встановлюваного виробу на рівні 90 кг; максимальну швидкість обертання на рівні 15 об/хв. Обертач має фланець кріплення двигунів NEMA-34. стандартний Обертач може встановлюватися як в горизонтальному, так і у вертикальному положенні.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ТА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ

Теплове джерело, еквівалентне дії лазерного та електроннопроменевого променя при поверхневій обробці металевих матеріалів, є поверхневим і розподіленим, оскільки метали мають великий коефіцієнт поглинання ($\alpha = 10^4 - 10^6$ см⁻¹), тобто практично уся енергія випромінювання поглинається у вузькому поверхневому шарі (скін-шарі), і радіус плями нагрівання набагато більше глибини дифузії тепла (r₀ >> (at)^{1/2}).

Остання обставина дає підставу розглядати задачу про знаходження температурного поля у напівнескінченому тілі при дії концентрованого джерела енергії як одномірну. У цьому випадку температурне поле можна знайти, вирішуючи класичне рівняння теплопровідності виду:

$$\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = -\frac{q(z,t)}{k}, \qquad (3.1)$$

де T – температура матеріалу у довільній крапці з координатами *x, y, z* у момент часу t;

а – коефіцієнт температуропровідності матеріалу;

k – коефіцієнт теплопровідності;

q – кількість тепла, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу, яка залежить від координат x, y, z і часу t.

При рішенні цієї задачі граничними і початковими умовами є $\partial T/\partial z$ (0, t) = 0, інакше кажучи, за час дії теплового джерела немає теплообміну поверхні, що опромінюється, з навколишнім середовищем. Т (∞ , t) = T (z, 0) = 0, тобто зразок, що опромінюється, є напівнескінченим тілом, яке має в початковий момент часу температуру T_н = 0.

При обробці матеріалів лазерними імпульсами мілісекундної тривалості, які одержуються при роботі лазера в режимі вільної генерації [5]:

$$q(z, t) = AW_{p} \cdot \varphi(t), \qquad (3.2)$$

де А – поглинальна здатність матеріалу, що обробляється;

W_p – просторовий розподіл щільності потужності випромінювання в плямі фокусування;

 $\phi(t)$ — функція, що описує тимчасову структуру імпульсу; для квазістаціонарного режиму випромінювання при формі імпульсу, близькій до прямокутного, $\phi(t) = 1$.

Загальним рішенням диференціального рівняння (3.1) у лінійній постановці, коли не враховуються температурні залежності теплофізичних констант і поглинальної здатності матеріалу, що опромінюється, з наведеними вище граничними і початковими умовами є вираз виду [5]:

$$T(z,t) = \frac{2AW_{p}\sqrt{at}}{k} \cdot \operatorname{ierf}\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right], \qquad (3.3)$$

де ierf [x] = $\int_{x}^{\infty} (1 - ierf(y)) dy - функція інтегралу імовірності;$

ierf (у) – функція помилки [8].

Температура T (0, t) на поверхні матеріалу, що опромінюється, у момент часу t, близький до тривалості τ лазерного імпульсу, може бути приблизно визначена як:

$$T(0,t) = \frac{2AW_{p}}{k} \sqrt{\frac{at}{\pi}}.$$
(3.4)

Диференціюванням виразу (3.3) за часом можна оцінити швидкість нагрівання поверхневого шару матеріалу протягом імпульсу:

$$\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{AW}_{\mathrm{p}}\sqrt{a}}{\mathrm{k}\sqrt{\mathrm{t}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{\mathrm{z}^{2}}{4\mathrm{at}}\right].$$
(3.5)

У наведених залежностях час поширення теплового потоку t приблизно дорівнює часу впливу лазерного випромінювання на матеріал, тобто практично співпадає з тривалістю лазерного імпульсу т. У реальних умовах після припинення дії теплового джерела в матеріалі відбувається процес вирівнювання температури.

При цьому у початковий момент часу після дії лазерного випромінювання відбувається просування ізотерми з фіксованою температурою вглиб матеріалу, а потім, після досягнення певної глибини z_{max} , має місце зворотне переміщення даної ізотерми. Для одномірного випадку температура будь-якої крапки матеріалу на осі теплового джерела, розташованої нижче площини z = 0, може бути визначена з виразу [6]:

$$T(z,t) = \frac{2AW_{p}\sqrt{a}}{k} \left[\sqrt{t_{0} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)} - \sqrt{t_{0} - t \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{a[t_{0} - t]}}\right)} \right]$$

При z = 0:

$$T(0,t) = \frac{2AW_{p}\sqrt{a}}{k} \left[\sqrt{\frac{t_{0}}{\pi}} - \sqrt{\frac{t_{0}-t}{\pi}} \right].$$
(3.6)

Максимальна глибина проникнення заданої ізотерми:

$$Z_{\max} = \sqrt{\frac{4at_{0}(t_{0} - t)\ln\sqrt{\frac{t_{0}}{t_{0} - t}}}{t}},$$
(3.7)

де t₀ – час досягнення заданою ізотермою максимальної глибини;

t – тривалість імпульсу;

Т₃ – задана температура нагрівання;

Т (0, t) – температура поверхні.

Залежність (3.7) добре апроксимується при b < 0,3 виразом:

$$\frac{Z_{\text{max}}}{\sqrt{\text{at}}} = \frac{1}{\sqrt{2b}}.$$
(3.8)

при 0,3 < b < 0,75 виразом:

$$z = 3,8 \cdot \exp[-3,3b],$$
 (3.9)

при 0,75 < b < 1 виразом:

$$z = 1,24(1-b).$$
 (3.10)

Швидкість охолодження матеріалу після закінчення дії теплового джерела, яка у сукупності зі швидкістю і температурою нагрівання в остаточному підсумку визначає всі фізичні процеси, пов'язані зі зміцненням, може бути визначена за формулою:

$$\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{AW}_{\mathrm{p}}\sqrt{a}}{\mathrm{k}} \cdot \left[\frac{\mathrm{exp}\left[-\frac{\mathrm{z}^{2}}{4\mathrm{at}}\right]}{2\sqrt{\pi t_{0}}} - \frac{1}{2\sqrt{\pi (t_{0}-t)}} \cdot \mathrm{exp}\left[-\frac{\mathrm{z}^{2}}{4\mathrm{a}(t_{0}-t)}\right] \right]$$
(3.11)

Поверхневу обробку матеріалів проводять із використанням різних покриттів, призначених для підвищення поглинаючої здатності або зносостійкості, а також інших характеристик поверхні. Матеріалами покриттів можуть бути різні речовини – оксиди, солі, нітриди, карбіди, бориди.

Для визначення раціональних технологічних режимів обробки таких матеріалів необхідне знання закономірностей зміни температурних полів у системі плівка-основа. Окремим аспектам дослідження теплового стану
таких двошарових об'єктів присвячені роботи [7, 9]. У них розглянуті деякі характерні риси процесів теплопереносу у тонкоплівочних системах під дією імпульсного випромінювання, вплив на температурний режим системи геометричних і теплофізичних параметрів плівки [4].

Характерні результати розрахунків для плівки з графіту і основи з високоміцного чавуну ВЧ - 55 наведені на рис. 3.1 - 3.3.

Представлені дані відповідають наступним значенням вихідних параметрів: $\delta_I = 1 \cdot 10^{-4} \, \text{м}; \, 2 \cdot 10^{-4} \, \text{м}; \, 3 \cdot 10^{-4} \, \text{м}; \, 4 \cdot 10^{-4} \, \text{м}; \, 6 \cdot 10^{-4} \, \text{м}; \, \delta_2 = (2 \cdot 10^{-3} + \delta_1)$ $\text{м}; \, \tau_u = 1 \cdot 10^{-3} c; \, \tau_\kappa = 1 \cdot 10^{-2} \, c; \, q = 2,5 \cdot 10^6 \, Bm/\text{m}^2; \, \alpha = 20 \, Bm/(cm^2 \cdot \circ C); \, T_c = 20^\circ C;$ $T_0 = 20^\circ C.$

Прийняті позначення:

 δ_1 – товщина плівки;

τ_k − час закінчення процесу обробки;

δ₂ - товщина двошарової системи "плівка - основа";

q – щільність теплового потоку, що підводиться до деталі;

τ_u-тривалість імпульсу;

α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні основи, що охолоджується;

T_c – температура охолоджувального середовища;

Т₀ – початкова температура основи.

Як показали проведені дослідження, через імпульсний характер теплопідводу, функція, що описує зміну температури плівки у часі, характеризується наявністю екстремуму. Причому час досягнення максимального значення температури на поверхні, що опромінюється, (l_{max}) збігається з часом закінчення імпульсу. По мірі ж віддалення від поверхні нагрівання спостерігається все більше запізнювання часу, що відповідає екстремуму температури, тобто тут час досягнення екстремуму перевищує τ_{μ} . Це перевищення тим більше, ніж більше віддалена від поверхні нагрівання



Рисунок 3.1 – Розподіл температури по товщині плівки у різні моменти часу т для $\delta_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ м: — Δ - - - нелінійна задача; — · — - лінійна задача при $t_{on} = 127^{\circ}$ C; — х — лінійна задача при $t_{on} = 327^{\circ}$ C; $\tau_{\mu} = 1 \cdot 10^{-3}$ c



Рисунок 3.2 – Зміна у часі температури поверхні нагрівання при різних значеннях товщини плівки δ_1 ; $\tau_{\mu} = 1 \cdot 10^{-3}$ с



Рисунок 3.3 – Розподіл температури по товщині плівки при $\tau_{\mu} = 1 \cdot 10^{-3} c$

Слід зазначити, що максимальні градієнти температури в плівці спостерігаються у початковий період теплопідводу. При цьому процес теплопереносу практично локалізується лише у порівняно невеликій зоні, яка безпосередньо прилягає до поверхні, що опромінюється. За її межами має місце незбурена В тепловому відношенні область. Що стосується особливостей теплопереносу у системі після процесу припинення тепловідводу, то тут характерною є наступна картина. Спочатку реалізується процес вирівнювання температури плівки через її вису теплопровідність. І закінчення деякого інтервалу часу, відбувається лише потім. після вирівнювання температури по товщині всієї системи. Помітимо, що в цьому останньому тимчасовому інтервалі, який відповідає вирівнюванню температури системи, температурні градієнти по товщині плівки малі, і плівка охолоджується практично як матеріальна точка.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Аналіз вихідних даних. Методика проведення експерименту

Метою досліджень є вивчення впливу поверхневої електроннопроменевої обробки на зносостійкість аустенітного чавуну у трибосполученні з контртілом із загартованої сталі 45 в умовах сухого тертя.

Випробовуваний марганцевий чавун аустенітного класу призначається для виготовлення гальмівних колодок (структура литого чавуну – аустеніт + графіт).

Електронно-променева обробка передбачала локальне оплавлення поверхні тертя колодок у вигляді ліній, що відстоять одна від одної на відстані 1 мм. Ширина зони розплавлення становила 1,2 - 1,5 мм, глибина проплавлення – 0,8 - 1,0 мм (рис. 4.1).

Триботехнічні випробування проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик (сталь 45, HRC 45-48) - колодка (аустенітний чавун) (рис. 4.2). Випробування на зносостійкість проводились в умовах сухого тертя при навантаженні Р = 250H і швидкості обертання ролика 300 об./хв. Кожне випробування дублювалось 3 рази (3 зразки на одне випробування). Тривалість кожного випробування — три хвилини. Після кожного випробування визначалась втрата маси ролика і колодки. Площа поверхні тертя становила 1,4 см². Втрата маси зразків визначалась на оптико-механічних вагах ВЛМ-001.



Рисунок 4.2 – Вид колодок після електронно-променевої обробки

Режими обробки представлені в табл. 4.1.

	1	n		•• /		•
		DOMENTIA	ATAIMTO IIIA T	ησιτατίαται σί	MODINI	212021/1D
<u>– I AU II И II X 4</u>		$- \mathbf{L} \subset \mathcal{K} \mathcal{U} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{U}$	$C \square C K \square O H H O - \Pi$	наменеког а	<i>H H H H K V</i>	311/2/3/6/1/8
Incontract	• •				pooni	Spashib
				1		

Параметр, одиниці виміру	Величина
Прискорювальна напруга, кВ	60
Струм променя, мА	10
Діаметр фокальної плями, мм	0,3 - 0,5
Струм фокусуючої лінзи, мА	750
Швидкість обробки, мм/с	10
Робоча відстань, мм	165
Вакуум, Па	$7 \cdot 10^{-3}$



Рисунок 4.2 – Конструкція зразків для триботехнічних випробувань

Проведення досліджень виконувалось з використанням методики повного факторного експерименту 2^3 [5]. Експеримент складався з 8 дослідів. У кожному досліді випробовувались зразки різного хімічного складу. Кожний дослід дублювався три рази. Факторами, що варіювались, були концентрації легуючих елементів в чавуні: Al (x₁), Mn (x₂), C (x₃). Умовний вміст легуючих елементів по верхньому та нижньому рівнях позначений через кодовані значення факторів "X_i = +1" і "X_i = -1". Верхній рівень "X_i = +1" відповідає максимальному вмісту легуючих елементів, нижній рівень "X_i = -1" – мінімальному їхньому вмісту.

В табл. 4.2 наведено середні значення питомої втрати маси зразків у вихідному стані, в табл. 4.3 – після електронно-променевої обробки з оплавленням.

Таблиця 4.2 – Матриця плану ПФЕ 2³ "Питома втрата маси зразків у вихідному литому стані"

Фактор, що варіюєтьс	Al, %	Mn, %	C, %		
Основний рівень	3,0	10,5	3,5	Середня питома	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	втрата маси ∆М,
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	г/см ²
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	
№ зразка	X_0	X1	X ₂	X ₃	Y (г/см ²)
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,857
2	+1	+1(3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,617
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,461
4	+1	+1(3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,561
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,263
6	+1	+1(3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,394
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,183
8	+1	+1 (3,5)	+1(12)	+1(3,8)	1,46

Графічне зіставлення експериментальних даних, наведених в табл. 4.2 і 4.3, дозволяє заключити, що хімічний склад чавуну по різному впливає на його зносостійкість залежно від термічної обробки. У вихідної литому чавуні підвищення вмісту вуглецю вище 3,2 % негативно позначається на його зносостійкості. Максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C (питома втрата маси – 0,461 г/см²). Після електронно-променевої обробки з поверхневим оплавленням максимальна зносостійкість досягається в чавуні, що містить вуглець по верхньому рівню – 3,8 %. Максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C (питома втрата маси – 0,061 г/см²). Звертає на себе увагу також і той факт, що зносостійкість литого нетермообробленого чавуну.

Фактор, що варіюєть	Al, %	Mn, %	C, %		
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	Середня питома
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	втрата маси ∆М,
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	г/см ²
Нижній рівень	2,5	9,0	3,2		
№ зразка	X_0	X ₁	X ₂	X ₃	Y (г/см ²)
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,383
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,281
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,232
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,297
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,078
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,131
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,059
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,084

Таблиця 4.3 – Матриця плану ПФЕ 2³ "Питома втрата маси зразків після ЕПО"



Рисунок 4.3 – Питома втрата маси зразків аустенітного чавуну (по дослідах) до і після електронно-променевої обробки

Для більш детального аналізу впливу електронно-променевої обробки на зносостійкість чавуну за результатами випробувань, наведених у табл. 4.3, була побудована регресійна математична модель, що описує вплив основних

легуючих елементів чавуну на питому втрату маси. Результати визначення питомої втрати маси чавуну по дублях представлені в табл. 4.4.

Фактор, що	Натураль	ні (фактичні) факторів					
варіюється	$\frac{1}{x_1 (\% \text{ Al})} = \frac{x_2 (\% \text{ Mn})}{x_2 (\% \text{ Mn})} = \frac{x_3 (\% \text{ C})}{x_3 (\% \text{ C})}$						
Основний рівень, x _{i0}	3,0	10,5	3,5				
Інтервал варіювання, Δх _і	0,5	1,5	0,3	значення функції відгуку (інтенсивності зношуванн			
Верхній рівень, x _{i(max)} (X _i = +1)	3,5	12,0	3,8	17CM			
Нижній рівень, x _{i(min)} (X _i = -1)	2,5	9,0	3,2				
№ досліду, u	Кодован відповідні і	ні значення фа їм (у дужках) значення	Номер дубля				
	X_1 (Al)	X_2 (Mn)	$X_{3}(C)$	1	2	3	
u = 1	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,37	0,384	0,381	
u = 2	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,282	0,294	0,28	
u = 3	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,229	0,23	0,243	
u = 4	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,29	0,3	0,28	
u = 5	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,082	0,08	0,07	
u = 6	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,12	0,14	0,13	
u = 7	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,061	0,066	0,054	
u = 8	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,079	0,08	0,087	

Таблиця 4.4 – Значення питомої втрати маси зразків по дублях

4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту

Основною метою даного пункту є визначення дисперсії та відносної помилки експерименту. Для їхнього знаходження необхідно провести ряд проміжних розрахунків:

1) розрахувати порядкові дисперсії;

2) знайти абсолютні та відносні помилки вимірювань функції відгуку в кожному досліді;

3) визначити довірчі інтервали для середніх значень функції відгуку в кожному досліді;

4) оцінити статистичну значимість отриманих значень порядкових

дисперсій, а також абсолютних і відносних помилок вимірювань функції відгуку;

5) оцінити відтворюваність експериментальних даних за критерієм Кохрена.

Порядкова дисперсія $S_{y_n}^2$ в кожному досліді визначається по формулі:

$$S_{y_{u}}^{2} = \frac{\sum_{g=1}^{n_{u}} (y_{u_{g}} - \overline{y}_{u})^{2}}{f_{u}}, \qquad (4.1)$$

$$\mathbf{f}_{\mathrm{u}} = \mathbf{n}_{\mathrm{u}} - \mathbf{l},\tag{4.2}$$

де g і n_u – відповідно номер дубля і кількість дублів в u - му досліді;

у_{и_g} – значення функції відгуку в g - му дублі u - го досліду;

 \overline{y}_u- середнє значення функції відгуку в u - му досліді;

 f_u – число ступенів свободи в u - му досліді при визначенні u - ї порядкової дисперсії $S_{y_u}^2$.

Для даних умов експерименту $n_u = 3$, $f_u = 3 - 1 = 2$ (у кожному досліді за результатами 3 дублів визначається 1 константа – порядкова дисперсія). Тоді вираз (4.1) можна переписати наступним чином:

$$\mathbf{S}_{y_{u}}^{2} = \frac{\sum_{g=1}^{3} (y_{u_{g}} - \overline{y}_{u})^{2}}{2}.$$
(4.3)

Порядкова дисперсія по виразу (4.3) розраховується для кожного и - го досліду.

Абсолютна помилка вимірювань в и - му досліді визначається з виразу:

$$\sigma_{y_{u}} = \sqrt{S_{y_{u}}^{2}},$$
 (4.4)

відносна помилка (далі по тексту – варіація) вимірювань – з виразу:

$$\mathbf{V}_{\mathbf{y}_{u}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}_{u}} \cdot 100\%}{\overline{\mathbf{y}}_{u}}.$$
(4.5)

Результати розрахунків порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань для вихідних даних, взятих з табл. 4.4, наведені в табл. 4.5.

Наведемо приклад розрахунку порядкової дисперсії, абсолютної помилки і варіації вимірювань у першому досліді (u = 1).

Порядкова дисперсія:

$$S_{y_{1}}^{2} = \frac{\sum_{g=1}^{3} (y_{1_{g}} - \overline{y}_{1})^{2}}{2} = \frac{(0.37 - 0.383)^{2} + (0.384 - 0.383)^{2} + (0.381 - 0.383)^{2}}{2} = 1.053 \cdot 10^{-4}$$

Абсолютна помилка вимірювань:

$$\sigma_{y_1} = \sqrt{S_{y_1}^2} = \sqrt{1,053 \cdot 10^{-4}} = 0,01.$$

Варіація вимірювань:

$$V_{y_1} = \frac{\sigma_{y_1} \cdot 100\%}{\overline{y}_1} = \frac{0,01 \cdot 100}{0,383} = 2,682(\%).$$

Порядкові дисперсії, абсолютні помилки і варіації вимірювань визначені по вибірках обмеженого об'єму (у даному експерименті кожний опит дублювався 3 рази). Тому неминуче виникає питання про те, з якою надійністю обчислені їхні значення або, що те ж саме, яка їхня статистична значимість.

Для оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань слід розрахувати довірчі інтервали для відповідних середніх значень функції відгуку \overline{y}_{u} (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань

и	g	у _{ug} по дублях, г/см ²	\overline{y}_{u} , Γ/cM^{2}	S ² _{yu}	$\sigma_{_{y_u}}$	V _{yu} , %
	1	0,37				
1	2	0,384	0,383	$1,053 \cdot 10^{-4}$	0,01	2,6
	3	0,381				
	1	0,282		_		
2	2	0,294	0,281	8,129·10 ⁻⁵	9,016·10 ⁻³	3,2
	3	0,28				
	1	0,229				4,4
3	2	0,23	0,232	$1,08 \cdot 10^{-4}$	0,01	
	3	0,243				
	1	0,29				
4	2	0,3	0,297	$1,572 \cdot 10^{-4}$	0,013	4,2
	3	0,28				
	1	0,082	0,078		5,26·10 ⁻³	6,7
5	2	0,08		$2,767 \cdot 10^{-5}$		
	3	0,07				
	1	0,12			6,873·10 ⁻³	5,2
6	2	0,14	0,131	$4,724 \cdot 10^{-5}$		
	3	0,13				
	1	0,061				
7	2	0,066	0,059	$2,729 \cdot 10^{-5}$	$5,224 \cdot 10^{-3}$	8,7
	3	0,054				
	1	0,079				
8	2	0,08	0,084	3,59·10 ⁻⁵	5,992·10 ⁻³	7,1
	3	0,087				
Сума	-	-	-	5,899· 10 ⁻⁴	-	-

Для розрахунку ширини довірчого інтервалу використовують співвідношення:

$$\Delta y_{u} = t_{1} \cdot \frac{\sigma_{y_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}, \qquad (4.6)$$

де t₁ – критерій Ст'юдента для визначення ширини довірчого інтервалу;

σ_{y_u} – абсолютна помилка вимірювання функції відгуку в u-му досліді (табл. 4.5):

n_u – кількість дублів в дослідах (n_u = 3).

Значення критерію Ст'юдента t_1 табульовані [6]. Для $n_u = 3$ і рівня значимості $\alpha = 0.05$ $t_1 = 2.45$.

З урахуванням (4.6) довірчий інтервал для середніх значень функції відгуку _{у задається виразом:}

$$\left(\overline{y}_{u} - t_{1} \cdot \frac{\sigma_{y_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}; \overline{y}_{u} + t_{1} \cdot \frac{\sigma_{y_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}\right).$$
(4.7)

Величину $\Delta y_u = t_1 \cdot \frac{\sigma_{y_u}}{\sqrt{n_u}}$ називають скорегованою помилкою вимірювань.

Значення порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань вважаються статистично значимими, якщо в кожному досліді скорегована помилка вимірювань Δу_и менше абсолютної помилки вимірювань σ_{у_и}:

$$\Delta \mathbf{y}_{\mathbf{u}} \le \mathbf{\sigma}_{\mathbf{y}_{\mathbf{u}}} \,. \tag{4.8}$$

Усі значення порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань є статистично значимими, оскільки в кожному досліді виконується умова (4.8) (табл. 4.6).

Після оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань перевіряють однорідність ряду дисперсій за критерієм Кохрена. Якщо ряд дисперсій однорідний, різні значення функції відгуку \overline{y}_{u} визначені з однаковою точністю. Якщо ряд дисперсій неоднорідний, різні значення функції відгуку визначені з різною точністю.

Таблиця 4.6 – Результати оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань

Номер досліду, <i>и</i>	ў _ч (табл. 4.5)	n _u	t_1	σ _{у_u} (табл. 4.5)	$\Delta y_{u} = t_{1} \cdot \frac{\sigma_{y_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}$	Довірчий інтервал	
1	0,383			0,01	9,502·10 ⁻³	(0,373; 0,392)	
2	0,281			9,016·10 ⁻³	8,349·10 ⁻³	(0,272; 0,289)	
3	0,232		2,45	0,01	9,621·10 ⁻³	(0,223; 0,242)	
4	0,297			0,013	0,012	(0,285; 0,308)	
5	0,078			/ 2,43	5,26·10 ⁻³	4,871·10 ⁻³	(0,073; 0,083)
6	0,131			6,873·10 ⁻³	6,364·10 ⁻³	(0,124; 0,137)	
7	0,059			5,224·10 ⁻³	4,837·10 ⁻³	(0,055; 0,064)	
8	0,084			5,992·10 ⁻³	5,549·10 ⁻³	(0,078; 0,089)	

Розрахункове значення критерію Кохрена обчислюється по формулі:

$$G^{pacy} = \frac{S_{y_u max}^2}{\sum_{u=1}^{N} S_{y_u}^2},$$
 (4.9)

де $S_{y_umax}^2$ – максимальна порядкова дисперсія.

Розрахункове значення критерію Кохрена (G^{расч}) порівнюється з його табличним значенням (G^{табл}), яке визначається по таблицях залежно від рівня

значимості α, числа ступенів свободи f_u і числа дослідів N: G^{табл}(α; f_u; N) [6]. Якщо G^{расч} < G^{табл}, ряд порядкових дисперсій однорідний, якщо G^{расч} > G^{табл}, ряд порядкових дисперсій неоднорідний.

Для даних умов експерименту f_u = 2; N = 8. По табл. 4.5 знаходимо максимальну порядкову дисперсію $\left(S_{y_u}^2\right)_{max} = 1,572 \cdot 10^{-4}$ і суму усіх порядкових

дисперсій $\sum_{u=1}^{8} S_{y_u}^2 = 5,899 \cdot 10^{-4}$. Тоді $G^{pacy} = \frac{1,572 \cdot 10^{-4}}{5,899 \cdot 10^{-4}} = 0,267$. Прийнявши рівень значимості $\alpha = 0,05$, для числа ступенів свободи $f_u = 2$ і числа опитів N =

Якщо ряд порядкових дисперсій однорідний, можна приступати до визначення дисперсії, абсолютної помилки і варіації експерименту.

Дисперсія експерименту розраховується по рівнянню:

$$S_{y}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{8} S_{y_{u}}^{2}}{N},$$
(4.10)

де S²_{yu} – значення порядкових дисперсій (табл. 4.5). Абсолютна помилка експерименту визначається з виразу:

$$\sigma_{y} = \sqrt{S_{y}^{2}}, \qquad (4.11)$$

варіація експерименту – з виразу:

$$V_{y} = \frac{\sigma_{y} \cdot 100\%}{\overline{y}}, \qquad (4.12)$$

де
$$\overline{y} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{y}_u}{N}.$$

Варіація експерименту є мірою його точності. Точність експерименту вважається задовільною, якщо варіація експерименту не перевищує 10 %:

$$V_y \le 10\%.$$
 (4.13)

$$S_{y}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{8} S_{y_{u}}^{2}}{N} = \frac{5,899 \cdot 10^{-4}}{8} = 7,373 \cdot 10^{-5};$$

$$\sigma_{y} = \sqrt{S_{y}^{2}} = \sqrt{7,373 \cdot 10^{-5}} = 8,587 \cdot 10^{-3};$$

$$\overline{y} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{y}_{u}}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193;$$

$$V_{y} = \frac{\sigma_{y} \cdot 100\%}{\overline{y}} = \frac{8,573 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{0,193} = 4,45(\%).$$

Точність експерименту слід визнати задовільною, оскільки виконується умова (4.13): варіація експерименту не перевищує 10 %.

4.3 Побудова неповної квадратичної регресійної моделі

4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії

Математична модель досліджуваного процесу в узагальненій формі має вигляд:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{b}_0 + \sum \mathbf{b}_i \mathbf{X}_i + \sum \mathbf{b}_{ij} \mathbf{X}_i \mathbf{X}_j + \mathbf{b}_{123} \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_3.$$
(4.14)

Для трифакторного експерименту рівняння (4.14) можна записати в такий спосіб:

$$y' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, (15)$$

де X₁, X₂, X₃ – кодовані значення факторів, які можуть змінюватися від -1 до +1 (табл. 4.4).

Коефіцієнти регресійного рівняння (4.15) розраховуються по залежності:

$$\mathbf{b}_{i} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{i_{u}} \cdot \overline{\mathbf{y}}_{u}}{\mathbf{N}}, \tag{4.16}$$

де и – номер досліду;

X_i – кодовані значення факторів, що варіюються (незалежних змінних X₁, X₂, X₃) в и - му досліді (табл. 4.4);

ӯ_и − середнє значення функції відгуку (в табл. 4.4, 4.5 − інтенсивності зношування чавунних колодок) в u - му досліді.

Розпишемо вираз (4.16) для усіх коефіцієнтів, що входять у регресійне рівняння (4.15):

$$\mathbf{b}_{0} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{0_{u}} \cdot \bar{\mathbf{y}}_{u}}{N}; \ \mathbf{b}_{1} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{1_{u}} \cdot \bar{\mathbf{y}}_{u}}{N}; \ \mathbf{b}_{2} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{2_{u}} \cdot \bar{\mathbf{y}}_{u}}{N};$$
(4.17)

$$\mathbf{b}_{3} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{3_{u}} \cdot \overline{\mathbf{y}}_{u}}{N}; \ \mathbf{b}_{12} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{1} \cdot X_{2})_{u} \cdot \overline{\mathbf{y}}_{u}}{N}; \ \mathbf{b}_{13} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{1} \cdot X_{3})_{u} \cdot \overline{\mathbf{y}}_{u}}{N};$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_2 \cdot X_3)_u \cdot \overline{y}_u}{N}; b_{123} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3)_u \cdot \overline{y}_u}{N}.$$

Для розрахунку коефіцієнтів b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} , використовуючи дані, наведені в табл. 4.4, 4.5, складемо розширену матрицю планування (табл. 4.7).

Номер досліду	X ₀	X1	X ₂	X ₃	$X_4 = X_1 X_2$	$X_5 = X_1 X_3$	$X_6 = X_2 X_3$	$X_7 = X_1 X_2 X_3$	\overline{y}_{u} , Γ/cM^{2}
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,383
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,281
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,232
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,297
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,078
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,131
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,059
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,084

Таблиця 4.7 – Розширена матриця плану ПФЕ 2³

Розрахуємо коефіцієнти в регресійному рівнянні (4.15) по залежностях (4.17) з урахуванням знаків X_i у стовбцях табл. 4.7:

$$b_{0} = \frac{\overline{y}_{1} + \overline{y}_{2} + \overline{y}_{3} + \overline{y}_{4} + \overline{y}_{5} + \overline{y}_{6} + \overline{y}_{7} + \overline{y}_{8}}{8} = \frac{0,383 + 0,281 + 0,232 + 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 0,193;$$

$$b_{1} = \frac{-\overline{y}_{1} + \overline{y}_{2} - \overline{y}_{3} + \overline{y}_{4} - \overline{y}_{5} + \overline{y}_{6} - \overline{y}_{7} + \overline{y}_{8}}{8} = \frac{-0,383 + 0,281 - 0,232 + 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 4,911 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{2} = \frac{-\overline{y}_{1} - \overline{y}_{2} + \overline{y}_{3} + \overline{y}_{4} - \overline{y}_{5} - \overline{y}_{6} + \overline{y}_{7} + \overline{y}_{8}}{8} = \frac{-0,383 - 0,281 + 0,232 + 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,025;$$

$$b_{3} = \frac{-\overline{y}_{1} - \overline{y}_{2} - \overline{y}_{3} - \overline{y}_{4} + \overline{y}_{5} + \overline{y}_{6} + \overline{y}_{7} + \overline{y}_{8}}{8} = \frac{-0,383 - 0,281 - 0,232 - 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,105;$$

$$b_{12} = \frac{\overline{y}_1 - \overline{y}_2 - \overline{y}_3 + \overline{y}_4 + \overline{y}_5 - \overline{y}_6 - \overline{y}_7 + \overline{y}_8}{8} = \frac{0,383 - 0,281 - 0,232 + 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,017;$$

$$b_{13} = \frac{\overline{y}_1 - \overline{y}_2 + \overline{y}_3 - \overline{y}_4 - \overline{y}_5 + \overline{y}_6 - \overline{y}_7 + \overline{y}_8}{8} = \frac{0,383 - 0,281 + 0,232 - 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,014;$$

$$b_{23} = \frac{\overline{y}_1 + \overline{y}_2 - \overline{y}_3 - \overline{y}_4 - \overline{y}_5 - \overline{y}_6 + \overline{y}_7 + \overline{y}_8}{8} = \frac{0,383 + 0,281 - 0,232 - 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 8,554 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{123} = \frac{-\overline{y}_1 + \overline{y}_2 + \overline{y}_3 - \overline{y}_4 + \overline{y}_5 - \overline{y}_6 - \overline{y}_7 + \overline{y}_8}{8} = \frac{-0,383 + 0,281 + 0,232 - 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = -0,024.$$

Таким чином, отримані наступні значення коефіцієнтів регресійного рівнянні (4.15) (табл. 4.8):

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти регресійного рівняння (4.15)

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	$b_{12} = b_4$	$b_{13} = b_5$	$b_{23} = b_6$	$b_{123} = b_7$
0,193	$4,911 \cdot 10^{-3}$	-0,025	-0,105	0,017	0,014	8,554·10 ⁻³	-0,024

Якщо ввести позначення $b_{12} = b_4$; $b_{13} = b_5$; $b_{23} = b_6$; $b_{123} = b_7$ і врахувати позначення, прийняті в табл. 6, регресійне рівняння (4.15) запишеться у вигляді:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{b}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{b}_3 \mathbf{X}_3 + \mathbf{b}_4 \mathbf{X}_4 + \mathbf{b}_5 \mathbf{X}_5 + \mathbf{b}_6 \mathbf{X}_6 + \mathbf{b}_7 \mathbf{X}_7.$$
(4.18)

4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти регресії, які розраховані по рівнянню (4.16), строго кажучи, визначені не точно, а з деякою похибкою. Мірою цієї похибки є дисперсія оцінок коефіцієнтів. Неминуча наявність похибки у визначенні коефіцієнтів регресії обумовлена коливаннями значень функції відгуку при дублюванні кожного досліду. З урахуванням цього рівняння (4.16) можна записати у

наступному виді: $b_{i-\Delta b_i}^{+\Delta b_i} = \frac{\sum\limits_{u=1}^{N} X_{i_u} \cdot \overline{y}_{u-\Delta y_u}^{+\Delta y_u}}{N}$. Очевидно, що при досить малих значеннях коефіцієнтів b_i абсолютна похибка їхнього визначення $2 \cdot \Delta b_i$, обумовлена похибкою визначення функції відгуку, може виявитись неприпустимо великою. У цьому випадку значення коефіцієнта варто визнати статистично незначущим, а сам коефіцієнт виключити з регресійного рівняння. Статистична незначущість коефіцієнта регресійного рівняння означає відсутність його впливу на функцію відгуку.

Оскільки дублювання дослідів рівномірне, дисперсію оцінок коефіцієнтів регресійного рівняння можна розрахувати по залежності:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n_u \cdot N},$$
 (4.19)

де n_u – кількість дублів у кожному досліді ($n_u = 3$);

N - кількість дослідів (N = 8);

 S_v^2 – дисперсія експерименту.

Середньоквадратична помилка оцінки коефіцієнтів регресії визначається як:

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} \,. \tag{4.20}$$

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δ_{b} визначається з виразу:

$$\Delta_{\mathbf{b}_{i}} = \mathbf{t}_{2} \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{b}_{i}},\tag{4.21}$$

де t₂ – критерій Ст'юдента, який залежить від рівня значимості α і числа ступенів свободи f₂ при визначенні дисперсії експерименту:

$$f_2 = (n_u - 1) \cdot N.$$

Коефіцієнти регресійного рівняння, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу Δ_{b_i} або більше його, визнають статистично значимими. Тобто для статистично значимих коефіцієнтів повинна виконуватись умова:

$$|\mathbf{b}_i| \ge \Delta_{\mathbf{b}_i} \text{ afo } |\mathbf{b}_i| \ge \mathbf{t}_2 \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{b}_i}.$$
 (4.22)

Умова (4.22) означає, що абсолютні значення статистично значимих коефіцієнтів регресії b_i повинні не менш ніж у t_2 разів перевищувати абсолютну помилку їхнього визначення S_{b_i} .

Коефіцієнти регресійного рівняння, абсолютна величина яких менше довірчого інтервалу Δ_{b_i} , вважаються статистично незначущими і виключаються з регресійного рівняння.

$$S_y^2 = 7,373 \cdot 10^{-5};$$

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{7,373 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 8}} = 1,147 \cdot 10^{-3};$$

$$f_2 = (3-1) \cdot 8 = 16.$$

Вибравши рівень значимості $\alpha = 0,05$, при числі ступенів свободи $f_2 = 16$ по таблицях [6] знайдемо табличне значення критерію Ст'юдента (t_2 -критерій): $t_2 = 2,04$. По виразу (4.21) розрахуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії: $\Delta_{b_2} = 2,04 \cdot 1,147 \cdot 10^{-3} = 2,341 \cdot 10^{-3}$.

Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, є усі 8 коефіцієнтів, що входять у регресійне рівняння (4.18): b₀, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆, b₇. Абсолютні значення коефіцієнтів перевищують величину їхнього довірчого інтервалу $\Delta_{b_1} = 2,341 \cdot 10^{-3}$. Однак для визначення дисперсії апроксимації (дисперсії неадекватності) необхідно, щоб кількість статистично значимих коефіцієнтів у регресійному рівнянні (4.18) була менше кількості опитів N (N = 8). Тому з регресійного рівняння (4.18) необхідно виключити найменший за абсолютним значенням коефіцієнт b₁ = 4,911·10⁻³ (табл. 4.8).

Підставляючи з табл. 4.8 значення коефіцієнтів, що залишились, у вираз (4.18), одержимо наступне регресійне рівняння:

 $y' = 0.193 - 0.025 \cdot X_2 - 0.105 \cdot X_3 + 0.017 \cdot X_4 + 0.014 \cdot X_5 + 8.554 \cdot 10^{-3} \cdot X_6 - 0.024 \cdot X_7 \cdot (4.23)$

4.3.3 Перевірка адекватності регресійної моделі експерименту

Процедура перевірки адекватності регресійної моделі експерименту зводиться до виконання ряду послідовних обчислень:

1. Розрахунок теоретичних значень функції відгуку в кожному досліді по рівнянню (4.23).

2. Зіставлення розрахункових і експериментальних значень функції відгуку і знаходження дисперсії неадекватності.

3. Розрахунок критерію Фішера і остаточний висновок на підставі зіставлення його розрахункового і табличного значень про адекватність або неадекватність регресійної моделі експерименту. Використовуючи рівняння (4.23), визначимо розрахункові значення функції відгуку у' у кожному з восьми дослідів (и – номер опиту). Усі значення Х_і у дане рівняння входять у кодовому масштабі (табл. 4.7).

З урахуванням знаків X_i розрахункові значення функції відгуку (питомої втрати маси) будуть рівні, г/см²:

в 1-му досліді: $y'_1 = 0,193 + 0,025 + 0,105 + 0,017 + 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,387;$ в 2-му досліді: $y'_{2} = 0,193 + 0,025 + 0,105 - 0,017 - 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,276;$ в 3-му досліді: $y'_{3} = 0,193 - 0,025 + 0,105 - 0,017 + 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,237;$ в 4-му досліді: $y'_4 = 0,193 - 0,025 + 0,105 + 0,017 - 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,292;$ в 5-му досліді: $y'_{5} = 0,193 + 0,025 - 0,105 + 0,017 - 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,083;$ в 6-му досліді: $y'_{6} = 0,193 + 0,025 - 0,105 - 0,017 + 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,126;$ в 7-му досліді: $y'_7 = 0,193 - 0,025 - 0,105 - 0,017 - 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,064;$ в 8-му досліді: $y'_8 = 0,193 - 0,025 - 0,105 + 0,017 + 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,079.$

Отримані розрахункові значення функції відгуку у_и необхідні для визначення дисперсії неадекватності (табл. 4.9).

При рівномірному дублюванні дослідів дисперсія неадекватності S²_{неад} визначається по залежності:

Номер досліду, и	\overline{y}_{u}	y'_u	$\left \Delta \mathbf{y}\right = \left \mathbf{y}_{u}' - \overline{\mathbf{y}}_{u}\right $	$\Delta y^2 = \left(y'_u - \overline{y}_u\right)^2$	\mathbf{f}_1	${f S}^2_{{\scriptscriptstyle H}eag}$
1	0,383	0,387	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
2	0,281	0,276	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
3	0,232	0,237	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
4	0,297	0,292	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
5	0,078	0,083	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	1	$2 \cdot 10^{-4}$
6	0,131	0,126	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
7	0,059	0,064	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
8	0,084	0,079	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
Сума	-	-	-	$2 \cdot 10^{-4}$		

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку дисперсії неадекватності

$$S_{\text{Head}}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (y'_{u} - \overline{y}_{u})^{2}}{f_{1}}; f_{1} = N - k', \qquad (4.24)$$

де y'_u і \overline{y}_u – значення функції відгуку в u - *му* досліді, відповідно розраховані по рівнянню регресії (4.23) і визначені експериментально;

f₁ – число ступенів свободи;

k'- кількість залишених коефіцієнтів у рівнянні регресії, включаючи b₀;

N-кількість дослідів плану (N = 8).

Для даного експерименту k' = 7: регресійне рівняння (4.23) містить 7 коефіцієнтів. Тоді $f_1 = 8 - 7 = 1$; $S_{\text{Heag}}^2 = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{1} = 2 \cdot 10^{-4}$.

Таким чином, якщо з регресійного рівняння виключений хоча б один статистично незначущий коефіцієнт (а це неминуче, якщо фактори, що варіюються, дійсно є незалежними змінними), масив різниць $y'_u - \overline{y}_u$ буде містити інформацію про помилки у прогнозуванні значень функції відгуку.

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F^{\text{pacy}} = \frac{S_{\text{Heag}}^2}{S_y^2}.$$
 (4.25)

$$S_{\text{неад}}^2 = 2 \cdot 10^{-4}$$
 (табл. 4.9), $S_y^2 = 7,373 \cdot 10^{-5}$. Тоді $F^{\text{расч}} = \frac{2,0 \cdot 10^{-4}}{7,373 \cdot 10^{-5}} = 2,617$.

Розрахункове значення критерію Фішера – це відношення дисперсії неадекватності до дисперсії експерименту. По суті він дозволяє відповістити на запитання: у скільки разів регресійна модель прогнозує значення функції відгуку гірше у порівнянні з експериментом. Тоді табличне значення критерію Фішера повинне регламентувати припустиме відхилення розрахункових значень функції відгуку відносно експериментальних даних.

Табличне значення критерію Фішера визначається залежно від рівня значимості α і числа ступенів свободи f₁ і f₂, обчислених раніше: f₁ = 1, f₂ = 48. При рівні значимості α = 0,05 і ступенях свободи f₁ = 1 і f₂ = 16 табличне значення F - критерію дорівнює F^{табл.} = 4,04 [6].

Модель вважається адекватною, якщо виконується умова:

$$\mathbf{F}^{\mathsf{pac}_{\mathsf{H}}} < \mathbf{F}^{\mathsf{Tabn}}.\tag{4.26}$$

Оскільки умова (4.26) виконується (F^{расч} = 2,617 < F^{табл} = 4,04), гіпотеза про адекватність регресійного рівняння (4.23) експерименту при 5 % - му рівні значимості (при рівні надійності 95 %) не відкидається.

Якщо експеримент поставлений з дуже високою методичною точністю, його дисперсія S_y^2 мала, і перевірка адекватності регресійного рівняння експерименту за критерієм Фішера може дати негативний результат. Причому негативний результат виходить не через незадовільний збіг значень функції відгуку, розрахованих по регресійному рівнянню і визначених експериментально, а через малість дисперсії експерименту S_y^2 , яка стоїть в знаменнику виразу (4.25). Тому поряд із критерієм Фішера для оцінки адекватності регресійного рівняння експерименту використовують варіацію апроксимації. Варіація апроксимації не залежить від дисперсії експерименту, а визначається винятково величиною дисперсії неадекватності:

$$V_{a} = \frac{\sqrt{S_{\text{Heag}}^{2}} \cdot 100\%}{\overline{y}}, \qquad (4.27)$$

де <u>у</u> – середнє значення функції відгуку по всіх дослідах.

Якщо варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійне рівняння признається адекватним експерименту незалежно від величини розрахункового критерію Фішера. Якщо варіація апроксимації перевищує 10 %, побудоване регресійне рівняння неадекватно описує експеримент.

$$\overline{y} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{y}_{u}}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193; S_{Heag}^{2} = 2 \cdot 10^{-4}$$

Тоді $V_{a} = \frac{\sqrt{2 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\%}{0,193} = 7,2(\%).$

Оскільки варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійне рівняння (4.23) можна визнати адекватним експерименту.

Для використання рівняння (4.23) з метою прогнозування інтенсивності зношування чавуна залежно від його хімічного складу зробимо наступні заміни змінних:

$$X_{1} = \frac{X_{1} - X_{10}}{\Delta X_{1}}; X_{2} = \frac{X_{2} - X_{20}}{\Delta X_{2}}; X_{3} = \frac{X_{3} - X_{30}}{\Delta X_{3}},$$
(4.28)

де X₁, X₂, X₃ – кодовані значення факторів, які можуть змінюватись від -1 до +1 (факторами є концентрації алюмінію, марганцю і вуглецю в чавуні);

 x_1 , x_2 , x_3 – відповідно концентрації алюмінію, марганцю і вуглецю в чавуні, виражені у відсотках: $x_1 = 2,5 - 3,5$ % (алюміній), $x_2 = 9 - 12$ % (марганець), $x_3 = 3,2 - 3,8$ % (вуглець); x_{10} , x_{20} , x_{30} – основний рівень, відносно якого варіювались концентрації легуючих елементів в експерименті: $x_{10} = 3,0$ % (алюміній), $x_{20} = 10,5$ % (марганець), $x_{30} = 3,5$ % (вуглець);

 Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 – інтервал варіювання концентрації легуючих елементів: $\Delta x_1 = 0,5 \%$ (алюміній), $\Delta x_2 = 1,5 \%$ (марганець), $\Delta x_3 = 0,3 \%$ (вуглець).

З урахуванням підстановок (4.28) і позначень, прийнятих в табл. 4.7, регресійне рівняння (4.23) приймає наступний вид:

$$\begin{split} \mathbf{y}' &= 0.193 - 0.025 \mathbf{X}_2 - 0.105 \mathbf{X}_3 + 0.017 \mathbf{X}_4 + 0.014 \mathbf{X}_5 + 0.00855 \mathbf{X}_6 - 0.024 \mathbf{X}_7; \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{y}' = 0.193 - 0.025 \mathbf{X}_2 - 0.105 \mathbf{X}_3 + 0.017 \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 + 0.014 \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_3 + 0.00855 \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_3 - 0.024 \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_3; \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{y}' = 0.193 - 0.025 \left(\frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{20}}{\Delta \mathbf{x}_2}\right) - 0.105 \left(\frac{\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_{30}}{\Delta \mathbf{x}_3}\right) + 0.017 \left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{10}}{\Delta \mathbf{x}_1} \cdot \frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{20}}{\Delta \mathbf{x}_2}\right) + \\ &+ 0.014 \left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{10}}{\Delta \mathbf{x}_1} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_{30}}{\Delta \mathbf{x}_3}\right) + 0.00855 \left(\frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{20}}{\Delta \mathbf{x}_2} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_{30}}{\Delta \mathbf{x}_3}\right) - \\ &- 0.024 \cdot \left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{10}}{\Delta \mathbf{x}_1} \cdot \frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{20}}{\Delta \mathbf{x}_2} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_{30}}{\Delta \mathbf{x}_3}\right) \rightarrow \\ &\rightarrow \mathbf{y}' = 0.193 - 0.025 \left(\frac{\mathbf{x}_2 - 10.5}{1.5}\right) - 0.105 \left(\frac{\mathbf{x}_3 - 3.5}{0.3}\right) + 0.017 \left(\frac{\mathbf{x}_1 - 3}{0.5} \cdot \frac{\mathbf{x}_2 - 10.5}{1.5}\right) + \\ &+ 0.014 \left(\frac{\mathbf{x}_1 - 3}{0.5} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - 3.5}{0.3}\right) + 0.00855 \left(\frac{\mathbf{x}_2 - 10.5}{1.5} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - 3.5}{0.3}\right) - \\ &- 0.024 \cdot \left(\frac{\mathbf{x}_1 - 3}{0.5} \cdot \frac{\mathbf{x}_2 - 10.5}{1.5} \cdot \frac{\mathbf{x}_3 - 3.5}{0.3}\right). \end{split}$$

Таким чином, максимальною зносостійкістю після поверхневого оплавлення володіє чавун з максимальним вмістом вуглецю – 3,8 мас. %. Найменші питомі втрати маси (0,059 г/см²) отримані на зразку № 7 із чавуну, який містить 2,5 % алюмінію; 12 % марганцю; 3,8 % вуглецю (табл. 4.9).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У вакуумній технології електронних приладів використовуються різноманітні речовини і технологічні процеси, що призводять до токсичної (шкідливої) дії на людину.

Кращими засобами, що гарантують від нещасних випадків, є: попередня підготовка до виконання робіт, знання теорії питання, знайомство з методикою виконання робіт, знання правил експлуатації устаткування і їхнє дотримання, зібраність і увага при виконанні робіт, а також дотримання спеціальних правил техніки безпеки.

Основними джерелами небезпеки є:

-скляні елементи систем, що знаходяться під вакуумом;

-частини електродвигунів і насосів, що рухаються;

-невміння, недбале поводження з отруйними, вогне- і вибухонебезпечними речовинами;

-високі електричні напруги, які підводяться до вимірювального устаткування, й електромагнітні поля різних частот.

Стінки скляних сосудів, що знаходяться під вакуумом, відчувають односторонній зовнішній тиск, приблизно одну атмосферу. Під впливом цього тиску, при великих внутрішніх напруженнях у склі, виникає небезпека руйнації скла. При руйнації осколки скла розлітаються у всі сторони і можуть викликати травми. Тому для безпечної роботи рекомендуються: усі скляні сосуди великих розмірів закривати чохлами з тканини; напускати повітря в відкочувальну систему повільно, злегка відкриваючи крани, не натискати на пробки кранів при їхньому обертанні і взагалі не прикладати до них великих зусиль; не допускати швидкою нагрівання й охолодження окремих ділянок вакуумної скляної системи.

Шкідливі речовини, що використовуються у вакуумній технології, розділяються на групи, для кожної з яких встановлений певний порядок зберігання. Допускається збереження балонів із горючим газом разом з інертними газами (азотом, аргоном, гелієм, неоном). Балони із сірководнем зберігають під навісом на відкритому повітрі.

Зберігання і розлив кислот і лугів припускається тільки в ізольованому приміщенні, оснащеному припливно-витяжною вентиляцією. Не можна зберігати їх у підвальних приміщеннях, а також поблизу нагрітих поверхонь і незахищеними від дії сонячних променів. У місцях зберігання і використання кислот повинні знаходитися вапно, крейда або сода для нейтралізації кислот. У зв'язку з тим, що при змішуванні міцних кислот із керосином, бензином та іншими займистими рідинами підвищується температура, у результаті чого можливі загоряння і вибух, не варто зберігати їх разом навіть у незначних кількостях Не можна також зберігати сірчану кислоту з іншими кислотами, особливо з азотною.

Азотну, сірчану, соляну та оцтову кислоти в кількості до 30-35 літрів можна зберігати на складі в скляних пляшках, що знаходяться в плетених кошиках або загородженні із відповідними написами. Кислоти в кількості до 10 літрів при роботах у лабораторіях зберігають у звичайних склянках із написами, що вказують назву кислоти і її концентрацію.

Ємності з кислотами, лугами поміщають у кошики або обрешітки, вистелені соломою або стружкою, просочені розчином хлористого магнію.

Перевозять їх у спеціальних візках, причому на один візок не можна ставити більше двох сулій. Пляшки не можна виймати з кошиків, ставити на підлогу, стіл і інші місця. Склянки з кислотами, лужними та іншими їдкими речовинами переносяться в ящиках або металевих посудинах, викладених асбестом.

Отруйні речовини, які застосовуються в цехах і в лабораторіях, слід зберігати в опломбованому сейфі в добре закупореному посуді з етикеткою "Отрута" і назвою речовини.

Збереження, видачу і проведення операцій із отруйними речовинами здійснюють у повній відповідності зі встановленими обов'язковими правилами.

Легкозаймисті і горючі рідини в лабораторних приміщеннях слід зберігати в товстостінних скляних банках із притертими пробками. Ці банки вкладають у контейнер із кришкою, що закривається, стінки і дно якого вистелені асбестом.

Легкозаймисті рідини доставляють до місця роботи в закритій посудині, яка не б'ється, або скляній тарі, поміщеній у футляр: при перенесенні посудин із гарячою рідиною слід користуватися рушником, підтримуючи посудину двома руками: однією – притримуючи дно, а іншою – горловину посудини. Великі хімічні склянки піднімають двома руками так, щоб відігнуті краї склянки спиралися на вказівні пальці.

Особливу увагу і обережність необхідно проявляти при використанні приладів, що містять ртуть. Пари ртуті є небезпечною отрутою. Навіть при малих концентраціях пари ртуті її тривале вдихання може призвести до серйозних отруєнь, тому що ртуть має властивість накопичуватися в організмі людини. Категорично забороняється зберігати ртуть у відкритих посудинах. Всі роботи, пов'язані з переливанням ртуті, виконуються на спеціальному столі, виконаному у формі корита. Пролита ртуть негайно збирається, а те місце обробляється колоїдною сіркою або перекисом водню. Приміщення, у яких працюють із ртуттю, добре провітрюють. Гази й пари відкачуваних установок, в яких є ртуть (манометри Мак-Леода), не повинні викидатись в робочому приміщенні.

Для забезпечення електробезпеки повинні застосовуватися окремо або в поєднанні один з одним такі технічні засоби (за ГОСТ 12.1.019-79): захисне занулення, вирівнювання потенціалів; електричне поділення заземлення; захисне відключення; ізоляція струмоведучих частин (робоча, мереж; посилена, подвійна); огородження пристроїв додаткова, для запобігання ураження людини струмами замикання на землю; попереджувальна сигналізація; блокування; знаки безпеки; засоби захисту і захисні приладдя.

Умови з підвищеною небезпекою ураження людей електричним струмом:

-наявність вологості (пара або волога, що конденсується, яка виділяється у вигляді дрібних крапель, і відносна вологість повітря більша 75%);

-наявність провідного пилу (технологічний або інший пил, осідаючи на дротах, протікаючи всередину машин і апаратів і відкладаючись на електроустановках, погіршують умови охолодження й ізоляції, але не викликають небезпеки пожежі або вибуху);

-наявність струмопровідних основ (металевих, земляних, залізобетонних, цегельних);

-наявність підвищеної температури (незалежно від пори року і різних теплових випромінювань температура перевищує: довгостроково 35°С, короткочасно 40°С);

-наявність можливості одночасного дотику людини до з'єднаних із землею металоконструкцій будинків, технологічних апаратів, механізмів тощо з однієї сторони і до металевих корпусів електроустаткування – з іншої.

Особливо небезпечні умови ураження людей електричним струмом:

-наявність вологості (дощ, сніг, часте обприскування і покриття вологою стелі, стін, предметів, що знаходяться всередині приміщень);

-наявність хімічно активного середовища (постійно або довгостроково містяться агресивні пари, гази, рідини, утворюються відкладення або цвіль, що діють руйнівно на ізоляцію і струмоведучі частини електроустаткування);

-наявність одночасно двох або більше умов підвищеної небезпеки.

Умови без підвищеної небезпеки ураження людей електричним струмом – відсутність умов, що створюють підвищену або особливу небезпеку.

Електроустановки за мірами електробезпеки поділяються на:

-електроустановки напругою більше 1000 В у мережах з ефективно заземленою нейтраллю (із великими струмами замикання на землю);

-електроустановки напругою більше 1000 В у мережах з ізольованою нейтраллю (із малими струмами замикання на землю);

-електроустановки напругою до 1000 В із глухозаземленою нейтраллю; -електроустановки напругою до 1000 В із ізольованою нейтраллю.

У чотирипровідних мережах трифазного струму і трипровідних мережах постійного струму глухе заземлення нейтральної або середньої точки джерела струму є обов'язковим.

Електроустановки напругою до 1000 В змінного струму із ізольованою нейтраллю варто застосовувати при підвищених вимогах безпеки (для пересувних установок торф'яних розробок, шахт). Для них заземлення повинно поєднуватися із контролем ізоляції мережі або захисного відключення.

Роботи, які проводяться в діючих установках, відносно заходів безпеки поділяються на категорії: при повному знятті напруги; поділяються на категорії: при повному знятті напруги; напругою; без зняття напруги поблизу і на струмоведучих частинах; без зняття напруги з частин, віддалених від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.

Технічні заходи для безпечного проведення робіт з частковим або повним зняттям напруги в установках до 1000 В. Відключаються усі силові й інші трансформатори з боку вищої і нижчої напруги. Відключення може бути виконане: комутаційним апаратом із ручним керуванням; контакторами з автоматичним приводом і дистанційним керуванням при знятті запобіжників оперативного струму від'єднанням кінців вмикаючої котушки.

При відсутності переносних заземлень, приймають додаткові заходи: знімають запобіжники, застосовують ізольовані накладки в рубильниках і автоматах, відключають кінці живильних ліній тощо.

Перевірка відсутності напруги на мережах до 1000 В виконується покажчиком напруги або переносним вольтметром. Безпосередньо перед застосуванням покажчика напруги його справність повинна бути перевірена шляхом наближення до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, бо за допомогою спеціального приладу. Відсутність напруги повинна перевірятися на усіх фазах. Перевірка проводиться в діелектричних рукавицях. Застосування контрольних ламп припускається при лінійній напрузі до 220 В.

Електронна та вакуумна гігієна. Комплекс обов'язкових вимог, засобів і заходів, спрямованих на забезпечення заданих параметрів мікроклімату при

виробництві виробів із застосуванням електронно-вакуумної технології, об'єднується в загальному понятті електронно-вакуумної гігієни Це поняття охоплює широке коло виробничих питань, включаючи в себе і поняття електронної гігієни.

Електронна гігієна складається з: гігієни виробничих приміщень; індивідуальної гігієни робітників; гігієни збереження і транспортування матеріалів; гігієни виконання технологічних операцій; гігієни технологічного і контрольно-вимірювального устаткування.

Електронна гігієна виділяє декілька чинників, що характеризують середовище. До них відносяться: мікроклімат (запиленість, вологість, температура); чистота технологічного середовища; рівень звукового тиску; гранично допустимі концентрації шкідливих речовин; освітленість; припустимий рівень електромагнітних коливань.

Запиленість визначається кількістю часток пилу розміром не більше 6,5 мкм у 1 л повітря: 1 клас – 0,035 част./л; 10 клас – 0,35 част./л; 100 000 клас – 35 000 част./л.

Точність підтримки вологості +3; ±5; +10% при відносній вологості не більше 60%.

ВИСНОВКИ

1. Шляхом використання методики повного факторного експерименту 2^3 оптимізовано хімічний склад фрикційних марганцевих чавунів аустенітного класу по мінімуму питомої втрати ваги. Доведено, що оптимальний вміст вуглецю в литих чавунах, що не піддаються локальному поверхневому оплавленню, складає 3,0 - 3,2 %, в чавунах, що піддаються локальному поверхневому оплавленню – 3,8 %.

 Встановлено, що зміна концентрації алюмінію у фрикційному чавуні від 2,5 до 3,5 % не призводить до істотного підвищення зносостійкості чавуна. Отже, концентрація алюмінію в чавуні може братись по нижньому рівню – 2,5 %. Оптимальна концентрація марганцю в чавуні, якій відповідає мінімальне зношування чавуна, складає 12 %.

3. Розроблено математичну модель, що дозволяє прогнозувати швидкість охолодження чавуну з рідинного та твердого стану при електронно - променевій та лазерній обробці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- Электронно-лучевая сварка и обработка материалов электронным лучом/ Кайдалов А.А., Науменок О.К., Костенко С.Н. и др.; Под ред. Б.Е. Прохорова. – Киев: Наук, думка, 1994. – 251с.
- Электронно-лучевые и лазерные методы обработки материалов: Справочник / Н.Н. Рыков, А.А. Угловский, И.В. Збруев, А.Н. Коломиец. – М.: Машиностроение, 1991. – 487с.
- Шиллер Дж. Электронно-лучевая сварка и обработка: Пер. с немецкого / Дж. Шиллер, У. Гайзиген, З. Панер. – М.: Наука, 1980. – 527с.
- 4. Костецкий Б.И. Трение и износ. Л.: Машиностроение, 1980. 394с.
- 5. Барабанов В.И. и др. Методы планированного эксперимента К.: Техніка, 2007. – 194с.
- Новиков А.С., Армавиров Я.С. Оптимизация технологических процессов обработки материалов с использованием планированного эксперимента. – М.: Наука. – 1998. – 314с.
- Розов Ю.М. Математическая статистика и планированный эксперимент в материаловедении. – М.: Машиностроение. – 2012. – 230с.
- Кожевников В.Е. Технологии лазерной обработки материалов в современном машиностроении. – М.: Металлургия, 2017. – 273с.
- Технологии лазерного упрочнения и легирования деталей машин / Ковальчук В.С., Голованов Л.Ф., Чернухин В.С. – Киев: Наукова думка, 2000. – 198с.
- 10.Балицький М.Г. Експериментальна оптимізація хімічного складу ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка. – 2013. – 214с.
- 11.Литковский Е.М. Фрикционные материалы / Е.М. Литковский, Л.П.
 Ващук. М.: Наука, 2014. 320с.
- 12.Шелуховский А.Н. Структура и свойства фрикционных сплавов / А.Н. Шелуховский, С.К. Ботвинников. Полоцк: ПГУ, 2018. 283с.

- 13.Зеленов И.М. Фрикционные материалы/ И.М. Зеленов, Е.А. Митрохин. –
 М.: Машиностроение, 2014. 187с.
- 14. Тюрьев К.М. Конструирование фрикционных узлов и разработка новых фрикционных материалов в железнодорожном транспорте / К.М. Тюрьев, А.Н. Башлыкин. – М.: Наука, 2004. – 405с.
- 15. Громов А.Л. Специальные фрикционные материалы конструирование, структура – свойства/ А.Л. Громов, И.П. Раскольников, А.М. Гриневич. – К.: Витязь, 2009. – 311с.
- Мелконов И.А. Технология получения отливок из чугунов со специальными свойствами / И.А. Мелконов, А.В. Малецкий, К.В. Сухов. М.: Машиностроение, 2003. 242с.
- 17. Мелконов И.А. Фрикционные чугуны специального назначения / И.А. Мелконов, О.П. Зарубин. М.: Машиностроение, 2001. 244с.
- 18. Махнецкий Е.И. Износостойкие чугуны: структура, свойства, применение / Е.И. Махнецкий, О.М. Заплатин. М.: Наука, 2009. 316с.
- 19.Строганов Е.Р. Испытания, диагностика и разрушение фрикционных материалов / Е.Р. Строганов, А.И. Роянов. – М.: Машиностроение, 1996. – 199с.
- 20.Пулховский В.В. Легирование и модифицирование износостойких и фрикционных чугунов / Пулховский В.В., Святошин К.М., Мурзаев Е.И. – М.: Металлургия, 1989. – 316с.
- 21.Колобов Л.С. Тормозные механизмы легковых и грузовых автомобилей / Л.С. Колобов, Е.П. Ватников. М.: Машиностроение, 1994. 421с.
- 22. Арутюнян Н.Г. Лигатуры для модифицирования чугунов / Н.Г. Арутюнян, Е.А. Садыков. – М.: Металлургия, 1988. – 222с.
- 23. Можаев Е.И. Износостойкие металлические сплавы / Е.И. Можаев, М.И. Карпюк. М.: Машиностроение, 2008. 423с.
- 24.Косицын О.П. Прогнозирование износа сплавов, работающих в экстремальных условиях трения / О.П. Косицын, Р.С. Михайличук. К.: Наукова думка, 2001. 247с.

- 25.Садовой Ю.К. Модифицирование фрикционных чугунов / Садовой Ю.К., Мохова А.В., Терещук А.И. К.: Наукова думка, 1992. 192с.
- 26. Громов Н.М. Экспериментальные методы исследования износа материалов / Н.М. Громов, П.Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1997. – 184с.
- 27.Сурнин А.В. Получение деталей из фрикционных чугунов методами центробежного литья / А.В. Сурнин, Г.А. Дворжецкий. – М.: Машиностроение, 1998. – 231с.
- 28.Пахомов В.Л. Легирование и микролегирование износостойких чугунов / В.Л. Пахомов, Л.М. Леонов, К.С. Симоновский. – М.: Машиностроение, 1991. – 280с.
- 29.Кротов С.Н. Микролегирование фрикционных чугунов / С.Н. Кротов, В.В. Матюшин, Л.Н. Бережной. М.: Машиностроение, 1999. 237с.
- 30.Лахтин Л.М. Материалы для высокотемпературных узлов трения / Л.М. Лахтин, С.П. Коржаев. – М.: Металлургия, 1988. – 314с.
- 31.F. Vollertsen, I. Komel, and R. Kals, "The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism - A model," Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 3, 107 - 119 (1995).
- 32.J. Magee. "Laser Forming of Aerospace Alloys."PhD Thesis, University of Liverpool, 1999.
- 33.Z. Mucha, J. Hoffman, W. Kalita, and S. Mucha, "Laser Forming of Thick Free Plates". Laser Assisted Net shape Engineering 2. Proceedings of the LANE'97, edited by M. Geiger and F. Vollertsen, (Meisenbach Bamberg, Germany, 1997), Vol. 2, pp. 383-392.
- 34.F. Vollertsen, M. Rodle, "Modelforthe Temperature Gradient Mechanismoflaser Bending," in Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94, edited by M Geiger and F. Vollertsen, (MeisenbachBambërg, Germany, 1994), Vol. I, pp. 371-378.