

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Удосконалення технології виготовлення гальмівних колодок з аустенітного марганцевого чавуну шляхом їхнього поверхневого зміцнення з локальним оплавленням»: 103 с., 11 табл., 18 рис., 34 джерел.

ФРИКЦІЙНИЙ ЧАВУН, ГАЛЬМІВНІ КОЛОДКИ, АУСТЕНІТ, МАРТЕНСИТ, КАРБИДИ, 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 2^3 , а також підтверджено достовірність математичних моделей, розроблених у третьому розділі.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП.....	5
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНІВ.....	6
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1 Конструкція установки для електронно-променевої обробки УЕЛС - 902М з енергокомплексом ЕЛА - 15.....	18
2.2 Методика вимірювання мікротвердості.....	25
2.2.1 Конструкція мікротвердоміра.....	25
2.2.2 Визначення мікротвердості.....	26
2.2.3 Порядок проведення випробувань на мікротвердість.....	28
2.3 Вимірювання твердості.....	34
2.4 Методика дослідження мікроструктури.....	37
3 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	38
3.1 Загальні підходи до визначення температурного поля при лазерній та електронно - променевій обробці.....	38
3.2 Перший варіант інженерної методики для розрахунку основних параметрів режиму поверхневої обробки.....	56
3.3 Другий варіант інженерної методики для розрахунку основних параметрів режиму поверхневої обробки.....	62
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	66
4.1 Аналіз вихідних даних. Методика проведення експерименту....	66
4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту.....	71
4.3 Побудова неповної квадратичної регресійної моделі.....	81
4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії.....	81
4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії	85
4.3.3 Перевірка адекватності регресійної моделі експерименту	87
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	93
ВИСНОВКИ.....	100
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	101

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

H – мікротвердість, МПа.

HB – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

δ – відносне подовження, %.

σ_m – межа текучості, МПа.

σ_σ – межа міцності, МПа.

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

σ_{-1} – границя втоми, МПа.

ψ – відносне звуження, %.

μ – коефіцієнт Пуасона.

A – поглинальна здатність матеріалу, що обробляється.

W_p – просторовий розподіл потужності в плямі фокусування.

$\varphi(t)$ – функція, що описує тимчасову структуру імпульсу.

Re – число Пекле.

Fo – число Фур'є.

T – температура деталі.

τ_u – тривалість імпульсу.

t – час нагрівання або охолодження.

δ_1 – товщина плівки, через яку здійснюється теплообмін.

δ_2 – товщина двошарової системи “плівка - основа”.

α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні основи.

T_c – температура охолоджувального середовища.

v – швидкість руху джерела нагрівання.

P – 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

Поряд зі сталями чавуни з самого початку робіт по лазерному зміцненню опинились у центрі уваги фахівців. Цьому сприяли принаймні дві обставини: 1) білі і сірі чавуни є логічним продовженням і завершенням серії залізовуглецевих сплавів, що починаються технічно чистим залізом і продовжуються вуглецевими сталями; 2) багатофакторність відгуку чавунів, особливо сірих, на лазерне опромінення – підвищення не тільки твердості і міцності, а й зносостійкості, корозійної стійкості, стійкості проти відпуску.

Важливим є також те, що чавуни широко застосовуються в техніці, чому сприяють їх високі ливарні властивості, хороша оброблюємість різанням, мала чутливість до дефектів поверхні.

Слід зазначити, що з усіх видів чавунів найменший практичний інтерес, у тому числі і з точки зору лазерного опромінення, представляють білі чавуни – сплави, що кристалізуються по метастабільній діаграмі стану “залізо - цементит”.

Лазерне опромінення білих чавунів з оплавленням поверхні формує у першому шарі зони нагріву, де температура перевищує точку ліквідусу T_L сплаву, характерну дендритно - стовбчасту аустенітну структуру, яка характеризується також високою дисперсністю ледебуриту [1; 2]. Діаметр аустенітних стовбиків у ледебуриті першого шару зони нагріву, як правило, менше 0,5 мкм, тоді як у вихідній структурі він досягає 2 мкм. Дендрити аустеніту також мають малі розміри, що свідчить про кристалізацію їх в умовах сильного переохолодження [3].

Другий шар зони нагрівається вище точки A_{c1} , але нижче температури солідусу, якою у чавунів є евтектична температура. При лазерному нагріванні перліт повністю перетворюється в аустеніт, а при наступному швидкому охолодженні певна частина останнього перетворюється в

мартенсит, розмір голок якого зменшується по мірі віддалення від поверхні у відповідності зі зниженням максимальної температури нагріву.

Складніші перетворення відбуваються у цементитній складовій. Вторинний цементит в результаті перегріву сплаву і подальшого прискореного охолодження кристалізується у вигляді голок усередині зерен аустеніту, утворюючи структуру відманштетного типу. У верхній частині другого шару, поблизу від оплавленого першого, виявлений видозмінений цементит, що володіє підвищеними протравлюваністю і мікротвердістю (до 12700 - 14800 МПа), тоді як цементит за межами зони нагріву має твердість 8900 - 9600 МПа [4]. Такі ділянки, у формуванні яких брав участь не тільки цементит, але і аустеніт ледебуриту, являють собою нову структурну складову залізвуглецевих сплавів – «z - складова» або «байковит».

Детальне пошарове рентгеноструктурне дослідження зони імпульсного лазерного нагріву на доевтектичному білому чавуні з вмістом вуглецю близько 3 % показало [5], що на рентгенограмах поверхні зони нагріву фіксуються тільки інтерференційні максимуми аустеніту, а лінії α - фази і цементиту відсутні. Це означає, що в аустеніті міститься весь вуглець, наявний у сплаві. Як відомо, починаючи з 0,5 % С кожна 0,1 % його знижує точку початку мартенситного перетворення M_n на 19,6°C [6]. Екстраполяція цієї залежності в область більш високих концентрацій вуглецю показує, що у такого аустеніту точка M_n повинна лежати в області криогенних температур. Дійсно, ні охолодження опроміненого чавуну до кімнатної температури (20°C), ні його переохолодження в рідкому азоті (-196°C) не фіксує появи в зоні лазерного нагріву мартенситу. Проведений розрахунок показав, що в аустеніті повинно бути 3,1 % С. Схожі результати (2,6 - 3,1 % С) дало і прецизійне вимірювання періоду решітки аустеніту a_γ . Нарешті, мікротвердість (H_{μ}) цього аустеніту (6370 МПа) також відповідає вмісту в твердому розчині 3,1 % вуглецю. Все це дозволило прийти до висновку, що при імпульсному лазерному опроміненні білих чавунів утворюється новий,

дуже стабільний аустеніт з позамежною концентрацією розчиненого вуглецю.

Значно ширше застосовується лазерне зміцнення сірих чавунів. Для цієї мети використовуються лазери як імпульсної, так і безперервної дії. У більшості випадків режими лазерного опромінення забезпечують розплавлення поверхневого шару.

Найбільш часто піддаються лазерному опроміненню сірі чавуни з перлітною або перлітно-феритною металевою основою наступних марок: СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 20, СЧ 24-44 [1, 2, 4]. У них зона лазерного нагріву включає два шари. Перший шар в момент лазерного опромінення перебував у рідкому стані, його структура формується в умовах швидкісної спрямованої кристалізації і являє собою подрібнені дендрити аустеніту та цементиту, діаметри головних осей яких слабо залежать від потужності безперервного лазерного випромінювання. При цьому дендрити в оплавленому шарі ростуть під кутом до поверхні металу [7]. Пояснюється це тим, що переміщення опромінюємого зразка відносно променя лазера створює додатковий градієнт температур вздовж напрямку цього переміщення. Лазерне опромінення призводить до зменшення відстаней між гілками дендритів в чотири рази, а середнього діаметра осей – більш ніж у 60 разів, що, до речі, свідчить про високу швидкість охолодження першого шару – близько $5 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Зрозуміло, що в таких умовах кристалізація йде по метастабільній діаграмі стану системи залізо - цементит, і перший шар набуває структуру доєвтектичного білого чавуну. Тому міждендритні простори заповнені дрібнодисперсним ледебуритом, що володіє, як і мартенсит гарту, підвищеною зносостійкістю [8].

Таким чином, зміцнення сірого чавуну при його лазерному опроміненні на відміну від сталі в принципі не вимагає гартування поверхневого шару – висока міцність, твердість і зносостійкість досягаються за рахунок його відбілювання в процесі прискореного охолодження з рідкого стану.

Незважаючи на короткочасність лазерного опромінення (як безперервного, так і особливо імпульсного) графітні включення першого шару встигають повністю розчинитись в рідкому сплаві, що призводить, з одного боку, до підвищення вмісту вуглецю в аустеніті до гранично можливих і позамежних значень, а з іншого, на порядок зменшує швидкість корозії [10].

Тільки в нижній частині першого шару, де температура лазерного нагрівання лише трохи перевищувала температуру солідусу сплаву, великі графітні включення частково збереглись нерозчиненими. Одночасно з цим вздовж таких включень внаслідок насичення рідкого розчину вуглецем [11] перший шар зони нагріву клиноподібними ділянками вклинюється вглиб другого шару. З цієї причини межа двох шарів є нерівною, і в цьому полягає ще одна відмінність зон лазерного нагріву на сірих чавунах від зон нагріву на сталях.

Існують [12, 13] різні оцінні значення швидкості охолодження першого шару – від $5 \cdot 10^3$ до 10^5 °C/с. У будь-якому випадку всі ці величини завідомо перевищують критичну швидкість гартування сплаву. Тим не менш, в літературі є досить суперечливі відомості про кількість мартенситу і залишкового аустеніту в першому шарі зони нагріву. Найчастіше наводяться отримані методами рентгеноструктурного аналізу, просвічуючої електронної мікроскопії, ядерної гаммарезонансної спектроскопії величини: 40 - 60% залишкового аустеніту, 20% мартенситу, 20 - 40% цементиту. Таке співвідношення мартенситу і залишкового аустеніту не повинно викликати подиву, якщо врахувати, що останній містить гранично можливу відповідно до діаграми стану потрійної системи залізо - вуглець - кремній кількість вуглецю: 1,2 - 1,5% [12].

Настільки ж суперечливі і дані про мікротвердості першого шару зони нагрівання – від 6800 до 14000 МПа. Наявність значної кількості аустеніту не призводить до істотного зниження твердості, що може пояснюватись великою щільністю дефектів кристалічної будови, високим ступенем

дисперсності структурних складових, а також фазовим наклепом аустеніту в процесі швидкісного охолодження.

При вивченні відпуску зони лазерного нагріву на сірих чавунах встановлено, що відпуск при 150 - 200°C протягом 2 - 4 год. не викликає розпаду залишкового аустеніту, тоді як при температурі відпуску 300°C кількість аустеніту різко зменшується, і це призводить до деякого збільшення мікротвердості зони нагріву [14]. Однак відпуск при 400°C викликає не тільки повне зникнення залишкового аустеніту, а і розпад мартенситу, в результаті чого твердість знижується.

Імпульсне лазерне опромінення синтетичного сірого чавуну з 3,8 % вуглецю і 4,7 % кремнію [49], а також досить близького до нього за хімічним складом промислового чавуну СЧ 24-44 [66], що забезпечує швидкість охолодження не менше $5 \cdot 10^5$ °C/с, дозволило зафіксувати присутність в зоні нагріву метастабільних фаз ϵ і ϵ' , а також χ - фази з орторомбічною кристалічною ґраткою.

Була зроблена спроба зафіксувати за допомогою імпульсного лазерного опромінення аморфний стан в чавуні з вибіленою структурою, що містить 3,20 % С; 2,67 % Si; 0,64 % Mn; 0,014 % S і 0,06 % P. У першому, оплавленому шарі поблизу від границі оплавлення на місці цементиту ледебурита були виявлені ділянки, що не протравлюються, в яких при електронно-мікроскопічному дослідженні навіть при збільшенні в 24000 раз не було виявлено жодних ознак кристалічної будови. Передбачається, що ці ділянки, що містять близько 6 % вуглецю і мають мікротвердість близько 12000 МПа, є аморфними. У результаті відпуску при температурі 400°C протягом 2 год. з'являється травимість, а твердість зростає на 500 МПа. Якщо б ці ділянки мали кристалічну будову, відпуск призвів би до зниження, а не до збільшення твердості. Кристалізація зазначеної аморфної фази при відпуску викликає утворення вже згадуваної вище нової структурної складової залізовуглецевих сплавів – байковита, що представляє собою дрібнодисперсну суміш цементиту і аустеніту, причому останній

розташовується вздовж кристалографічних площин цементиту (001). Спроба ж отримання в аморфному стані чистого цементиту не вдалась через його малу теплопровідність [15].

Ще однією особливістю зон лазерного нагріву на сірих чавунах є мала товщина їх другого шару. Це обумовлено тим, що верхня температурна межа даного шару (точка солідусу T_c) у чавунів розташована значно нижче, ніж у сталей. Нею є евтектична температура, яка у подвійних сплавів залізо - вуглець дорівнює 1153°C . Нижньою температурною границею другого шару зони нагріву як у сталей, так і у чавунів є критична точка A_{c1} . Однак у сірих чавунів під впливом кремнію, який входить до їхнього складу, нижня критична точка A_{c1} зміщується в область більш високих температур, що ще більше звужує температурний інтервал, що відповідає другому шару зони лазерного нагріву.

У цьому шарі відбувається повна фазова перекристалізація матриці: при лазерному нагріванні перліт перетворюється на аустеніт, а при подальшому автогартуванні велика частина аустеніту перетворюється на мартенсит. Графітні включення частково розчиняються в аустеніті при нагріванні і тим більшою мірою, чим вище температура нагрівання, тому у верхній частині другого шару графітні включення помітно тонше, ніж у його нижній частині. Крім того, має місце часткова сфероїдизація включень графіту. Таким чином, другий шар зони лазерного нагріву на сірих чавунах має мікроструктуру, що складається з дрібногочастого мартенситу, залишкового аустеніту і графітних включень. Інтегральна мікротвердість цього шару [15, 16] варіюється в досить широких межах – від 7000 до 14000 МПа.

Незважаючи на те, що границею між першим і другим шарами зони нагріву є температура початку плавлення сплаву, в другому шарі спостерігаються оплавлені ділянки, що з'явилися в результаті контактного плавлення навколо великих графітних включень або на місці ділянок фосфідних евтектик [15].

У випадку, коли сірий чавун піддається лазерному нагріванню за режимами, що виключають розплавлення поверхневого шару [10, 11], вибілений шар на поверхні виробу відсутній, а зміцнення досягається за рахунок мартенситного перетворення в матриці. Однак зміцнений шар має малу товщину, оскільки, як зазначалося вище, температурний інтервал утворення аустеніту, обмежений зверху температурою солідусу T_c сплаву, а знизу – критичною точкою A_{c1} , виявляється дуже вузьким і не перевищує у більшості випадків 150°C . Ця обставина обмежує можливості застосування лазерного зміцнення сірих чавунів без оплавлення поверхні.

Оригінальний спосіб зміцнення сірих чавунів запропонований японськими дослідниками. Його особливість полягає в тому, що він забезпечує відсутність вибіленого шару. Після деграфітизації і подальшої лазерної (або електронно - променевою) обробки утворюється шар достатньої глибини з тонкою однорідною мартенситною структурою. Графітні включення з'являються на деякій відстані від поверхні. Недоліком даного способу слід вважати те, що в зміцненому шарі є включення оксидів.

Лазерному зміцненню піддавались також леговані сірі чавуни ХНМЧ і СЧХНМД. Отримані при цьому результати не мають принципових відмінностей від описаних вище. Однак більш низька теплопровідність легованого чавуну вимагає значно менших швидкостей обробки у порівнянні зі звичайним сірим чавуном для гарантованого отримання зміцненого шару. Легований чавун менш схильний до оплавлення, виникнення тріщин і газових пор. При використанні режимів лазерного нагріву, що виключають розплавлення поверхневого шару, структура чавуна складається з дрібногочастого бейніту, карбідів і пластинчастого перліту.

Безперервному лазерному нагріванню піддавався також чавун ВЧ 60-2 зі структурою металевої матриці сорбітоподібного та тонкопластинчатого перліту. Швидкість розчинення кулястих включень графіту при розплавленні матриці виявилась нижчою, ніж пластинчастих, тому частина графітних включень у першому шарі зони нагріву збереглася, особливо в нижній

частині. Тим не менш твердість цього шару в чавуні ВЧ 60-2 (9000-10000 МПа) виявилась вищою, ніж у сірих чавунів СЧ 18-36 і ХНМЧ (7500 - 8500 МПа) [16].

Пояснити це можна двома обставинами: модифікуючою і відбілюючою дією магнію; високим ступенем дисперсності металевої основи у сплаві ВЧ 60-2, що призводить, з одного боку, до зменшення шляхів дифузії вуглецю при перетворенні перліту в аустеніт і збільшення, з іншого боку, протяжності границь ферит - цементит, на яких зароджуються кристали аустеніту. Зіставлення отриманих результатів з даними по лазерному опроміненню сірих і ковких чавунів дозволило прийти до висновку, що тип металевої матриці і ступінь її дисперсності більше впливають на результати лазерного зміцнення чавунів, ніж форма графітних включень.

Другий шар зони лазерного нагріву високоміцного чавуну ВЧ 60-2 складається, як і в сірих чавунах, з мартенситу, залишкового аустеніту і графіту. У нижній частині цього шару виявляються сліди вихідного перліту (так званий «дух перліту»), оскільки висока швидкість лазерного нагріву і мала тривалість впливу випромінювання залишають незавершеними дифузійні процеси утворення аустеніту та його гомогенізації.

Залишки перліту виявлено також при лазерному зміцненні колінчастих валів, виготовлених з високоміцного чавуну наступного складу: 3,74 % С; 2,14 % Si; 1,3 % Mn; 0,04 % Cr; 0,11 % Ni; 0,069 % Mg; 0,051 % P і 0,011 % S. Після нормалізації від 890°C металева основа сплаву на 85 - 95 % складається з перліту, інші 5 - 15 % припадають на частку фериту. Наявність перліту у нижній частині другого шару зони лазерного нагріву призводить до зменшення тут кількості залишкового аустеніту, в порівнянні з верхньою частиною цього ж шару, де незалежно від режиму лазерного опромінення фіксувалося близько 30 % γ - фази. Крім того, у верхній частині шару, поряд з мартенситом, виявлені також структури бейнитного типу, поява яких може бути пояснена наявністю вихідної (до лазерного опромінення) дендритної

ліквації. Все це призводить до того, що мікротвердість другого шару змінюється в досить широких межах (6000 - 9000 МПа).

Детальне вивчення процесів відпуску чавунів після лазерного гарту [12, 14] показало, що при температурах до 500°C відбувається розпад залишкового аустеніту. Це супроводжується підвищенням мікротвердості, яка досягає максимуму при 350 - 400°C. Вище 500°C твердість сильно зменшується за рахунок коагуляції цементиту, а в високоміцному чавуні – ще й за рахунок графітизації, в результаті чого чавун ВЧ 60 - 2 набуває більш низьку твердість, ніж чавун СЧ 20.

Швидкісна графітизація у високоміцному чавуні при відпуску зони лазерного нагріву може бути обумовлена декількома причинами: високим (3,2 %) вмістом сильного графітизатора, яким, як відомо, є кремній; неоднорідністю твердого розчину за вмістом вуглецю і кремнію в результаті швидкого охолодження, що прискорює процес дифузії вуглецю при подальшому відпуску; високим ступенем дисперсності ледебуриту в зоні нагріву, що збільшує протяжність міжфазних границь аустеніт - цементит. Явище графітизації при відпуску виявлене і в зоні нагріву сірого чавуну, але там воно спостерігається при більш високих температурах, оскільки дія перерахованих факторів тут послаблена.

Встановлено також, що при лазерному гартуванні чавунів з кулястим графітом, коли зона нагріву складається з двох шарів, зовнішній шар може мати міцну ледебуритну структуру, твердість якої лежить у межах 7500 - 9500 МПа [10].

При опроміненні ковкого чавуну КЧ 35-10 на феритній основі [14] лазерами як безперервної, так і імпульсної дії з оплавленням поверхні кристалізація в зоні лазерного нагріву протікає по метастабільній діаграмі стану залізо - цементит. Причому в середній частині зони переважає ледебурит, а по периферії – великі дендрити аустеніту, що містять, за даними рентгеноструктурного аналізу, близько 2 % вуглецю. Оскільки швидкість охолодження після імпульсного лазерного нагріву значно вища, ніж після

безперервного опромінення, твердість аустеніту виявляється в обох випадках істотно різною і становить відповідно 6700 і 4700 МПа. Така різниця в твердості обумовлена різною кількістю дефектів кристалічної будови та різними рівнями залишкових структурних напруг. Мікротвердість високодисперсного ледебуриту в обох випадках однакова – 9600 - 10000 МПа.

У другому шарі зони нагріву зерна фериту, в яких пройшла фазова перекристалізація, подрібнені і деформовані. Їх твердість зростає з 1500 МПа у вихідному стані до 2500 МПа при імпульсному і 2200 МПа при безперервному лазерному опроміненні.

Аустеніт у зоні безперервного лазерного нагріву має більшу стійкість проти відпуску в порівнянні з імпульсним опроміненням. По мірі підвищення температури відпуску відбувається розпад аустеніту на ферито - графітну суміш, що супроводжується дифузією вуглецю до графітних включень і деяким підвищенням твердості. Максимальний приріст твердості, після якого починається її стрімке зниження, має місце у випадку імпульсного лазерного опромінення з відпуском 200°C, а при безперервному опроміненні описані процеси зміщуються у бік більш високих температур – 300°C.

До недавнього часу поверхневу обробку з оплавленням використовували, в основному, для отримання високої абразивної зносостійкості у виливках із конструкційних сірих та високоміцних чавунів. Але в останні роки з'явилися публікації, в яких вказується на можливість використання поверхневої обробки з оплавленням для підвищення зносостійкості фрикційних чавунів [17, 18]. Промислові фрикційні чавуни містять пластинчастий графіт [19 - 34]. У фрикційних чавунах не допускається наявність грубих включень ледебуриту, а вміст вторинного цементиту не повинен перевищувати 8 %. Для підвищення фрикційних властивостей до складу чавунів вводять фосфор, який утворює із залізом фосфідну евтектику. Але фосфор, підвищуючи фрикційні властивості чавунів, водночас суттєво погіршує їх термічну стійкість (табл. 1.1). Під

термічною стійкістю фрикційних чавунів розуміють їх здатність пручатись утворенню тріщин в умовах термоциклювання при стандартних умовах випробувань.

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

Вміст фосфору, мас. %	Збільшення коефіцієнта тертя, %	Твердість чавуну, НВ	Характеристики зносостійкості при сухому терті			Термічна стійкість, цикли
			Швидкість зношування у процесі прироблення, мкм/г	Зношування при торцевому терті на машині І47-К54, мг/г	Відносна зносостійкість при терті котіння із ковзанням, %	
0,06	100	172	16 - 18,6	260	100	140
0,12	112	180	13 - 14,4	182	114	132
0,18	122	189	10,6 - 11,2	166	118	126
0,3	128	196	8,8 - 10,4	149	132	114
0,55	132	218	7,5 - 8,7	132	144	86
0,96	138	225	7,0 - 7,8	116	156	73
1,35	144	233	6,2 - 7,2	108	165	62
1,85	148	241	5,6 - 6,7	85	178	36

Ефективним замінником фосфору в сірих фрикційних чавунах є бор. Оптимальна концентрація бору складає 0,3 - 0,35 мас. % [21 - 25]. При цьому вміст фосфору може бути обмежений на рівні 0,15 - 0,2 мас. %.

Нові перспективи щодо підвищення фрикційних властивостей чавунів відкриваються при використанні поверхневої обробки з оплавленням [17, 18]. Оплавленню піддається не уся контактна поверхня гальмівних елементів (колодок), а приблизно 40 % площі контактної поверхні [18]. В оброблених зонах утворюється вибілений шар із високою твердістю та зносостійкістю, а

в необроблених зонах залишається вихідна структура сірого чавуну без карбідів. При лазерній та електронно-променевої обробці вибілений шар має високодисперсну структуру без помітних ознак грубої ледебуритної евтектики. За рахунок високих швидкостей охолодження із розплавленого стану евтектична кристалізація подавляється і утворюються дисперсні карбіди, рівномірно розташовані у металевій матриці. Така структура вибіленого шару забезпечує надзвичайно високі фрикційні властивості чавунів і водночас не чинить абразивної дії на контртіло (гальмівний диск). Пластинчастий графіт у необроблених зонах гальмівних колодок відіграє роль твердого змащення, зменшуючи знос елементів гальмівної системи.

Лазерна та електронно-променева обробки дозволяють відмовитись від легування фрикційних чавунів бором, фосфором, алюмінієм (алюміній, як і бор, використовується для заміни фосфору) [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 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Конструкція установки для електронно-променевої обробки УЕЛС-902М з енергокомплексом ЕЛА-15

Установка призначена для обробки матеріалів електронним променем у вакуумі до $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па (напилювання покриттів, термічної обробки, пайки, зварювання). Вона складається з вакуумної камери 1, встановленої на станині 2, форвакуумних насосів 3, вакуумної станції 4 і енергокомплекса ЕЛА-15, до складу якого входить електронна пушка 5, високовольтне джерело живлення 6, блок регулюючої лампи 7, силова шафа 8, пульт 9, шафа керування 10, відеопристрій 11 (рис. 2.1). Форвакуумні насоси 3 з'єднані з паромасляним насосом вакуумної станції 4, вакуумною камерою 1 і іншим паромасляним насосом для відкачки камери за допомогою вакуумопроводів 12 і 13. Високовакуумний агрегат станції 4 з'єднаний з електронною пушкою 5 вакуумопроводом 14. Електроживлення пушки 5 від високовольтного джерела 6 здійснюється за допомогою високовольтного кабелю 15. Аналогічним кабелем 16 високовольтне джерело 6 підключене до блоку регулюючої лампи 7. З метою створення комфортних умов роботи персоналу, що обслуговує установку, і зниження шуму від працюючих механічних вакуумних насосів 3 останні встановлені за звукоізолюючою перегородкою 17.

Електронна пушка 5 (рис. 2.1) призначена для одержання електронного потоку, його прискорення, фокусування і відхилення. Вона складається з джерела електронів 1, проміжного корпусу 2 та системи 3 для фокусування та відхилення електронного потоку (рис. 2.2).

Вільні електрони утворюються за рахунок термоелектронної емісії з поверхні катода - таблетки з гексабориду лантану, яка нагрівається за рахунок бомбардування електронами, емітованими нагрівачем і прискореними напругою бомбардування, прикладеною між нагрівачем і катодом.

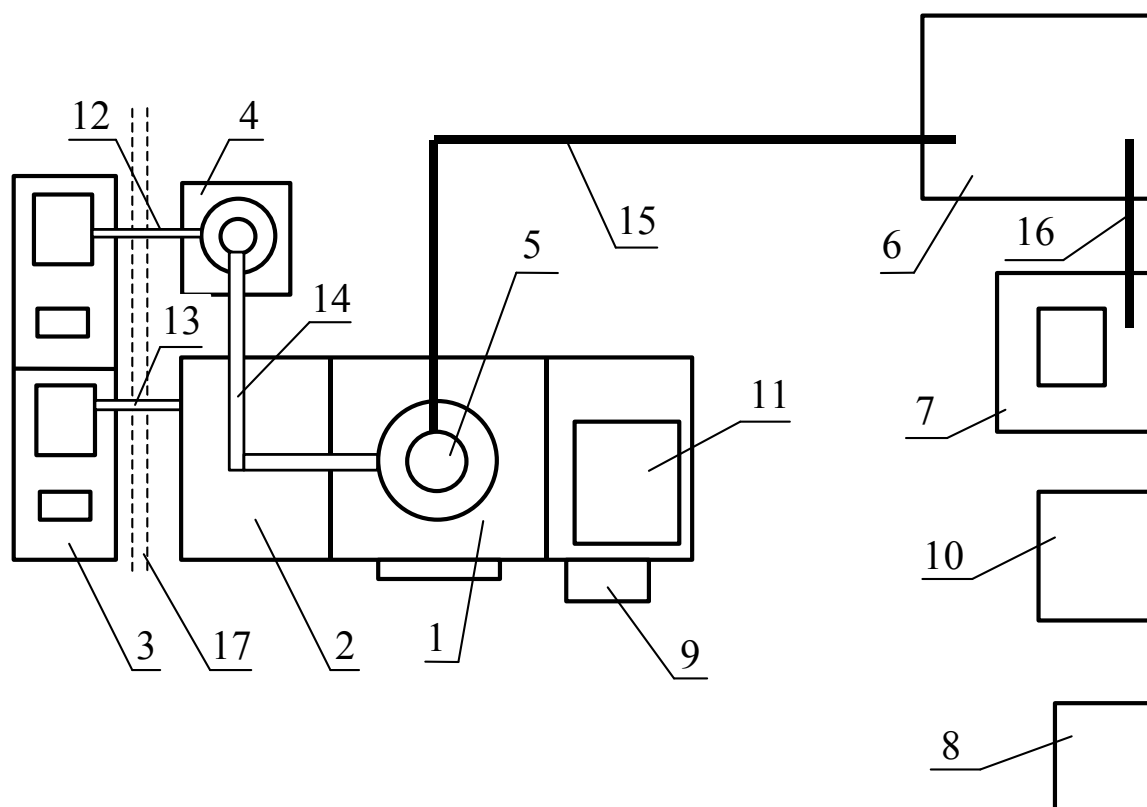


Рисунок 2.1 – Блок-схема електронно-променевої установки УЕЛІС-902М

Нагрівач виготовлений з танталового дроту діаметром 0,2 мм і розміщений у спеціальному тримачі. Через отвір у заземленому аноді 4 електронний пучок проходить до виробу. Між катодом і анодом 4 знаходиться фокуруючий електрод 5, до якого підводиться напруга, що регулює провідність електронної гармати, а між фокуруючим електродом 5 і анодом 4 прикладається прискорювальна напруга 30 - 60 кВ. Живлення до описаного вище джерела електронів підводиться через ізолятор 6 від високовольного чотирижильного кабелю.

Після заземленого анода 4, що виконує роль прискорювального електрода і до якого підключається позитивна клема високовольного джерела живлення (30 - 60 кВ), електрони рухаються рівномірно, але, маючи заряд одного знака, відштовхуються друг від друга, внаслідок чого діаметр електронного пучка збільшується, а щільність енергії в ньому зменшується.

Для збільшення щільності енергії у пучку після виходу електронів з анода 4 вони фокусуються магнітним полем фокуруючої електромагнітної лінзи 7, що

представляє собою котушку на немагнітному каркасі, через яку протікає постійний струм. Електронний промінь, потрапляючи у магнітне поле лінзи, залежно від величини струму в котушці, фокусується на певній відстані від неї. Відстань від середини лінзи до поверхні виробу називається фокусною відстанню лінзи ℓ_f . Сфокусований електромагнітною лінзою пучок діаметром $d_{f.n.}$ падає на деталь; при цьому кінетична енергія електронів перетворюється у теплову енергію, за рахунок якої деталь нагрівається.

Для переміщення електронного пучка відносно деталі або його сканування (розгорнення) по певній траєкторії на шляху електронів після фокусувальної лінзи 7 розміщена магнітна відхиляюча система 8. Вона виконана у вигляді чотирьох котушок, зібраних попарно і укладених в пази магнітопроводу, причому, кожна пара котушок зміщена відносно іншої пари на 90° , що забезпечує відхилення пучка у двох взаємо-перпендикулярних напрямках.

У проміжному корпусі пушки 2, котрий з'єднує її джерело електронів 1 і систему фокусування та відхилення електронного пучка 3, розташований шлюзовий механізм 9. Він відділяє об'єм джерела електронів від об'єму іншої вакуумної системи та пушки. Приводом шлюзового механізму служить електродвигун 10. Відкачка електронної пушки на високий вакуум здійснюється через патрубок 11 проміжного корпусу 2 від окремої вакуумної системи.

Корпуси джерела електронів 1 і системи 3 фокусування та відхилення електронного пучка мають систему охолодження. Верхня частина катодного вузла 12 охолоджується кремнійорганічною рідиною, для відводу тепла від якої в кришку впаяний змієвик. По змієвику проходить вода, що подається через шланг від гідравлічного реле. Для заміни катода і інших профілактичних робіт джерело електронів 1 відкидається від вісі і утримується спеціальним кронштейном. При цьому встановлений мікрореле розриває ланцюг включення прискорювальної напруги.

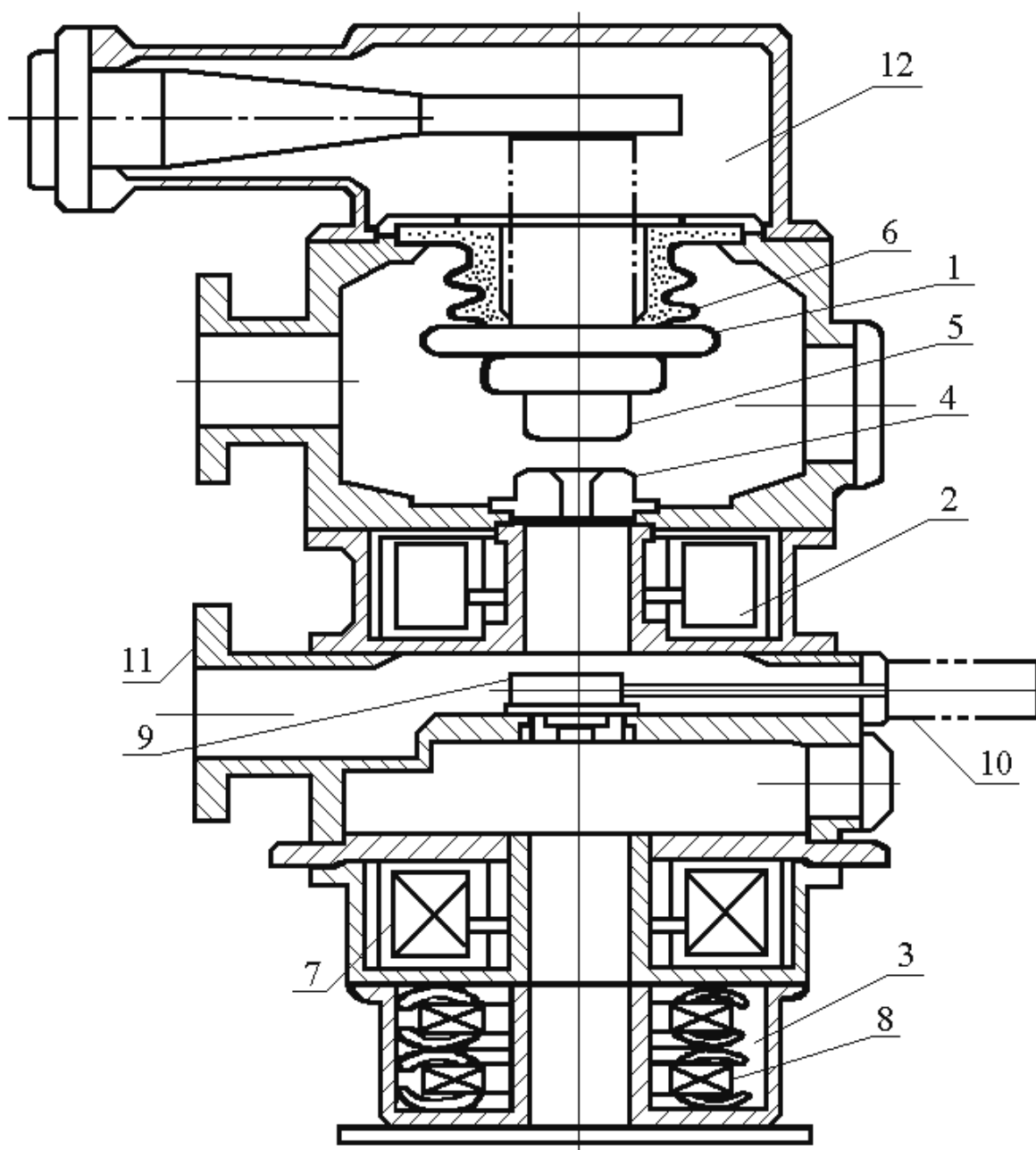


Рисунок 2.2 – Схема електронно-променевої пушки: 1 – джерело електронів (таблетка з гексаборида лантану з нагрівальною танталовою спіраллю); 2 – проміжний корпус; 3 – система фокусування та відхилення електронного пучка з електромагнітними котушками 8; 4 – заземлений анод (“+” джерела живлення); 5 – фокусуєчий (керуючий) електрод; 6 – ізолятор, через який підводиться живлення до джерела електронів 1; 7 – фокусуєча електромагнітна лінза; 9 – шлюзовий механізм; 10 – привод шлюзового механізму; 11 – патрубок, до якого приєднується вакуумопровод від паромасляного насоса

Вакуумна камера 1 виконана у вигляді куба $500 \times 500 \times 500$ мм зі сталі І2Х18Н10Т товщиною 20 мм. У середині камери монтуються змінні маніпулятори з приводом від двигуна постійного струму, системи підігріву виробу і освітлення камери.

Оглядове вікно встановлене на передній кришці камери і призначене для спостереження за процесом обробки. Воно складається із внутрішнього ілюмінаторного скла товщиною 30 мм, що сприймає усе навантаження від атмосферного тиску. За ним розташоване захисне рентгенівське скло марки Тф-5 більшого діаметру. Товщина рентгенівського скла вибирається залежно від прискорювальної напруги, струму пучка і відстані до місця впливу електронного променя на мішень із умови надійного захисту оператора від гальмівного рентгенівського випромінювання. У процесі експлуатації ілюмінаторне скло (або спеціально встановлене додаткове захисне скло) з внутрішньої сторони камери періодично очищається тампоном, змоченим ацетоном, бензином або технічним спиртом, від запилення парами оброблюваних матеріалів.

У конструкції установки передбачена система освітлення камери за допомогою електричних ламп накаливання.

Для створення необхідних умов роботи форвакуумних насосів у вакуумній системі встановлені ручні вакуумні вентиля та електромагнітні вакуумні клапани, а у паромасляних насосів – вакуумні затвори з електромеханічним приводом.

Форвакуумні механічні насоси розміщені поза лабораторією. Вони приводяться в обертання асинхронними електродвигунами, змонтованими з ними на єдиній станині.

Контроль тиску у вакуумній системі здійснюється двома іонізаційно-термопарними вакуумметрами типу ВІТ-2. Керування роботою всієї вакуумної станції здійснюється з пульта керування.

Високовольтне джерело 6 (рис. 2.1) виконане у металевому баку з трансформаторним маслом. До його складу входить джерело накалу та

зміщення пушки 5, високовольтний трансформатор з випрямлячем і дільником зворотного зв'язку. На кришці блоку встановлені прохідні ізолятори із клемми для підключення джерела до мережі.

Блок регулюючої лампи 7 також виконаний у металевому баку з трансформаторним маслом і складається з регулятора напруги та блока живлення регулюючої лампи. На виймальній частині бака змонтована регулююча лампа типу ПП-2 з системою трубопроводів для охолодження колектора лампи трансформаторним маслом. На кришці бака змонтований насос, який створює необхідний потік трансформаторного масла через радіатор колектора лампи. Для охолодження трансформаторного масла водою в баку є трубчастий змієвик, який через гідравлічне реле підключається до водяної магістралі. За допомогою високовольтного роз'єму на кришці бака та високовольтного кабелю 16 до анода лампи підключається позитивний полюс високовольтного випрямляча.

Блок регулюючої лампи 7 призначений для захисту від пробіїв пушки 5 і працює наступним чином: при погіршенні ізоляційного проміжку у пушці між керуючим електродом і анодом відбувається пробій цього проміжку, при цьому напруга на дільнику зворотного зв'язку стає рівною нулю. При нульовій або близькій до нуля напрузі на дільнику зворотного зв'язку спрацьовує граничний пристрій, котрий запускає мультівібратор, що виробляє імпульси тривалістю 150 мс з періодом проходження 3 мс. За час 3 мс лампа ПП-2 запирається і на відповідний час знімається прискорювальна напруга з пушки.

Якщо за час дії захисних імпульсів діелектричні властивості проміжку “керуючий електрод - анод” не відновлюються, процес повторюється.

Силовa шафа 8 конструктивно виконана у вигляді металевого ящика, усередині якого встановлені пускові, комутуючі, запобіжні, захисні, блокувальні пристрої. На лицьовій частині силової шафи нагорі розміщені три лампи, які сигналізують про наявність трифазної напруги.

Пульт 9 конструктивно виконаний у вигляді окремого блоку, на передній панелі якого розташовані органи керування енергокомплексом ЕЛА-15.

Шафа керування 10 також являє собою окремий блок, з лицьової сторони якого вставляються наступні блоки:

- вимірювальний;
- блок програм;
- блок керування пучком;
- стабілізатор струму фокусування;
- стабілізатор накалу;
- блок керування вакуумним клапаном електронної пушки.

Блок програм призначений для керування струмом пучка на початку обробки і керування його величиною та струмом фокусування наприкінці обробки.

Блок керування електронним пучком забезпечує відхилення пучка по осях X-X і Y-Y на кут 7° у наступних режимах:

- ручне відхилення по X-X і Y-Y;
- лінійне розгорнення пучка по осі X-X із частотою 800 Гц при ручному регулюванні амплітуди коливань;
- розгорнення пучка із частотою 800 Гц по двох півколах, окружності або еліпсу з ручним регулюванням діаметра та співвідношення осей еліпсу.

Відеопристрій 11 являє собою блок настільного типу, на передній панелі якого розміщені екран кінескопа і ручки керування. Він призначений для:

- спостереження на екрані кінескопа за виробом, що перебуває у вакуумній камері, до і після обробки;
- попереднього (грубого) наведення пучка електронів.

Установка має канал включення ПЕОМ, призначений для керування процесом обробки за допомогою електронно-обчислювальної машини. Підключення ЕОМ до електричної схеми установки здійснюється за допомогою кабелю через роз'єм та перемикач на пульті 9.

2.2 Методика вимірювання мікротвердості

2.2.1 Конструкція мікротвердоміра

Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Мікротвердомір ПМТ-3 являє собою спеціальний мікроскоп для вимірювання мікротвердості різних матеріалів. Він складається зі штатива, предметного столика, гвинтового окулярного мікрометра, навантажувального механізму і освітлювача.

Штатив складається з підставки 1 і колонки 2, котра виконана у вигляді розрізної втулки і має зовні стрічкову різьбу для переміщення у вертикальному напрямку кронштейна 4 з тубусом. Кронштейн переміщується за допомогою гайки 3 і закріплюється на колонці затискним гвинтом 5. У кронштейні розміщені механізми грубого і мікрометричного руху. Обертаючи барабани 6 грубого руху і барабани 7, 9 мікрометричного руху, можна перемістити тубус мікроскопа уверх або униз. Барабан 9 має мікрометричну шкалу з ціною мітки 0,002 мм.

Механізм грубого руху має регулювання ходу. Залежно від положення рукоятки 8 хід руху тубуса мікроскопа буде важче або легше. Цією же рукояткою можна застопорити переміщення тубуса.

Предметний столик 10 укріплений на підставці мікроскопа трьома гвинтами. Переміщення столика у двох взаємно перпендикулярних напрямках здійснюється мікрометричними гвинтами 11, 12. Ціна мітки шкали на барабані мікрометричних гвинтів становить 0,01 мм, максимальний хід столика – 10 мм. Відпустивши стопорний гвинт 13, рукояткою 27 можна повертати верхню частину столика, на яку встановлюється досліджуваний об'єкт, від упору до упору. Столик оснащений призмою 29 для дослідження поверхонь циліндричних деталей і планкою 26. На планці за допомогою пластиліну можна встановити зразок з опорною поверхнею будь-якої конфігурації.

Гвинтовий окулярний мікрометр 14 закріплюється на трубі тубуса гвинтом 15 з накаткою. Гвинтовий окулярний мікрометр при установці повинен бути розгорнутий таким чином, щоб напрямок руху вимірювальної сітки

проходив через діагональ відбитка і барабан мікрометра перебував праворуч від спостерігача.

Навантажувальний механізм виконаний у вигляді штока 16, укріпленого на двох пружинах, розташованих усередині металевго корпуса. У нижній кінець штока вставляється оправка 17 з алмазним індентором, а на стовщену частину штока встановлюється груз 18.

Для одержання відбитка опускають шток поворотом рукоятки 19 механізму навантаження проти годинникової стрілки. Пружини механізму навантаження відрегульовані таким чином, що під дією власної ваги штока і наконечника з алмазною пірамідою відбиток на поверхні досліджуваного зразка не утворюється. Одержання відбитка стає можливим тільки після встановлення контрольного грузу масою 0,5г. Випробування здійснюється на шліфі монокристала алюмінію або олова при збільшенні 487.

Пружна деформація пружин згодом змінюється і, відповідно, змінюється чутливість навантажувального механізму. Відновлення його чутливості здійснюється обертанням гайки 20. Для цього слід попередньо відпустити гвинт 21, що стягує лапки зовнішньої втулки, і після регулювання чутливості навантажувального механізму знову затягти його.

Освітлювач 22 укріплений на тубусі мікроскопа і служить для освітлення досліджуваної площини шліфа. Він оснащений світлофільтрами 24, які використовуються для зміни інтенсивності освітлення. Освітлювач живиться від електромережі через понижувальний трансформатор 220/8В. Схема перемикання обмоток трансформатора дана на його кришці. Для плавного регулювання інтенсивності освітлення в ланцюг вторинної обмотки трансформатора послідовно з навантажкою включений реостат.

2.2.2 Визначення мікротвердості

Методика випробувань на мікротвердість стандартизована (ДСТУ 9450-93). Мікротвердість визначають по лінійній величині діагоналі відбитка, що утворюється при вдавлюванні у досліджуваний матеріал алмазної піраміди, яка

має квадратний остов і кут при вершині між протилежними гранями 136° . Форма алмазної піраміди така ж, як і при випробуванні на твердість по Віккерсу (ДСТУ 2999 - 92). Точність основних геометричних розмірів піраміди регламентується ДСТУ 9377 - 93.

Поверхні зразка та індентора повинні бути сухими, без змащення і забруднень. Зразок встановлюється на предметному столику мікротвердомера таким чином, щоб площина досліджуваного шліфа Z утворювала прямий кут з геометричною віссю піраміди X (рис. 2.3).

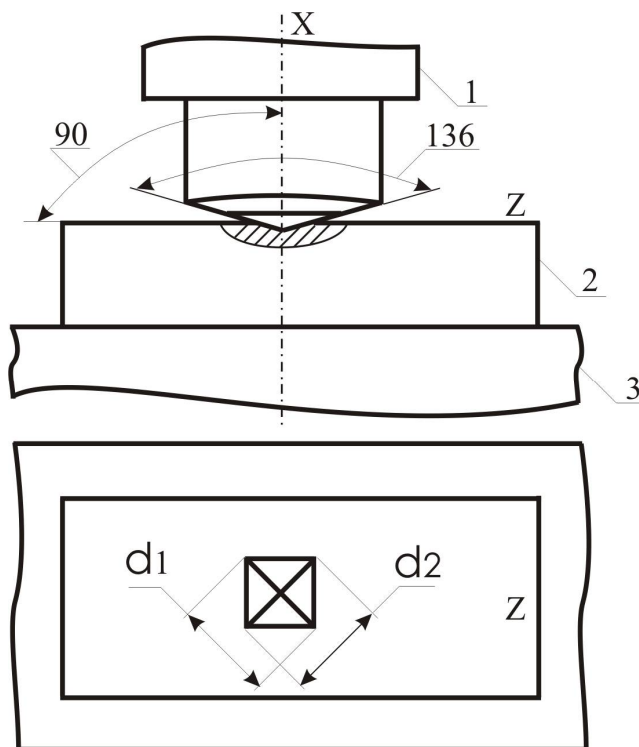


Рисунок 2.3 – Схема вимірювання мікротвердості:

1 – алмазна піраміда; 2 – досліджуваний зразок; 3 – основа

Прикладання навантаження до алмазної піраміди здійснюється грузами вагою від 2 до 200 г. Відповідно до ДСТУ 9540 - 93 при визначенні мікротвердості використовують наступні навантаження: 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200 і 500г. Після вдавлення індентора на поверхні шліфа залишається прямокутний або квадратний відбиток (рис. 2.3), діагоналі якого вимірюються за допомогою мікроскопа і гвинтового окулярного мікрометра. Число

мікротвердості являє собою (як і при визначенні твердості по Віккерсу) відношення величини навантаження до умовної площі бічної поверхні відбитка:

$$H = \frac{1,854P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де H – мікротвердість, МПа;

P – навантаження на піраміду, Н;

d – середнє арифметичне діагоналей відбитка, мм: $d = (d_1 + d_2)/2$ (рис. 2.3).

2.2.3 Порядок проведення випробувань на мікротвердість

Випробування на мікротвердість проводяться у наступній послідовності:

- 1) підготовка поверхні зразка;
- 2) встановлення зразка на предметний столик і настроювання мікротвердоміра;
- 3) вдавлювання алмазної піраміди у поверхню зразка;
- 4) вимірювання діагоналей відбитка;
- 5) визначення числа мікротвердості.

Підготовка поверхні зразка полягала в їхньому шліфуванні і наступному поліруванні.

Настроювання мікротвердоміра і установка зразка на предметний столик. Приготовлений для випробування зразок встановлюють на предметний столик мікротвердоміра таким чином, щоб поверхня шліфа була строго перпендикулярна до напрямку переміщення піраміди при вдавлюванні. При порушенні цієї умови форма відбитка спотворюється, що позначається на точності визначення мікротвердості. Чим більше спотворена форма відбитка, тим більше погрішність у визначенні мікротвердості.

Правильного положення шліфа відносно індентора досягають впресовуванням зразка за допомогою ручного преса у тонкий шар пластиліну на поверхні сталевій настановній пластини, якою оснащується мікротвердомер.

Зразок повинен бути закріплений так, щоб під дією навантаження він не прогинався. Для закріплення настановної пластини на столику мікротвердоміра на її нижній стороні є два штифти, які входять в отвори на робочій поверхні столика.

З'єднавши пластину зі зразком, верхню плиту столика переміщують мікрометричними гвинтами доти, доки досліджувана ділянка шліфа не опинеться під мікроскопом. При цьому столик повинен бути притиснутий до лівого упору.

Оглядаючи досліджувану ділянку шліфа і вибираючи місце для відбитка, потрібно ретельно фокусувати мікроскоп, оскільки від цього залежить точність прикладання навантаження. Для підвищення контрастності зображення використовують світлофільтри, діафрагмування та темнопольне освітлення.

Місце для відбитка слід вибирати так, щоб відстань від його центра до краю зразка було не менше подвоєної довжини діагоналі. Приблизно таку ж найменшу відстань необхідно залишати між геометричними центрами сусідніх відбитків, щоб запобігти їхньому перекриттю. Якщо один з відбитків більше іншого, то між їхніми центрами повинна бути відстань не менше двох діагоналей більшого відбитка.

При закріпленні індентора у патроні навантажувального пристрою потрібно стежити за тим, щоб збігалися риски, нанесені на оправці піраміди і на патроні. Це забезпечує правильне положення індентора відносно площини шліфа і його надійну фіксацію у патроні.

Мікротвердомір повинен бути встановлений на підкладці з губчатої гуми, яка подавляє зовнішні вібраційні впливи.

Перед випробуванням перевіряють справність навантажувального пристрою. Для цього 2 - 3 рази вхолосту опускають шток з індентором без навантаження на полірований плоский зразок з алюмінію або свинцю. Шток повинен рухатись плавно, без ривків і помітного тертя, а на поверхні зразків не повинно бути відбитків. При справному механізмі навантаження відбитки можуть бути отримані тільки під нагрузкою 0,5 - 1,0г.

Вдавлення алмазної піраміди у поверхню зразка. Після встановлення груза на шток механізму навантаження і фокусування мікроскопа столик зі зразком повертають до упору проти годинникової стрілки, при цьому обране для відбитка місце на досліджуваній області шліфа підводиться під піраміду. Навантаження здійснюють повільним і плавним поворотом рукоятки аретиру проти годинникової стрілки. Швидкість опускання піраміди повинна бути настільки малою, щоб динамічний вплив мас штока, індентора і груза на розміри відбитка був відсутнім. Дана умова забезпечується при тривалості опускання піраміди 8 - 15с. Тривалість витримки під навантаженням регламентується стандартом і становить 5с.

По закінченні витримки шток з індентором повертають у вихідне положення поворотом рукоятки аретира до упору за годинниковою стрілкою. Предметний столик плавно, без поштовхів, повертають до упору за годинниковою стрілкою, і вимірюють діагональ відбитка.

Вимірювання діагоналей відбитка і вибір нагрузки. Точне вимірювання діагоналей відбитка при визначенні мікротвердості має першорядне значення. Як правило, погрішності вимірювання діагоналей відбитка становлять найбільшу частину від загальної помилки визначення мікротвердості. Джерелом помилок при вимірюванні може бути неточне наведення лінзи окуляр - мікрометра на різкість перехрестя і шкали. Це створює паралакс шкали і зображення відбитка. При правильному наведенні лінзи зображення відбитка повинне лежати у фокальній площині окуляра.

Точність вимірювання діагоналей при рівномірному, яскравому освітленні зростає. Контрастність зображення підвищують за допомогою діафрагмування і світлофільтрів. Щоб уникнути оптичних помилок, слід розташовувати відбиток у центральній частині поля зору.

З погрішностей, які створюються гвинтовою парою окуляр - мікрометра, найбільш значимою є помилка, обумовлена мертвим ходом гвинта. Щоб виключити цю погрішність, необхідно підводити перехрестя до контуру відбитка завжди в одному і тому ж напрямку.

Відомі два способи вимірювання діагоналей відбитків. На рис. 2.4 показаний спосіб, при якому напрямок переміщення перехрестя збігається з вимірюваною діагоналлю. Для вимірювання діагоналей відбитка по цьому способі окуляр-мікрометр закріплюють у такому положенні, при якому перехрестя точно рухається вздовж вимірюваної діагоналі. Далі, переміщуючи перехрестя в одному напрямку (наприклад, праворуч - ліворуч) послідовно наводять його спочатку на правий кінець діагоналі, а потім на лівий. Різниця відліків – початкового Z_1 і кінцевого Z_2 , – знятих у цих позиціях по шкалі барабана окуляр-мікрометра, помножена на ціну мітки шкали g , дорівнює довжині горизонтальної діагоналі d_1 :

$$d_1 = (Z_1 - Z_2)g. \quad (2.2)$$

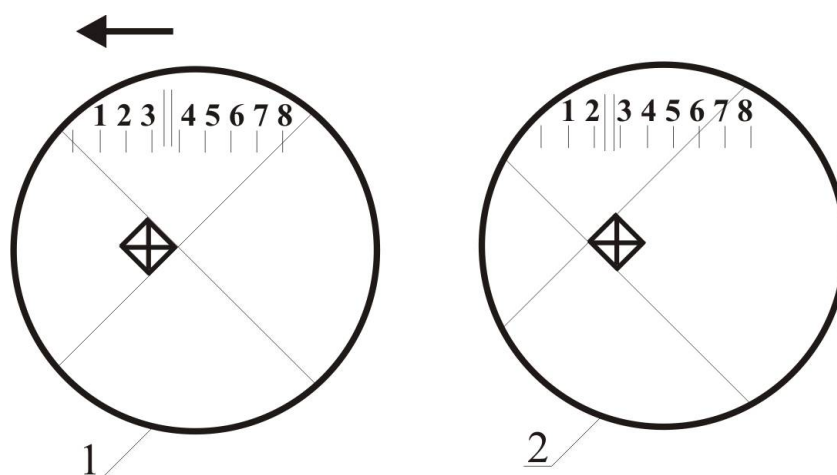


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання діагоналей відбитка при русі перехрестя вздовж діагоналі: 1, 2 – відповідно початкове і кінцеве положення перехрестя; стрілкою позначений напрямок переміщення перехрестя при обертанні рукоятки гвинтового окуляр - мікрометра

Для вимірювання довжини другої діагоналі окуляр - мікрометр повертають на 90° і закріплюють його у новому положенні. Перехрестя повинне рухатись точно вздовж вертикальної діагоналі відбитка. Спочатку його

наводять на один кінець діагоналі, потім на інший, і по вимірювальній шкалі барабана окуляр-мікрометра визначають довжину вертикальної діагоналі d_2 .

При незмінному положенні окуляр - мікрометра перехрестя рухається під кутом 45° до вимірюваних діагоналей. Окуляр - мікрометр закріплюють таким чином, щоб лінії перехрестя були паралельні діагоналям відбитка (рис. 2.5, а, б). Переміщуючи перехрестя в одному напрямку, послідовно наводять лінії перехрестя на всі кути відбитка (рис. 2.5, в - е) і роблять чотири відліки для визначення довжин обох діагоналей.

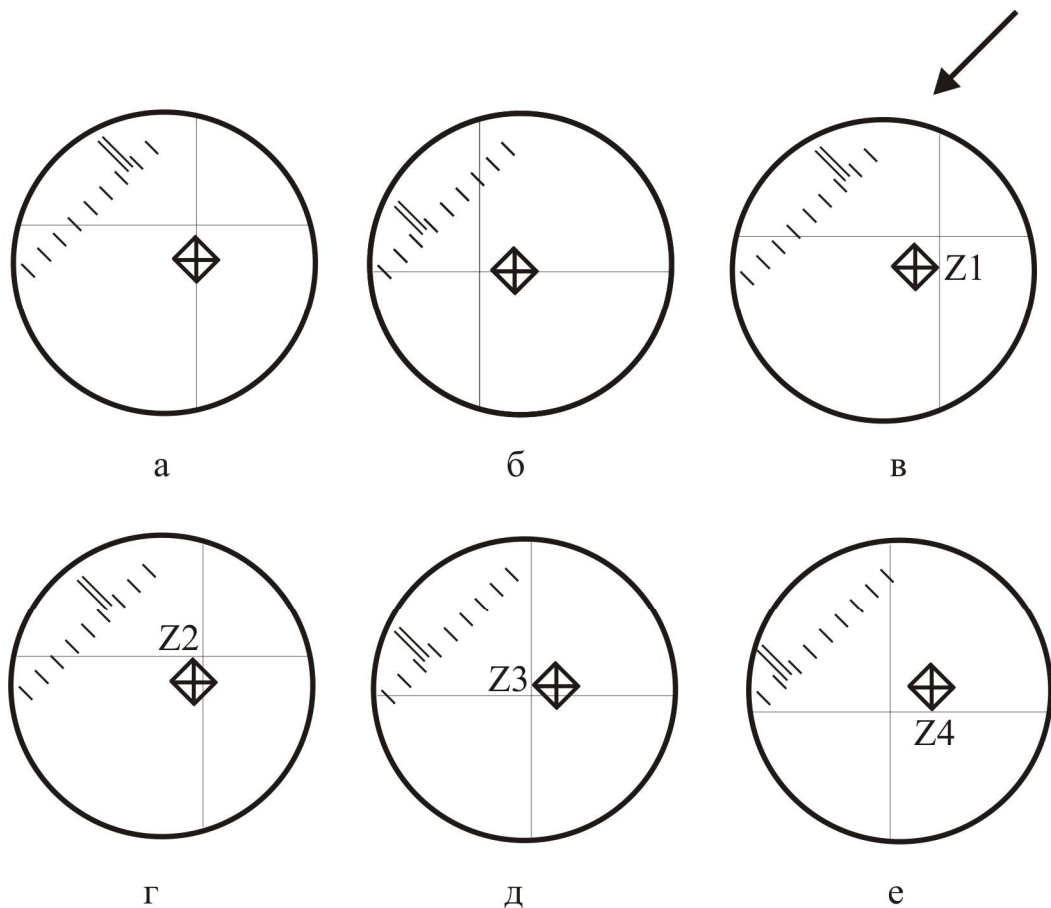


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання діагоналей відбитка при незмінному положенні окуляр-мікрометра: а, б – контроль установки окуляр-мікрометра (лінії перехрестя повинні бути паралельні діагоналям відбитка); в, е – вимірювання довжин діагоналей відбитка; стрілкою зазначений напрямок руху перехрестя окуляр - мікрометра

Позначимо через Z_1 і Z_3 відліки по вимірювальній шкалі окуляр-мікрометра, які відповідають контакту початкової і кінцевої крапки горизонтальної діагоналі відбитка з вертикальною лінією перехрестя, а через Z_2 і Z_4 – аналогічні відліки для вертикальної діагоналі відбитка. Тоді довжини горизонтальної (d_1) і вертикальної (d_2) діагоналей можна визначити з наступних співвідношень:

$$d_1 = g(Z_1 - Z_3)\cos(45^\circ); \quad (2.3)$$

$$d_2 = g(Z_2 - Z_4)\cos(45^\circ). \quad (2.4)$$

Розрахункова довжина діагоналі відбитка (d) дорівнює середньому арифметичному довжин горизонтальної і вертикальної діагоналей.

Ціна мітки шкали барабана окуляр - мікрометра залежить від збільшення мікроскопа. Мікротвердомер ПМТ-3 оснащений двома ахроматичними об'єктивами $F = 6,16$; $A = 0,65$ і $F = 23,2$; $A = 0,17$. Загальне збільшення мікроскопа із зазначеними об'єктивами і 15 - кратним окуляром становить відповідно 487 і 130. При збільшенні 487 ціна однієї мітки вимірювальної шкали барабана окуляр-мікрометра (g) дорівнює 0,31 мкм.

При виборі величини навантаження для вдавлення індентора керуються розмірами об'єкта, метою випробувань і умовами одержання необхідної точності вимірювань. При дуже малих відбитках точність визначення мікротвердості знижується внаслідок специфічного стану тонкого приповерхнього шару зразка, а також внаслідок зростаючого впливу погрішності вимірювання діагоналі відбитка. Оскільки при вимірюванні діагоналей відбитків абсолютна погрішність, яка дорівнює половині ціни мітки шкали барабана окуляр-мікрометра (0,15 мкм), не залежить від довжини діагоналі, відносна погрішність зменшується при збільшенні довжини діагоналі. Так, наприклад, при довжині діагоналі 3 мкм відносна помилка вимірювання дорівнює 5 % (розсіювання значень довжини діагоналі становить 10 %), а при довжині діагоналі 30 мкм – 0,5 %. Для запобігання великого

розкиду чисел мікротвердості випробування матеріалів твердістю більше 5000 МПа слід проводити при навантаженнях не менше 20г. Матеріали твердістю 1000 - 5000 МПа не можна випробовувати при навантаженнях менше 5г, а матеріали твердістю менше 1000 МПа – при навантаженнях менше 2г (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Залежність мінімального навантаження на алмазну піраміду від твердості матеріалу при випробуванні на мікротвердість

Твердість матеріалу	Величина мінімального навантаження на індентор, г
Більше 5000 МПа	20
1000 - 5000 МПа	5
Менше 1000 МПа	2

У загальному випадку, з огляду на зростаючий вплив погрішності вимірювання при зменшенні довжини діагоналі відбитка, не слід визначати мікротвердість по відбитках, довжина діагоналі яких менше 4 - 5 мкм.

Для підвищення точності визначення мікротвердості доцільно збільшувати навантаження на індентор. Однак розміри відбитка залежать від розмірів досліджуваної області шліфа і для неоднорідних гетерогенних матеріалів обмежені розмірами окремих структурних складових. Крім того, з підвищенням навантаження на індентор на точність одержуваних результатів сильніше впливають швидкість і тривалість навантаження. З огляду на різноманіття факторів, що впливають на вибір навантаження на індентор, рекомендують у кожному конкретному випадку визначати його оптимальну величину дослідним шляхом.

2.3 Вимірювання твердості

Твердість вимірювалась за шкалами Бринеля та Роквела відповідно на твердомірах *ТШ* та *ТК*. Підготовка зразків для вимірювання твердості

здійснювалась наступним чином. Відлитий циліндричний зразок діаметром 40 мм та довжиною 100 мм розрізався на токарському верстаті *16K20* відрізним різцем на 4 окремих зразка. Потім торці зразків вирівнювались прохідним упорним різцем.

Випробування на твердість по Бринелю (рис. 2.6) здійснювалось вдавлуванням у поверхню зразка сталеві кульки діаметром 10 мм. Зусилля вдавлування – 30000 Н, тривалість витримки під навантаженням – 10 с. Циліндричний зразок торцевою поверхнею встановлювався на предметний столик твердоміра. Випробування складалось з повідомлення зразку двох навантажень: попереднього та остаточного. Попереднє навантаження повідомлялось вручну шляхом підняття столика так, щоб кулька вдавлувалась у поверхню зразка. Це досягалось поворотом маховика за годинниковою стрілкою до упору. Остаточне навантаження (30000 Н) повідомлялось автоматично шляхом натискання кнопки, розташованої на корпусі твердоміру. Навантаження діяло протягом 10с, після чого силова частина твердоміру автоматично відключалась. Потім поворотом маховика проти годинникової стрілки столик опускався. На поверхні зразка залишався відбиток. Діаметр відбитка вимірювався за допомогою спеціальної лупи, що входила у комплект твердоміра. Вимірювання діаметру відбитку проводилось у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Діаметр відбитка розраховувався як середнє арифметичне цих двох вимірювань. Значення твердості (НВ) розраховувалось по рівнянню:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.5)$$

де P – навантаження на кульку, Н; $P = 30000$ Н;

D – діаметр кульки, мм; $D = 10$ мм;

d – середній діаметр відбитка, мм.

Нанесення відбитків проводили таким чином, щоб відстань від центру відбитка до краю зразка була не менше двох діаметрів відбитка. Середнє значення твердості зразка визначалось за результатами чотирьох вимірювань. Кожне наступне вимірювання проводили на відстані не менше двох діаметрів від попереднього відбитка.

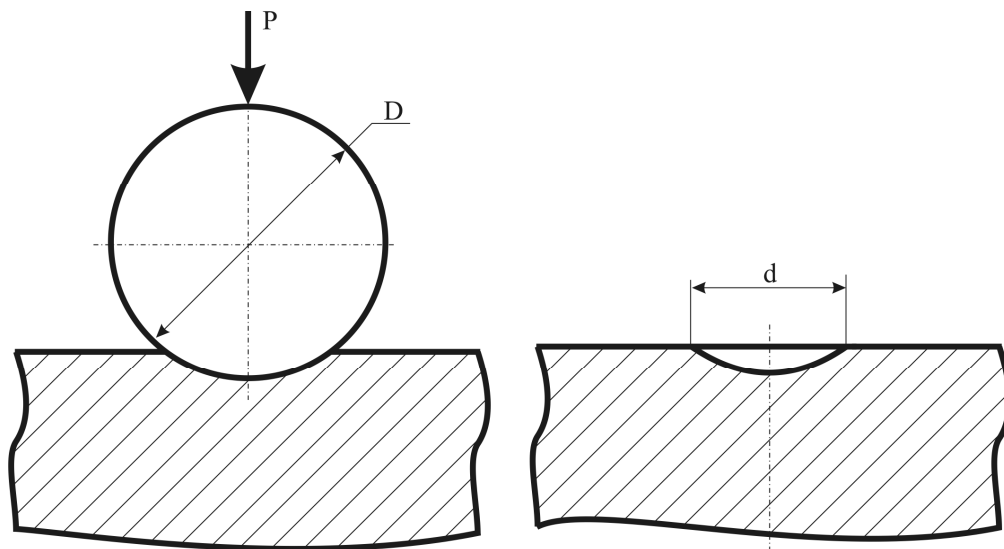


Рисунок 2.6 – Схема вимірювання твердості по Бринелю

Твердість по Роквелу визначалась по глибині вдавлювання в поверхню зразка алмазного конуса з кутом у вершині 120° (рис. 2.7). При випробуванні спочатку прикладалось попереднє навантаження ($P_0 = 100$ Н), а потім – остаточне навантаження ($P = 1500$ Н). Попереднє навантаження прикладалось вручну, остаточне – в автоматичному режимі.

Число твердості по Роквелу:

$$HRC = \frac{k - (h - h_0)}{c}, \quad (2.6)$$

де h_0 – глибина проникнення (мм) алмазного конуса у поверхню зразка під дією попереднього навантаження $P_0 = 100$ Н;

h – глибина проникнення (мм) алмазного конуса у поверхню зразка під дією остаточного навантаження $P = 1500$ Н;

k, c – постійні величини; для конуса $k = 0,2$ мм; $c = 0,002$ мм.

Різниця $h - h_0$ глибин проникнення алмазного конуса у зразок під дією навантажень P_0 та P вимірювалась в автоматичному режимі і автоматично переводилась в одиниці твердості (HRC). Твердість по Роквелу (HRC) відраховувалась по чорній шкалі твердоміру “С”.

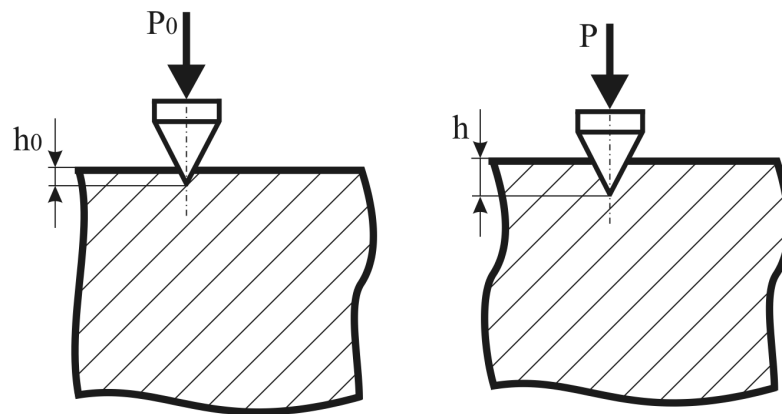


Рисунок 2.7 – Схема вимірювання твердості по Роквелу: P_0 – попереднє навантаження ($P_0 = 100$ Н); h_0 – глибина проникнення алмазного конуса у зразок під дією попереднього навантаження; P – остаточне навантаження ($P = 1500$ Н); h – глибина проникнення алмазного конуса у зразок під дією остаточного навантаження

2.4 Методика дослідження мікроструктури

Мікроструктуру чавуну досліджували на оптичному мікроскопі МІМ-8М. Для виготовлення мікрошліфів використовувались зразки, на яких вимірювалась твердість по Бринелю та Роквелу. Рівну торцеву поверхню зразків, вільну від відбитків, шліфували на наждачному папері по ГОСТ 10054-82, ГОСТ 6456-82, послідовно зменшуючи розмір абразивних зерен в папері: Р2000, Р1500, Р1000...А320. Після останнього шліфувального переходу на наждачному папері А320 здійснювали полірування мікрошліфів на крузі з волоку до дзеркального блиску. В якості абразиву використовувалась суспензія,

що складалась з дистильованої води та пасти ГОІ. Абразивна паста ГОІ випускається по технічним умовам Державного оптичного інституту.

Поліровані зразки промивались в етиловому спирті та акуратно протирались фільтрувальним папером. Для хімічного травлення мікрошліфів використовувалась царська водка.

Для шліфування та полірування мікрошліфів використовувався шліфувально-полірувальний станок СШП-12.

3 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Загальні підходи до визначення температурного поля при лазерній та електронно-променевої обробці

Теплове джерело, еквівалентне дії лазерного та електронно-променевого променя при поверхневій обробці металевих матеріалів, є поверхневим і розподіленим, оскільки метали мають великий коефіцієнт поглинання ($\alpha = 10^4 - 10^6 \text{ см}^{-1}$), тобто практично уся енергія випромінювання поглинається у вузькому поверхневому шарі (скін-шарі), і радіус плями нагрівання набагато більше глибини дифузії тепла ($r_0 \gg (at)^{1/2}$).

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

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

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

a – 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. $T(\infty, t) = T(z, 0) = 0$, тобто зразок, що опромінюється, є напівнескінченим тілом, яке має в початковий момент часу температуру $T_n = 0$.

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

$$q(z, t) = AW_p \cdot \varphi(t), \quad (3.2)$$

де A – поглинальна здатність матеріалу, що обробляється;

W_p – просторовий розподіл щільності потужності випромінювання в плямі фокусування;

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

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]:

$$T(z, t) = \frac{2AW_p \sqrt{at}}{k} \cdot \text{ierf} \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} \right], \quad (3.3)$$

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

$\text{ierf}(y)$ – 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:

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

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

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

У наведених залежностях час поширення теплового потоку t приблизно дорівнює часу впливу лазерного випромінювання на матеріал, тобто практично співпадає з тривалістю лазерного імпульсу τ . 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]:

$$T(z, t) = \frac{2AW_p \sqrt{a}}{k} \left[\sqrt{t_0} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) - \sqrt{t_0 - t} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a[t_0 - t]}}\right) \right].$$

При $z = 0$:

$$T(0, t) = \frac{2AW_p \sqrt{a}}{k} \left[\sqrt{\frac{t_0}{\pi}} - \sqrt{\frac{t_0 - t}{\pi}} \right]. \quad (3.6)$$

Максимальна глибина проникнення заданої ізотерми:

$$Z_{\max} = \sqrt{\frac{4at_0(t_0 - t) \ln \sqrt{\frac{t_0}{t_0 - t}}}{t}}, \quad (3.7)$$

де t_0 – час досягнення заданою ізотермою максимальної глибини;

t – тривалість імпульсу;

T_3 – задана температура нагрівання;

$T(0, t)$ – температура поверхні.

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

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

при $0,3 < b < 0,75$ виразом:

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

при $0,75 < b < 1$ виразом:

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

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:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{AW_p \sqrt{a}}{k} \cdot \left[\frac{\exp\left[-\frac{z^2}{4at}\right]}{2\sqrt{\pi t_0}} - \frac{1}{2\sqrt{\pi(t_0 - t)}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4a(t_0 - t)}\right] \right] \quad (3.11)$$

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: $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \delta_2 = (2 \cdot 10^{-3} + \delta_1) \text{ м}; \tau_u = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \tau_k = 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}; q = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2; \alpha = 20 \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{°С)}; T_c = 20 \text{ °С}; T_0 = 20 \text{ °С}.$

Прийняті позначення:

δ_1 – товщина плівки;

τ_k – час закінчення процесу обробки;

δ_2 – 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;

T_0 – 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_u . Це перевищення тим більше, ніж більше віддалена від поверхні нагрівання розрахункова точка.

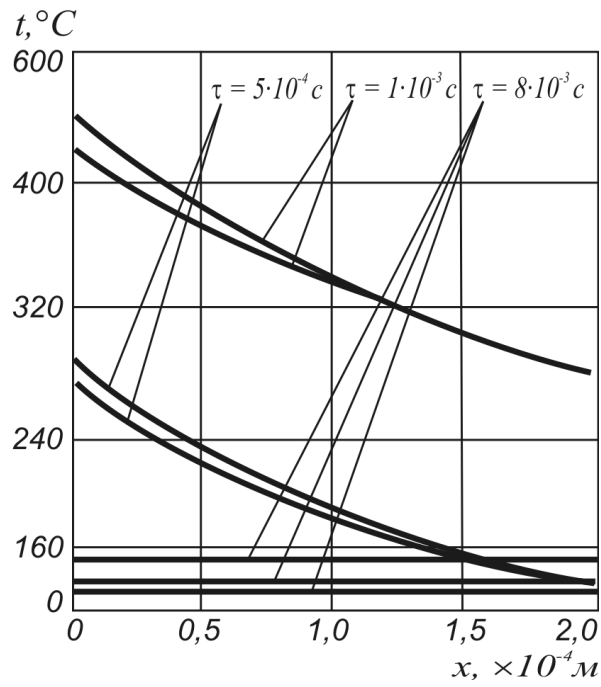


Рисунок 3.1 – Розподіл температури по товщині плівки у різні моменти часу τ для $\delta_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ м: $-\Delta-$ - нелінійна задача; $-\cdot-$ - лінійна задача при $t_{оп} = 127^\circ\text{C}$; $-x-$ - лінійна задача при $t_{оп} = 327^\circ\text{C}$; $\tau_{н} = 1 \cdot 10^{-3}$ с

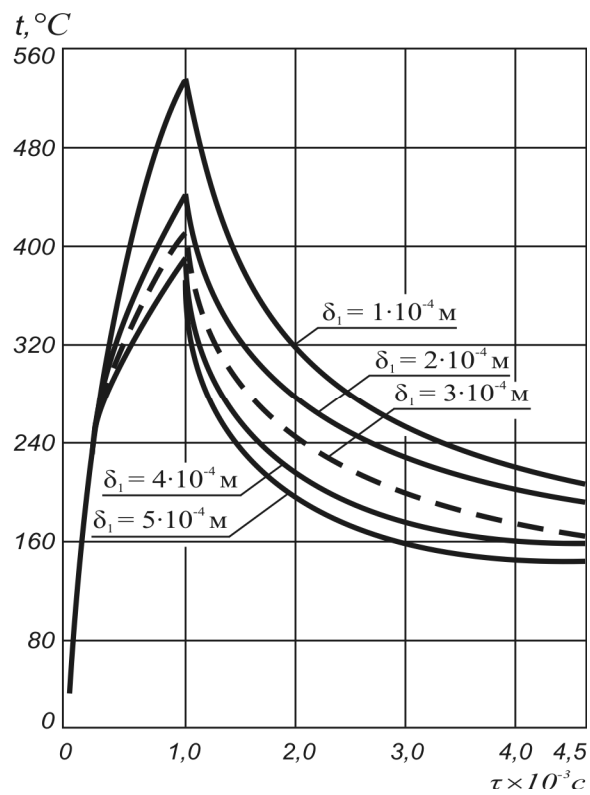


Рисунок 3.2 – Зміна у часі температури поверхні нагрівання при різних значеннях товщини плівки δ_1 ; $\tau_{н} = 1 \cdot 10^{-3}$ с

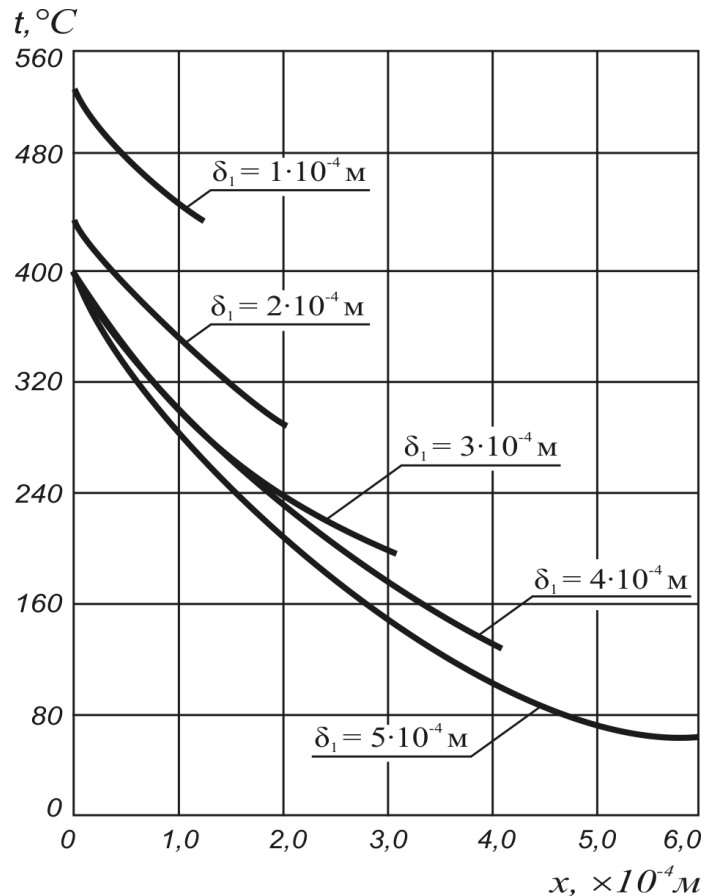


Рисунок 3.3 – Розподіл температури по товщині плівки при $\tau_i = 1 \cdot 10^{-3}$ с

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 процесу теплопереносу у системі після припинення тепловідводу, то тут характерною є наступна картина. Спочатку реалізується процес вирівнювання температури плівки через її вису теплопровідність. І лише потім, після закінчення деякого інтервалу часу, відбувається 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.

У зв'язку з характерною для останнього періоду тенденцією до вдосконалення технологічних процесів виникає необхідність у проведенні уточнених досліджень температурних режимів тонкоплівочних систем і, зокрема, в урахуванні теплових ефектів, обумовлених залежністю від температури теплофізичних властивостей матеріалу, тобто нелінійністю першого роду. Однак оскільки рішення нелінійних задач сполучено з відомими математичними труднощами, представляє інтерес розгляд можливості їхньої лінеаризації за допомогою знаходження теплофізичних властивостей матеріалів по деякій характерній, так званій визначальній температурі $T_{оп}$. Проведені дослідження показали, що для розглянутих умов може бути знайдена така визначальна температура, при якій забезпечується прийнятне узгодження результатів рішення лінійної та нелінійної задач. Відповідні результати наведені на рис. 3.2. При $T_{оп} = 327^{\circ}\text{C}$ спостерігається цілком задовільний збіг температур лінійної $T_{л}$ і нелінійної $T_{нл}$ задач. Наприклад, при $\tau = 8 \cdot 10^{-4}$ і $1 \cdot 10^{-3}$ с максимальне розходження порівнюваних рішень складає відповідно $5,88$ і $0,33^{\circ}\text{C}$.

У початковий період тепловідводу товщина δ_1 практично не впливає на температуру поверхні, яка опромінюється, що визначається наявністю відзначеної вище зони локалізації процесу. Однак після закінчення деякого часового інтервалу, різного для різних значень δ_1 , вплив товщини плівки може виявитись досить істотним. Причому, чим менше товщина плівки, тим раніше у часі позначається її вплив на температуру T_{max} . Зі збільшенням значення максимальної температури процесу T_{max} падає. Однак по мірі зростання товщини плівки це падіння зменшується, причому залежність $T_{max} = T_{max}(\delta)$ носить асимптотичний характер. Очевидно, мінімальне значення температури T_{max} буде при δ_1 , що прагне до нескінченності ($T_{max}^* = T_{max}; \delta_1 \rightarrow \infty$). Однак практично вже при порівняно невеликих товщинах плівки температура T_{max} несуттєво відрізняється від відзначеного граничного значення T_{max}^* . Так, відповідно до проведених розрахунків, при товщинах δ , рівних $1 \cdot 10^{-4}$; $2 \cdot 10^{-4}$; $3 \cdot 10^{-4}$; $4 \cdot 10^{-4}$; $6 \cdot 10^{-4}$ м, максимальна температура T_{max}

складає відповідно 517,46; 428,8; 400,76; 391,84; 388,88°C. Описана закономірність дозволяє ввести поняття граничної товщини плівки $\bar{\delta}_{\text{гр}}$. Остання визначається як мінімальна товщина плівки, при якій на поверхні нагрівання досягається із заданою точністю граничне значення температури T_{max}^* . Існує деяке граничне значення товщини δ_1^* , при якому температура T_{max} практично досягає мінімального значення, так що подальше збільшення δ_1 вже не дає можливості суттєво зменшити величину T_{max} .

Таким чином, при виборі раціональних розмірів плівкових покриттів необхідно враховувати ту обставину, що збільшення товщини плівки дозволяє знизити максимальний рівень її температури лише в певних межах.

Температурні залежності при використанні безперервного лазерного випромінювання є більш складними. У цьому випадку на поверхню напівнескінченного тіла діє теплове джерело, яке рухається вздовж осі ОХ. Слід розрізняти джерело, яке повільно рухається і джерело, яке рухається швидко. Перший випадок має місце тоді, коли вирівнювання температури встигає відбутися раніше, ніж промінь пройде відстань, що дорівнює радіусу плями фокусування.

При цьому максимальна температура нагрівання матеріалу перебуває в центрі плями фокусування, тому задачу можна вирішувати, як з нерухомим тепловим джерелом.

У міру збільшення швидкості переміщення теплового джерела максимум температури зрушується до краю теплового джерела у сторону, протилежну напрямку його переміщення. Якщо теплове джерело переміщається з постійною швидкістю, то при цьому через деякий проміжок часу температурне поле, що утвориться навколо джерела, що рухається, стабілізується, і розподіл температури залежить тільки від співвідношення часу теплонасичування зразка і часу проходження світловою плямою відстані, рівної радіусу плями. Процес нагрівання напівнескінченного тіла рухливим тепловим джерелом, щільність потужності якого розподілена за законом Гауса, описується диференціальними рівняннями:

$$\frac{d^2\Theta}{d\bar{x}^2} + \frac{d^2\Theta}{d\bar{y}^2} + \frac{d^2\Theta}{d\bar{z}^2} + 2\text{Pe} \frac{d\Theta}{d\bar{x}} - \frac{d\Theta}{dF_0} = 0; \quad (3.12)$$

$$\left. \frac{d\Theta}{d\bar{z}} \right|_{z=0} = -q_0 \exp\left[-\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)\right]; \quad (3.13)$$

$$\Theta(\infty, \bar{y}, \bar{z}, F_0) = \Theta(\infty, \bar{x}, \bar{z}, F_0) = \Theta(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, 0) = 0; \quad (3.14)$$

$$\Theta(\bar{x}, \bar{y}, \infty, F_0) = 0, \quad (3.15)$$

де x, y, z – координати точки, в якій розраховується температура;

$$\Theta = \frac{T - T_n}{T_c}; \quad \bar{x} = \frac{x}{r_0}; \quad \bar{y} = \frac{y}{r_0}; \quad \bar{z} = \frac{z}{r_0}; \quad \bar{q} = \frac{q_0 r_0}{k T_c};$$

$$\text{Pe} - \text{число Пекле}; \quad \text{Pe} = \frac{v r_0}{2a};$$

$$\text{Fo} - \text{число Фур'є}; \quad \text{Fo} = \frac{at}{r_0^2};$$

T_n, T_0 – відповідно поточна і початкова температура тіла;

T_c – гранична температура центральної точки нерухомого нормально

розподіленого джерела теплоти: $T_c = \frac{P}{2kr_0 \sqrt{\frac{1}{\pi}}}$;

r_0 – радіус плями нагрівання;

t – час нагрівання;

v – швидкість руху джерела;

$P = AP_0$ – ефективна теплова потужність джерела;

q_0 – щільність теплового потоку у центрі плями нагрівання.

Граничний стан процесу поширення теплоти, що відповідає квазістаціонарному режиму, від рухливого нормально розподіленого джерела енергії в напівнескінченному тілі описується відомою залежністю [6], яка у прийнятих позначеннях має вигляд:

$$\Theta_{\infty} = \frac{2}{\pi} \exp(-\text{Pe} \cdot \bar{x}) \int_0^{\infty} \frac{dF_0}{(1+4F_0)\sqrt{F_0}} \cdot \exp\left[-\frac{\bar{z}^2}{4F_0} - \frac{\bar{r}^2}{1+4F_0} - \frac{\text{Pe}^2}{4}(1+4F_0)\right]; \quad (3.16)$$

$$\text{де } \bar{r} = \frac{r}{r_0};$$

$$r - \text{плоский радіус - вектор: } r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Використовуючи цю залежність, можна визначити температурне поле в напівнескінченному тілі, на яке діє лазерний або електронно-променевий промінь, що рухається зі швидкістю v . Знаючи температурне поле, можна прогнозувати характер структурно-фазових перетворень, що протікають у поверхневому шарі матеріалу, і його властивості.

У практиці поверхневого зміцнення за допомогою лазерного випромінювання оброблювані деталі не завжди є напівнескінченими у теплофізичних змісті тілами. Вони можуть бути істотно обмежені по товщині. Причому товщина деталі може бути такою, при якій температурне поле, що утворюється в ній при лазерному та електронно-променевому опроміненні, буде істотно відрізнятися від температурного поля у напівнескінченному тілі при рівних умовах опромінення.

Товщина деталі, при якій це розходження для даних умов опромінення несуттєво, є граничною ($\delta_{\text{гр}}$). Очевидно, що її величина залежить від енергетичних параметрів обробки, теплофізичних характеристик матеріалу і точності зіставлення порівнюваних температурних полів.

В якості міри відхилення порівнюваних температур може бути використана величина відносної помилки [4, 6]:

$$\rho = \left(1 - \frac{\Theta_{\infty}}{\Theta_k}\right) \cdot 100, \%$$

де Θ_∞ , Θ_k – відповідно безрозмірні температури напівнескінченного тілу і плоского шару.

Математична модель процесу для плоского шару аналогічна наведеної вище для напівнескінченного тілу. Однак замість граничної умови на нескінченності задається умова адіабатичності нижньої поверхні плоского шару.

Аналіз (3.16) показує, що величина відносних відмінностей температур плоского шару і напівнескінченного тіла із часом зростає, досягаючи максимального значення при квазістаціонарному режимі.

У цьому зв'язку вплив обмеженості розмірів виробів на процес теплопереносу при зміцненні матеріалу рухомими концентрованими джерелами енергії доцільно розглядати саме для умов, що відповідають квазістаціонарному режиму, тобто граничному стану процесу.

Розподіл температури в напівнескінченому тілі описується залежністю (3.16).

Для знаходження розподілу температури в плоскому шарі може бути використаний метод джерел у сполученні із принципом суперпозиції та відбиття [6]. Остаточний вираз для визначення температури плоского шару у квазістаціонарному режимі можна представити у вигляді:

$$\theta_k = \frac{2}{\pi} \exp(-\text{Pe} \cdot \bar{x}) \times \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} \int_0^{\infty} \frac{dF_0}{(1+4F_0) \cdot \sqrt{F_0}} \cdot \exp\left(-\frac{(\bar{z}-2\delta_{\text{rpi}})^2}{4F_0} - \frac{1}{(1+4F_0) \cdot \bar{r}^2} - \frac{\text{Pe}^2}{4}(1+4F_0)\right). \quad (3.17)$$

Вочевидь, відмінності температурних полів напівнескінченного тіла та плоского шару повинні зменшуватися по мірі зростання величини $\bar{\delta}$. Результати зіставлення наведених рішень (3.16), (3.17) показують, що очікувана картина дійсно має місце. При цьому особливо важливо підкреслити, що вже при порівняно невеликих значеннях $\bar{\delta}$ спостерігається

практично повний збіг розподілів температури в областях, що зіставляються. Через це задача про визначення умов, при дотриманні яких правомірне ототожнення температурних полів у розглянутих областях, може бути зведена до знаходження граничного значення товщини плоского шару $\bar{\delta}_{\text{гр}}$.

Необхідно визначити мінімальне значення товщини $\bar{\delta}$, при якому температурні поля плоского шару несуттєво (з наперед заданою точністю) відрізняються від температур напівнескінченного тіла в межах зони термічного впливу.

При рішенні задачі про знаходження $\bar{\delta}_{\text{гр}}$ необхідно мати на увазі наступну обставину. Розходження температур у порівнюваних кінцевій та необмеженій областях суттєво залежить від розташування розрахункової точки відносно нижньої границі плоского шару, яка не нагрівається. Чим далі від вказаної поверхні знаходиться розрахункова точка, тим менш значущим буде вплив обмеженості розмірів виробу. Відповідно до цього знаходження величини $\bar{\delta}_{\text{гр}}$ може ґрунтуватись на оцінці відхилення температур, що порівнюються, в деякій фіксованій точці С ($\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_{c(\text{max})}$), положення якої визначає глибину зони термічного впливу в напівнескінченному тілі. Тут $\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_{c(\text{max})}$ – безрозмірні координати точки С, яка знаходиться на ізотермічній поверхні Θ_c , що обмежує ЗТВ и характеризується максимальним значенням аплікати $\bar{z}_{c(\text{max})}$.

Залежність для визначення граничного значення товщини плоского шару для точки С ($\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_{c(\text{max})}$) має вигляд [6]:

$$p = \int_0^{\infty} \frac{dF_0}{(1+4F_0) \cdot \sqrt{F_0}} \times \exp \left[1 - \frac{\frac{-\bar{z}^2}{4F_0} - \frac{\bar{r}^2}{1+F_0} - \frac{Pe^2}{4}(1+4F_0)}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{dF_0}{(1+4F_0) \cdot \sqrt{F_0}} \cdot \exp \left(-\frac{(\bar{z}-2\delta_{\text{rpi}})^2}{4F_0} - \frac{r^{-2}}{1+4F_0} - \frac{Pe^2}{4}(1+4F_0) \right)} \right] \quad (3.18)$$

Наведене рівняння є трансцендентним. Його рішення повинно передувати знаходженню положення точки С ($\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_{c(\max)}$). Координати цієї точки можуть бути знайдені в результаті спільного рішення наступних двох рівнянь [6]:

$$\Theta_c = f(\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_c, Pe); \quad (3.19)$$

$$\frac{\Theta}{\partial \bar{x}} = 0. \quad (3.20)$$

Тут зв'язок між величинами Θ_c і координатами $\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_c$, що визначають відповідну ізотермічну поверхню, встановлюється рівнянням (3.19), тобто по функції $\Theta_c = f(\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_c, Pe)$. На рис. 3.4 приведені результати чисельного рішення рівняння (3.18) з урахуванням виразів (3.19), (3.20). Як видно, на величину $\bar{\delta}_{\text{rpi}}$ суттєво впливає значення температури Θ_c . Причому залежність $\bar{\delta}_{\text{rpi}}$ від Θ_c тим сильніша, чим менше при інших рівних умовах число Pe . На рис. 3.5 приведені результати порівняння розрахункових (суцільні лінії) і експериментальних даних [8], з яких витікає, що в цілому має місце задовільне співпадіння результатів, що порівнюються між собою. Рис. 3.6 ілюструє зміну величини $\bar{z}_L / \bar{\delta}_{\text{rpi}}$ в залежності від p при різних

значеннях числа Pe (тут $\bar{z}_L = z_L/r_0$; z_L – глибина ЗТВ у плоскому шарі). Із збільшенням p відношення $\bar{z}_L/\bar{\delta}_{гр}$ зростає по закону, близькому до лінійного.

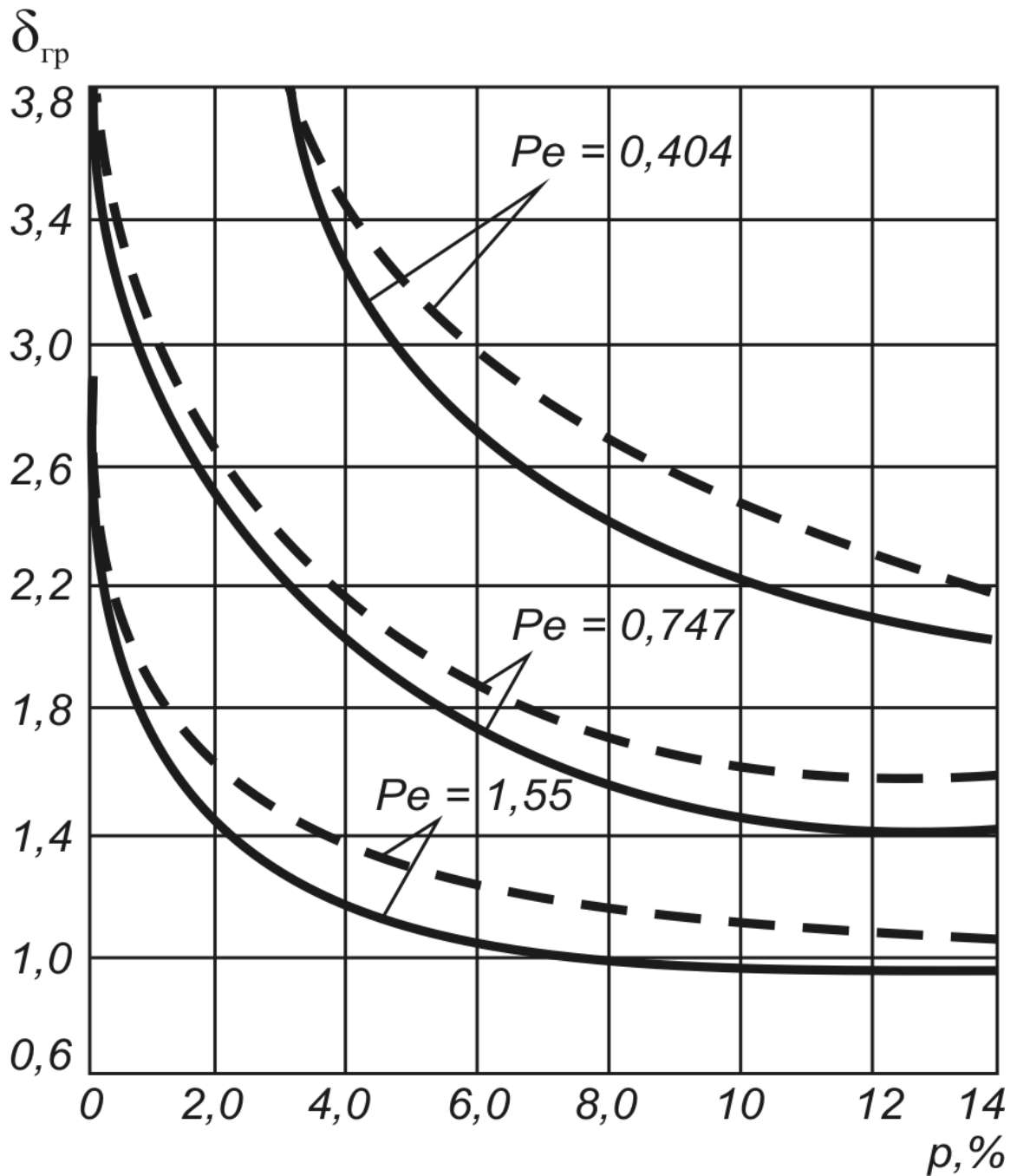


Рисунок 3.4 – Залежність $\bar{\delta}_{гр}$ від величини допустимого відхилення температур p при різних числах Pe и $\Theta_c = 0,512$ (суцільні криві);
 $\Theta_c = 0,383$ (штрихові криві)

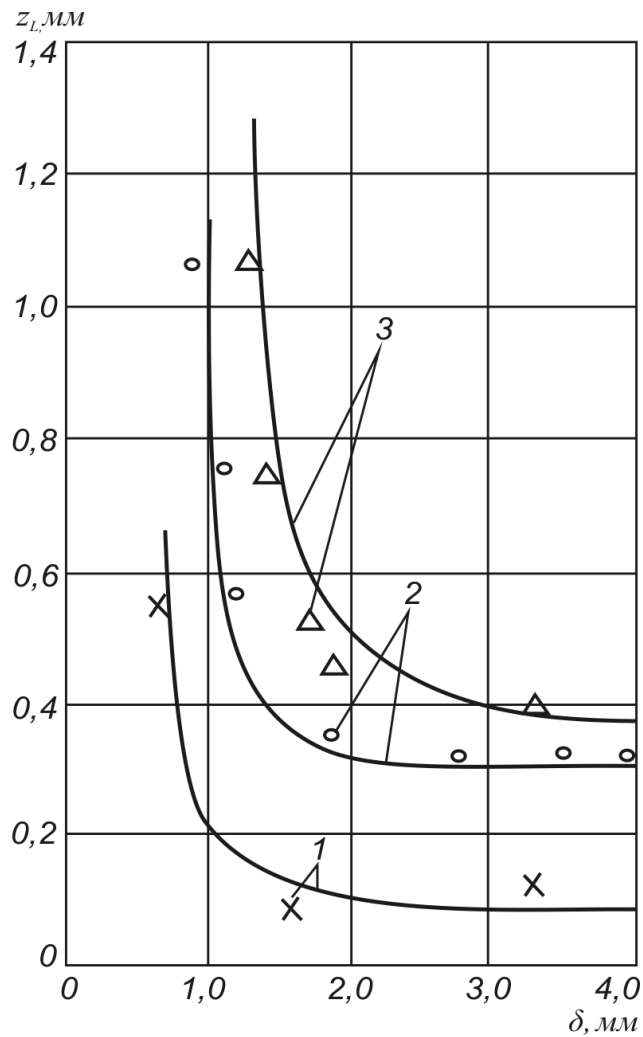


Рисунок 3.5 – Залежність глибини зони термічного впливу \bar{z}_L від товщини плоского шару $\bar{\delta}_{гр}$ при різних числах Pe и Θ_c (суцільні лінії – чисельне рішення; точки – експеримент [5, 6]): 1 – $Pe = 1,555$; $\Theta_c = 0,512$;
 2 – $Pe = 0,747$; $\Theta_c = 0,512$; 3 – $Pe = 0,404$; $\Theta_c = 0,542$

Необхідно відзначити, що результати виконаних досліджень у загальному випадку відрізняються від існуючих рекомендацій, згідно яких використання залежностей, що описують тепловий стан напівнескінченного тіла, правомірно тільки за умови, якщо відношення глибини ЗТВ до товщини зразка $\bar{z}_L / \bar{\delta}_{гр}$, не перевищує 0,2. Як витікає з даних, наведених на рис. 3.6, зазначене відношення не є постійним і істотно залежить від значення числа Pe . При цьому особливої уваги заслуговує той факт, що іноді значення

$\bar{z}_L/\bar{\delta}_{гр}$, при яких припустимим є ототожнення порівнюваних температурних полів, виявляються в певних умовах істотно менше, ніж рекомендоване відношення 0,2. Це означає, що значення $\bar{\delta}_{гр}$ можуть істотно перевищувати граничні значення товщини плоского шару, що відповідають умові $\bar{z}_L/\bar{\delta}_{гр} \leq 0,2$.

Розглянутий підхід дає можливість визначати граничні товщини $\bar{\delta}_{гр}$, при перевищенні яких правомірним є розрахунок температурних режимів плоского шару по досить простих залежностях, отриманих для напівнескінченного тіла. Таким чином, технологічні режими процесів зміцнення, розроблені для масивних тіл, можуть безпосередньо використовуватись для тіл відносно малих розмірів за умови, що товщини останніх не менше, ніж граничні товщини плоского шару, тобто при $\delta \geq \bar{\delta}_{гр}$.

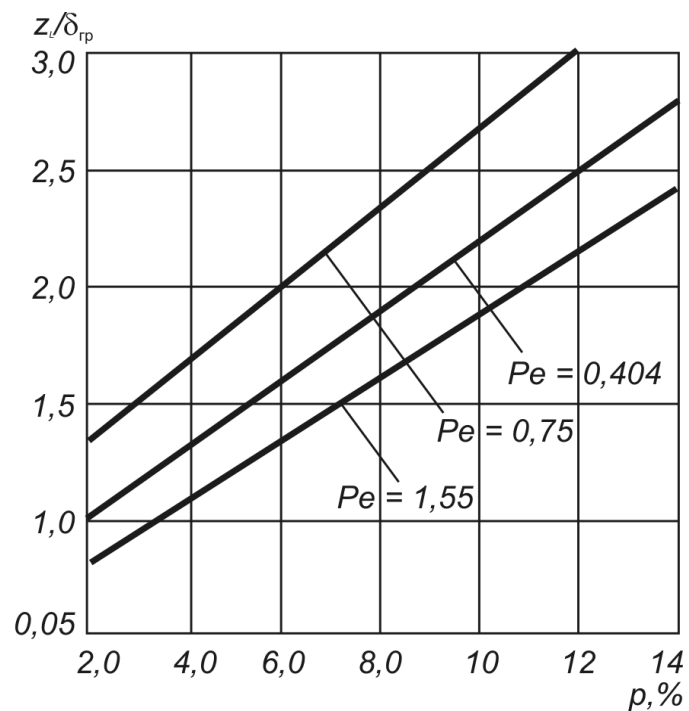


Рисунок 3.6 – Залежність $\bar{z}_L/\bar{\delta}_{гр}$ від допустимого відхилення температур p при $\Theta_c = 0,512$ та різних числах Pe

Розмір і маса виробу значною мірою визначають можливість реалізації процесу зміцнення за даних умов опромінення. Це можна також оцінити, орієнтуючись на кінцеву температуру деталі, яка визначається з виразу:

$$T_0 = \frac{AP_0 t}{c \cdot m},$$

де AP_0 – поглинена потужність випромінювання;

A – коефіцієнт поглинання випромінювання);

P_0 – повна потужність випромінювання;

t – час нагрівання деталі;

m – маса деталі;

c – питома теплоємність матеріалу деталі.

Якщо температура деталі T_0 буде перевищувати температуру початку мартенситного перетворення M_n , то зміцнення не відбуватиметься. У цьому випадку треба змінити режим обробки або використовувати додаткове охолодження деталі. За допомогою наведених вище виразів і чисельних методів розрахунку можна визначати розподіл температур в оброблюваному матеріалі, оцінювати розмірні характеристики зміцненого шару та вибирати режим опромінення.

Разом з тим при проектуванні технологічних процесів поверхневої обробки необхідно мати більш прості та зручні аналітичні залежності, які з достатньою для практичного застосування точністю дозволяють б розраховувати по заданим кресленнями характеристикам поверхневого шару режими обробки.

3.2 Перший варіант інженерної методики для розрахунку основних параметрів режиму поверхневої обробки

При розгляді моделі одномірного нагрівання напівнескінченного тіла розподіленім поверхневим тепловим джерелом з постійною інтенсивністю

$W_p = \frac{AP_0}{\pi r_0^2}$ протягом часу $t = \frac{2r_0}{v}$ можна скористатись відомим виразом, що

описує розподіл температури по глибині у будь-який момент часу $t \geq 0$ [6]:

$$T(z, t) = \frac{2W_p}{k} \sqrt{at} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \frac{z}{2\sqrt{at}} \Phi^*\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right\}. \quad (3.21)$$

В лінійному наближенні при $z \ll 2\sqrt{at}$ (3.21) має вид:

$$T(z, t) = \frac{W_p}{k} \left[\sqrt{\frac{4at}{\pi}} - z \right]. \quad (3.22)$$

Помилка лінеаризації, тобто розбіжність у значеннях температур, отриманих з виразів (3.21) і (3.22), не перевищує 10 % [5].

За умови $r_0 \gg \sqrt{at}$, а значить при $\xi = vr_0/2a \gg 1$ для розрахунку температурного поля можна використовувати безпосередньо вираз (3.22). При значеннях ξ , близьких до одиниці ($r_0 \approx \sqrt{at}$), необхідно додатково вводити поправочний коефіцієнт γ , що представляє собою відношення максимальних значень безрозмірних температур Θ_1 і Θ_2 , які визначаються по формулі $\Theta = Tr_0k/AP_0$ з урахуванням температур T_1 і T_2 , отриманих відповідно з формул (3.21) і (3.22).

При розрахунках температур по виразах (3.21), (3.22) необхідно вводити поправочний коефіцієнт γ на потужність або щільність потужності випромінювання:

$$P_{\text{эф}} = \gamma A P_0 = \gamma P ;$$

$$W_p^{\text{эф}} = \gamma W_p .$$

Значення поправочного коефіцієнта γ наведені на рис. 3.7.

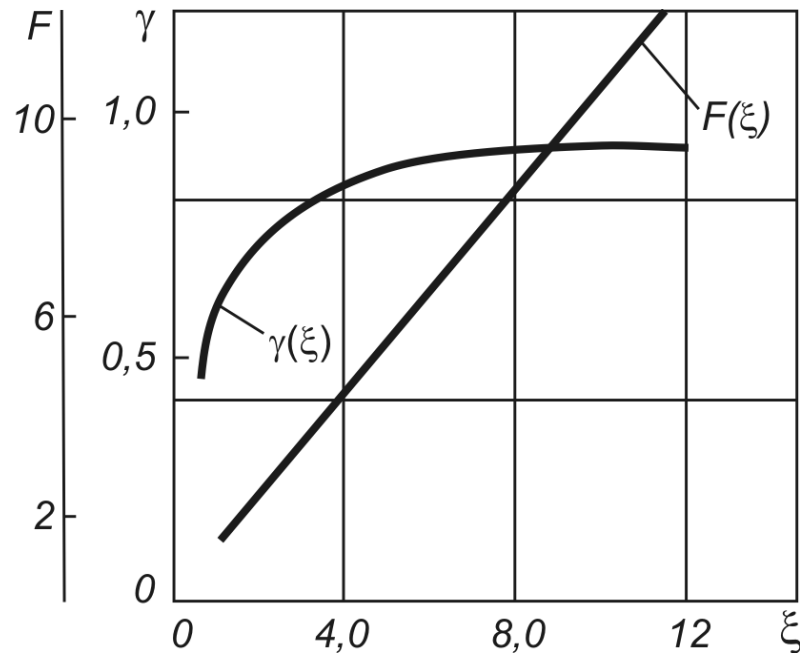


Рисунок 3.7 – Значення поправочного коефіцієнта γ та допоміжної функції F з урахуванням наведених міркувань вираз (3.22) приймає вид:

$$T(z, t) = \frac{P_{\text{эф}}}{\pi k r_0^2} \left[\sqrt{\frac{4at}{\pi}} - z \right]. \quad (3.23)$$

Максимальна глибина гартування досягається у тому випадку, якщо температура на поверхні металу доходить до температури плавлення $T_{\text{пл}}$. При цьому щільність потужності теплового джерела:

$$W_p^{\text{эф}} = T_{\text{пл}} K \sqrt{\frac{4at}{\pi}}. \quad (3.24)$$

Максимально допустима глибина гартування ($z_{\text{гарт}}$) на осі пучка без оплавлення поверхні може бути визначена по формулам (3.23) и (3.24):

$$z_{\text{гарт}} = \sqrt{\frac{4at}{\pi}} - \frac{KT_{\text{гарт}}}{W_p^{\text{еф}}} = \sqrt{\frac{4at}{\pi}} \cdot \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}}}{T_{\text{пл}}}, \quad (3.25)$$

де $T_{\text{гарт}}$ – задана температура гартування.

Якщо відома необхідна глибина зміцненого шару (вона задається кресленням), то, перетворивши вираз (3.25), можна знайти необхідний час дії джерела тепла:

$$t_{\text{гарт}} = \frac{\pi z_{\text{гарт}}^2}{4a} \left(\frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}}} \right)^2. \quad (3.26)$$

З виразів (3.24) и (3.26) можна визначити необхідну інтенсивність теплового джерела:

$$W_p^{\text{еф}} = \frac{K(T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}})}{z_{\text{гарт}}}. \quad (3.27)$$

У відповідності з (3.27) для гартування на глибину $z_{\text{гарт}}$ лазерний або електронний пучок повинен мати радіус:

$$r_0 = \sqrt{\frac{\gamma A P_0 z_{\text{гарт}}}{\pi K (T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}})}} \quad (3.28)$$

і швидкість переміщення пучка відносно деталі:

$$v = \frac{2r_0}{t_{\text{гарт}}} = \frac{8a(T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}})^{1.5}}{\pi T_{\text{пл}}^2 z_{\text{гарт}}^{1.5}} \sqrt{\frac{\gamma A P_0}{\pi K}}. \quad (3.29)$$

Оскільки величина γ заздалегідь невідома, то розрахунок режимів по формулам (3.26) - (3.29) можна проводити двома способами.

У першому методі послідовним наближенням розраховують режими, по рис. 3.7 визначають γ , перераховують режими з новим значенням γ і т.д.

У другому способі вводять додаткову функцію $F(\xi)$, яка виводиться з виразів (3.28) і (3.29):

$$F(\xi) = \frac{4AP_0(T_{\text{пл}} - T_{\text{гарт}})}{\pi^2 K z_{\text{гарт}} T_{\text{пл}}^2}. \quad (3.30)$$

Графік цієї функції наведений на рис. 3.7.

При другому способі розрахунок режимів обробки по заданій глибині зміцнення зводиться до визначення $F(\xi)$ по формулі (3.30), ξ і $\gamma(\xi)$ – по рис. 3.7, r і v – відповідно по формулам (3.28) і (3.29).

Ширина загартованої зони при обробці пучком круглої форми однорідної інтенсивності (при $\xi \gg 1$):

$$b_{\text{гарт}} = 2r_0 \sqrt{1 - (T_{\text{гарт}} - T_{\text{макс}})^4}. \quad (3.31)$$

У ряді випадків при розробці технологічних процесів зміцнення може виникнути питання одержання зміцненого шару в даному матеріалі максимально можливої глибини, виходячи з енергетичних можливостей технологічного устаткування.

Завдання зводиться до знаходження максимального часу впливу теплового джерела, який забезпечує необхідні швидкості охолодження.

Розподіл температур у напівнескінченному тілі за період часу $t > t_{зарт}$ можна визначити по формулі:

$$T(z, t) = \frac{W_p^{ef}}{K} \int_z^\infty \Phi * \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) dz - \int_z^\infty \Phi * \left(\frac{z}{2\sqrt{a(t-t_{гарт})}} \right) dz. \quad (3.32)$$

Зміна температури на поверхні ($z = 0$) описується виразом:

$$T(\tau) = T_{пл} \left(\sqrt{\tau+1} - \sqrt{\tau} \right), \quad (3.33)$$

де $\tau = (t - t_{зарт})/t_{зарт} = t_{охол}/t_{зарт}$.

З термодіаграми для даного матеріалу визначається час охолодження $\Delta t_{охол}^i$ від температури гартування $T_{зарт}$ до температури розпаду аустеніту T_i .

З рис. 3.8, на якому наведена залежність нормованої температури $T_i/T_{пл}$ від τ , визначається приведений час охолодження $\Delta \tau_i$ від $T_{зарт}/T_{пл}$ до $T_i/T_{пл}$ і обчислюється час гартування:

$$t_{гарт}^i = \frac{\Delta t_{охол}^i}{\Delta t^i}, \quad (3.34)$$

який забезпечує необхідну швидкість охолодження.

Мінімальний час $t_{зарт}$, що забезпечує переохолодження аустеніту до початку мартенситного перетворення, є максимальним часом впливу теплового джерела, при якому можливе повне самогартування матеріалу.

Далі за допомогою виразів (3.25) - (3.30) і рис. 3.7 визначається максимально досяжна глибина гартування і параметри обробки.

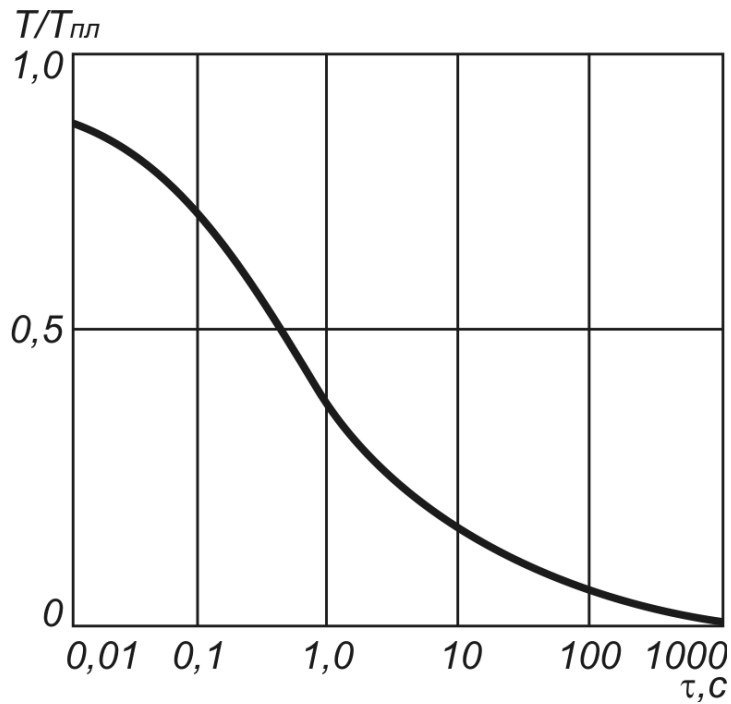


Рисунок 3.8 – Нормована температурна крива охолодження

3.3 Другий варіант інженерної методики для розрахунку основних параметрів режиму поверхневої обробки

Режими лазерної та електронно - променевої обробки з достатньою для практики точністю можна також оцінювати, використовуючи іншу методику. При її розробці було використане рішення рівняння теплопровідності для випадку, коли на поверхню напівнескінченного тіла, що рухається зі швидкістю v , діє нормально кругове теплове джерело, яке при досить значних v можна розглядати нормально лінійним:

$$T(y, z, t) = \frac{2AP_0}{c\rho v} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{\sqrt{4\pi at}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}\right)}{\sqrt{4\pi a(t+t_0)}}, \quad (3.35)$$

де c , ρ – відповідно теплоємність та щільність матеріалу;

$$t_0 = 1/(4ak);$$

$$k = \frac{1}{r_0^2} \text{ – коефіцієнт зосередженості джерела;}$$

r_0 – радіус плями фокусування;

$t = 2r_0/v$ – час дії випромінювання на матеріал.

Температура на поверхні матеріалу на вісі ОХ:

$$T(0,0,t) = \frac{AP_0}{4\pi kr_0 \sqrt{1 + \frac{vr_0}{8a}}} \quad (3.36)$$

У процесі зміцнення температура поверхні $T(0, 0, t)$ повинна бути більше температури гартування $T_{\text{гарт}}$, але не більше температури плавлення $T_{\text{пл}}$:

$$T_{\text{гарт}} < T(0, 0, t) \leq T_{\text{пл}} \quad (3.37)$$

Звідти можна визначити максимальну та мінімальну потужність випромінювання (інтервал потужності) при зміцненні матеріалів:

$$P_{\text{max}} = 4\pi kr_0 T_{\text{пл}} \sqrt{1 + \frac{vr_0}{8a}}; \quad (3.38)$$

$$P_{\text{min}} = 4\pi kr_0 T_{\text{гарт}} \sqrt{1 + \frac{vr_0}{8a}}. \quad (3.39)$$

Представивши зміну температури у виді

$$T(y, z, t) = T(0,0,t) \cdot \exp\left(\frac{vz^2}{8ar_0} - \frac{y^2}{\frac{8ar_0}{v} + r_0}\right), \quad (3.40)$$

можна отримати:

$$\frac{T(y, z, t)}{T(0, 0, t)} = \exp \left(\frac{\nu z^2}{8ar_0} - \frac{y^2}{\frac{8ar_0}{\nu} + r_0} \right). \quad (3.41)$$

Звідси після логарифмування маємо:

$$\frac{y^2}{\left(\frac{8ar_0}{\nu} + r_0\right) \ln(x)} + \frac{z^2}{\frac{8ar_0}{\nu} \cdot \ln(x)} = 1. \quad (3.42)$$

Отримане рівняння показує, що ізотерма для будь-якої температури $T(y, z, t)$ представляє собою напівеліпс. Більша вісь ізотермічного напівеліпсу паралельна вісі OY , а менша – вісі OZ . При цьому ці напівеліпси мають однакове відношення вісей:

$$\sqrt{1 + \frac{8a}{\nu}}.$$

Звідси максимальні розміри зони зміцнення по вісям OY та OZ при $T(y, z, t) = T_{\text{гарт}}$ визначаються з виразів:

$$z = \sqrt{\frac{8ar_0}{\nu} \cdot \ln \left(\frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{гарт}} \sqrt{1 + \frac{\nu r_0}{8a}}} \right)}; \quad (3.43)$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{8ar_0}{\nu} + r_0\right) \cdot \ln \left(\frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{гарт}} \sqrt{1 + \frac{\nu r_0}{8a}}} \right)}. \quad (3.44)$$

Якщо у рівняннях (3.43), (3.44) ввести позначення

$$\frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{гарт}} \sqrt{1 + \frac{\nu r_0}{8a}}} = x, \text{ отримаємо наступні вирази:}$$

$$z = \sqrt{\frac{8ar_0}{\nu} \cdot \ln(x)};$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{8ar_0}{\nu} + r_0\right) \cdot \ln(x)}.$$

Ці вирази справедливі тільки при $\ln(x) \gg 0$. Якщо $\ln(x) = 0$, тобто $T(0, 0, t) = T(y, z, t) = T_{\text{гарт}}$, то $z = 0$. Якщо $\ln(x) < 0$, тобто $T(0, 0, t) < T_{\text{гарт}}$, зміцнення не відбувається.

Для прояснення фізичної сутності параметра x згадаємо вираз (3.36):

$$T(0,0,t) = \frac{P}{4\pi k r_0 \sqrt{1 + \frac{\nu r_0}{8a}}},$$

в якому $T(0, 0, t)$ – температура на вісі x . Тоді стає очевидним, що

$$x = \frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{гарт}} \sqrt{1 + \frac{\nu r_0}{8a}}} = \frac{T(0,0,t)}{T_{\text{гарт}}}.$$

Із знайдених обмежень по ефективній потужності випромінювання можна визначити інтервал швидкості відносного переміщення електронно-променевого або лазерного пучка і деталі:

$$\left[\left(\frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{пл}}} \right)^2 - 1 \right] \frac{8a}{r_0} \leq \nu \leq \left[\left(\frac{P}{4\pi k r_0 T_{\text{гарт}}} \right)^2 - 1 \right] \frac{8a}{r_0}. \quad (3.45)$$

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Аналіз вихідних даних. Методика проведення експерименту

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

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що електронно-променева обробка (ЕПО) може здійснюватись з оплавленням оброблюваної поверхні і без нього. Найбільший інтерес представляє варіант ЕПО з оплавленням, при якому розширюються можливості керування структурою металу (аж до її аморфізації). ЕПО може виконуватись по усій поверхні і у вигляді окремих ділянок, розділених необробленими зонами матеріалу. Очевидно, кращим варіантом є технологія локальної обробки з одержанням вузьких і відносно глибоких зон розплавлення [1, 2, 3, 17, 18].

Відповідно до принципу Шарпі трибологічні властивості матеріалів повинні істотно покращитись при локальній ЕПО з оплавленням при формуванні дрібнозернистої структури, що сприяє одержанню більш високих експлуатаційних властивостей матеріалів [17, 18].

Випробовуваний економнолегований марганцевий аустенітний чавун з пластинчастим графітом призначений для виготовлення гальмівних колодок тепловозів та електровозів (структура литого чавуну – аустеніт + графіт). Він задовільно обробляється різанням і добре зварюється.

Триботехнічні випробування проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик (сталь 45, HRC 45-48) - колодка (аустенітний чавун) (рис. 4.1). Випробування на зносостійкість проводились в умовах сухого тертя при навантаженні $P = 250\text{Н}$ 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 $1,4\text{ см}^2$.

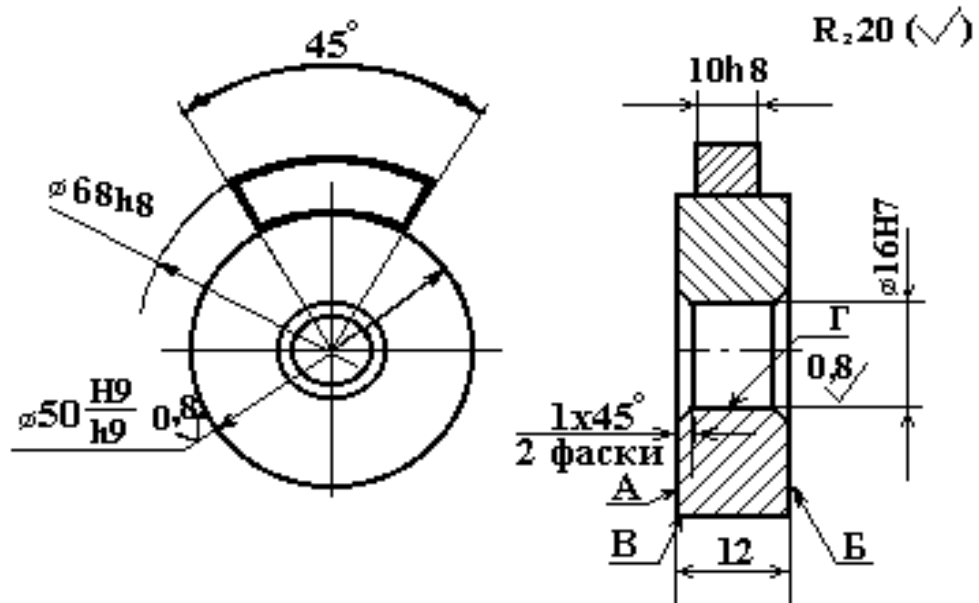


Рисунок 4.1 – Конструкція зразків для триботехнічних випробувань

ЕПО складалась у локальному оплавленні поверхні тертя колодок у вигляді ліній, що відстоять друг від друга на відстані 1 мм. Ширина зони розплавлювання становила 1,2 - 1,5 мм, глибина – 0,8 - 1,0 мм (рис. 4.2).

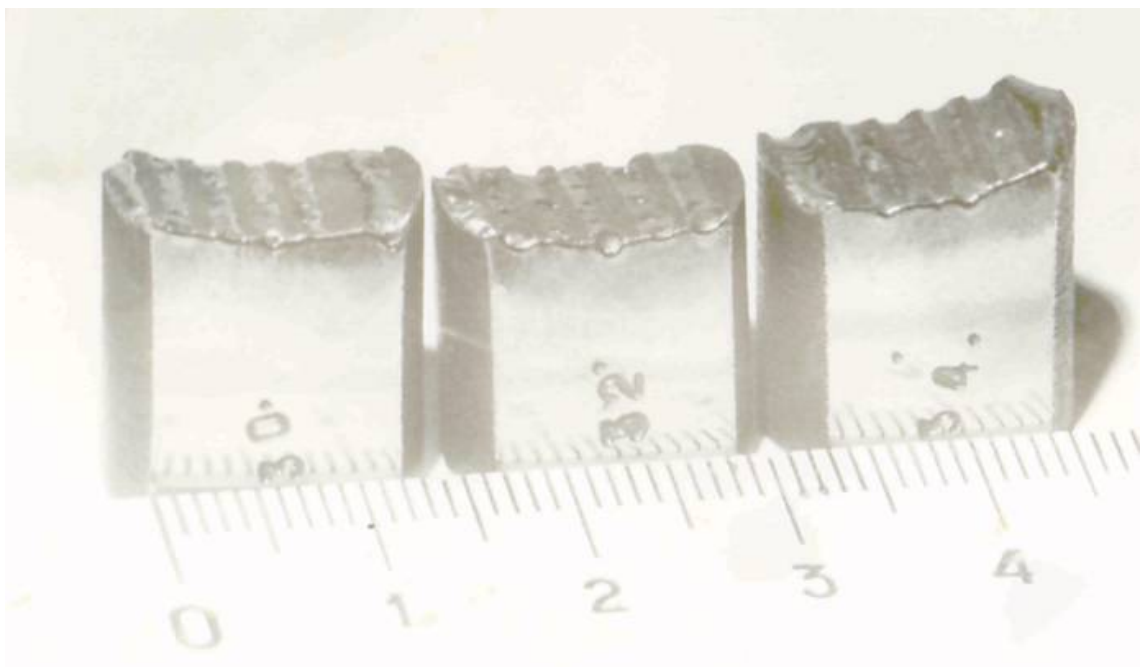


Рисунок 4.2 – Вид колодок після ЕПО (до шліфування)

Режими обробки представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Режими електронно-променевої обробки зразків

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

Металографічні дослідження виконувались на мікроскопі МІМ-8М. Мікротвердість визначалась на мікротвердомері ПМТ-3 при навантаженні 50г. Втрата маси зразків визначалась на оптико-механічних вагах ВЛМ-001.

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: алюмінію (x_1), марганцю (x_2), вуглецю (x_3). Межі варіювання концентрації легуючих елементів (табл. 4.2, 4.3): алюмінію – 2,5 - 3,5 %, інтервал варіювання 0,5 %; марганцю – 9 - 12 %, інтервал варіювання 1,5 %; вуглецю – 3,2 - 3,8 %, інтервал варіювання 0,3 %. 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 представлені експериментальні середні значення величини питомої втрати маси зразків у вихідному стані (без електронно-променевої обробки), 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 варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Середня питома втрата маси ΔМ, г/см ²
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
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)	0,857
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

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

Фактор, що варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Середня питома втрата маси ΔМ, г/см ²
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
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

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 вихідній 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 термічно обробленого чавуну істотно перевищує зносостійкість литого нетермообробленого чавуну.

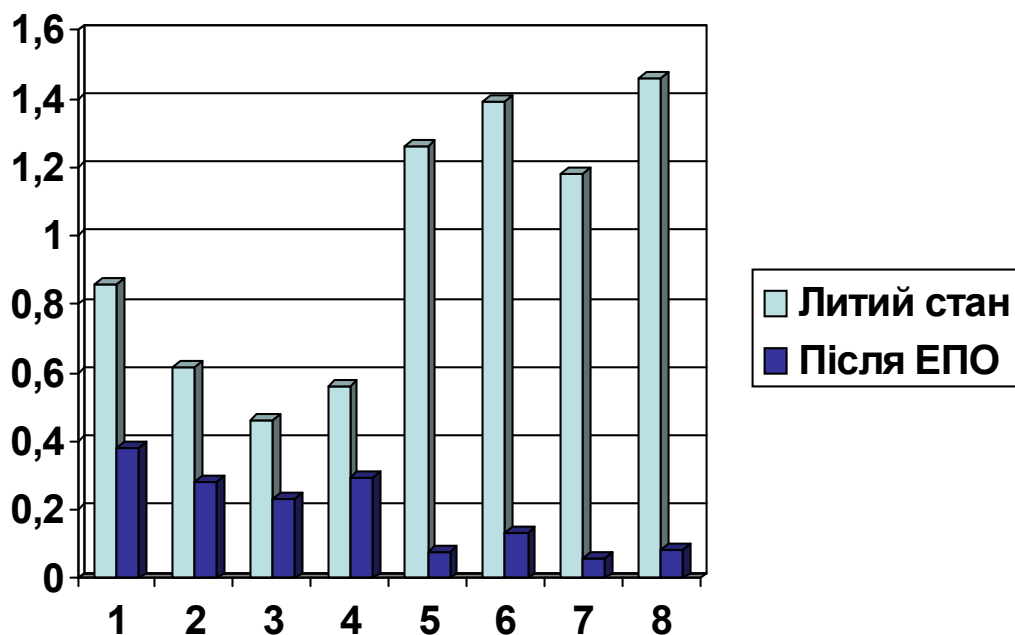


Рисунок 4.3 – Питома втрата маси зразків аустенітного чавуну (по дослідях) до і після електронно-променевої обробки

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.

Змінні x_i у табл. 4.4 задають хімічний склад чавуну через концентрацію легуючих елементів у натуральному виді, а змінні X_i – у кодованому виді відповідно через верхній ($X_i = +1$) і нижній ($X_i = -1$) рівні. Для побудови

регресійного рівняння спочатку використовувались кодовані значення факторів X_i , а потім здійснювався перехід від кодованих значень факторів до їх фактичних (натуральних) значень x_i .

Відповідно до даних табл. 4.4 для побудови регресійної залежності інтенсивності зношування чавунних колодок від вмісту в них вуглецю, алюмінію і марганцю необхідно провести 24 випробування. Для того щоб виключити вплив систематичних помилок, викликаних різними зовнішніми умовами, дані випробування проводились рандомізовано у часі, тобто у випадковій послідовності.

Таблиця 4.4 – Значення питомої втрати маси зразків по дублях

Фактор, що варіюється	Натуральні (фактичні) значення факторів			Значення функції відгуку y_{iu} (інтенсивності зношування), $г/см^2$					
	x_1 (% Al)	x_2 (% Mn)	x_3 (% C)						
Основний рівень, x_{i0}	3,0	10,5	3,5						
Інтервал варіювання, Δx_i	0,5	1,5	0,3						
Верхній рівень, $x_{i(max)}$ ($X_i = +1$)	3,5	12,0	3,8						
Нижній рівень, $x_{i(min)}$ ($X_i = -1$)	2,5	9,0	3,2						
№ дослід, u	Кодовані значення факторів і відповідні їм (у дужках) натуральні 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			

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 $S_{y_u}^2$ в кожному досліді визначається по формулі:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (4.1)$$

$$f_u = n_u - 1, \quad (4.2)$$

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

y_{u_g} – значення функції відгуку в g - му дублі u - го досліді;

\bar{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 $S_{y_u}^2$.

Число ступенів свободи – поняття, що враховує у статистичних ситуаціях зв'язки, які обмежують свободу зміни випадкових величин. Це число визначається як різниця між кількістю виконаних дослідів і кількістю констант, підрахованих за результатами тих же дослідів.

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:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^3 (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{2}. \quad (4.3)$$

Порядкова дисперсія по виразу (4.3) розраховується для кожного u - го дослідю.

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

$$\sigma_{y_u} = \sqrt{S_{y_u}^2}, \quad (4.4)$$

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

$$V_{y_u} = \frac{\sigma_{y_u} \cdot 100\%}{\bar{y}_u}. \quad (4.5)$$

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:

$$S_{y_1}^2 = \frac{\sum_{g=1}^3 (y_{1_g} - \bar{y}_1)^2}{2} = \frac{(0,37 - 0,383)^2 + (0,384 - 0,383)^2 + (0,381 - 0,383)^2}{2} = 1,053 \cdot 10^{-4}.$$

Абсолютна помилка вимірювань:

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

Варіація вимірювань:

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

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

Номер досліджу, u	Номер дубля, g	Значення функції відгуку y_{ug} по дублях, $г/см^2$	Середні значення функції відгуку \bar{y}_u в досліджах, $г/см^2$	Порядкова дисперсія, $S_{y_u}^2$	σ_{y_u}	V_{y_u} , %
1	1	0,37	0,383	$1,053 \cdot 10^{-4}$	0,01	2,6
	2	0,384				
	3	0,381				
2	1	0,282	0,281	$8,129 \cdot 10^{-5}$	$9,016 \cdot 10^{-3}$	3,2
	2	0,294				
	3	0,28				
3	1	0,229	0,232	$1,08 \cdot 10^{-4}$	0,01	4,4
	2	0,23				
	3	0,243				
4	1	0,29	0,297	$1,572 \cdot 10^{-4}$	0,013	4,2
	2	0,3				
	3	0,28				
5	1	0,082	0,078	$2,767 \cdot 10^{-5}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	6,7
	2	0,08				
	3	0,07				
6	1	0,12	0,131	$4,724 \cdot 10^{-5}$	$6,873 \cdot 10^{-3}$	5,2
	2	0,14				
	3	0,13				
7	1	0,061	0,059	$2,729 \cdot 10^{-5}$	$5,224 \cdot 10^{-3}$	8,7
	2	0,066				
	3	0,054				
8	1	0,079	0,084	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$5,992 \cdot 10^{-3}$	7,1
	2	0,08				
	3	0,087				
Сума	-	-	-	$5,899 \cdot 10^{-4}$	-	-

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 \bar{y}_u (табл. 4.5). Довірчим інтервалом $(\bar{y}_u - \Delta y_u; \bar{y}_u + \Delta y_u)$ для вимірюваного параметра Y_u називається такий інтервал, щодо якого із заздалегідь обраною імовірністю $P = 1 - \alpha$, близької до одиниці, можна стверджувати, що він містить невідоме значення параметра Y_u . Математично ця умова записується в такий спосіб:

$$P(\bar{y}_u - \Delta y_u \leq Y_u \leq \bar{y}_u + \Delta y_u) = 1 - \alpha.$$

Чим більш вузький для обраної імовірності довірчий інтервал, тим точніше оцінка вимірюваного параметра Y_u . І, навпаки, якщо ширина довірчого інтервалу велика, то оцінка, проведена за допомогою даного інтервалу, малоприйнятна для практичного використання. Оскільки границі довірчого інтервалу залежать від елементів вибірки, значення $(\bar{y}_u - \Delta y_u)$ та $(\bar{y}_u + \Delta y_u)$ можуть змінюватись від вибірки до вибірки.

Імовірність $P = 1 - \alpha$ прийнято називати *довірчою* імовірністю (або *надійністю*), а параметр α – рівнем значимості. Вибір довірчої імовірності або рівня значимості не є математичним завданням, а визначається специфікою розв'язуваної проблеми і вимогами до надійності вимірювань. Найчастіше задають надійність p , рівну 0,95; 0,97; 0,99. Даному рівню надійності відповідають рівні значимості 0,05; 0,03; 0,01. В інженерних задачах і задачах прикладного матеріалознавства, як правило, використовують рівень значимості $\alpha = 0,05$.

Для розрахунку ширини довірчого інтервалу використовують співвідношення:

$$\Delta y_u = t_1 \cdot \frac{\sigma_{y_u}}{\sqrt{n_u}}, \quad (4.6)$$

де t_1 – 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 досліді ($n_u = 3$).

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 \bar{y}_u задається виразом:

$$\left(\bar{y}_u - t_1 \cdot \frac{\sigma_{y_u}}{\sqrt{n_u}}; \bar{y}_u + t_1 \cdot \frac{\sigma_{y_u}}{\sqrt{n_u}} \right). \quad (4.7)$$

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 Δy_u менше абсолютної помилки вимірювань σ_{y_u} :

$$\Delta y_u \leq \sigma_{y_u}. \quad (4.8)$$

Усі значення порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань є статистично значимими, оскільки в кожному досліді виконується умова (4.8) (табл. 4.6). Якщо умова (4.8) не виконується, необхідно збільшити кількість дублів n_u . При цьому слід пам'ятати, що кількість дублів повинна бути однаковою в усіх опитах. Якщо кількість дублів по тим або іншим причинам не може бути збільшена і $\Delta y_u > \sigma_{y_u}$, в якості абсолютної помилки вимірювань

приймають скореговану помилку вимірювань Δy_u , а в якості порядкової дисперсії – величину, рівну $(\Delta y_u)^2$. У матеріалознавських дослідженнях кількість дублів в опитах зазвичай вибирають таким чином, щоб виконувалась умова (4.8).

Після оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань перевіряють відтворюваність експериментальних даних. Перевірка виконується у тому випадку, якщо має місце дублювання дослідів, що є обов'язковим правилом при проведенні планованого експерименту. На цій стадії перевіряється гіпотеза про сталість дисперсії шуму з використанням критерію Кохрена. Перевірка даної гіпотези дозволяє судити про однорідність або неоднорідність ряду дисперсій. Якщо ряд дисперсій однорідний, різні значення функції відгуку \bar{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 дослідів, u	\bar{y}_u (табл. 4.5)	n_u	t_1	σ_{y_u} (табл. 4.5)	$\Delta y_u = t_1 \cdot \frac{\sigma_{y_u}}{\sqrt{n_u}}$	Довірчий інтервал
1	0,383	7	2,45	0,01	$9,502 \cdot 10^{-3}$	(0,373; 0,392)
2	0,281			$9,016 \cdot 10^{-3}$	$8,349 \cdot 10^{-3}$	(0,272; 0,289)
3	0,232			0,01	$9,621 \cdot 10^{-3}$	(0,223; 0,242)
4	0,297			0,013	0,012	(0,285; 0,308)
5	0,078			$5,26 \cdot 10^{-3}$	$4,871 \cdot 10^{-3}$	(0,073; 0,083)
6	0,131			$6,873 \cdot 10^{-3}$	$6,364 \cdot 10^{-3}$	(0,124; 0,137)
7	0,059			$5,224 \cdot 10^{-3}$	$4,837 \cdot 10^{-3}$	(0,055; 0,064)
8	0,084			$5,992 \cdot 10^{-3}$	$5,549 \cdot 10^{-3}$	(0,078; 0,089)

Процедура перевірки статистичних гіпотез у загальному випадку формально передбачає порівняння деякого критерію, розрахованого за експериментальними даними, з його табличним значенням при обраному заздалегідь рівні значимості. Рівень значимості визначає найбільшу імовірність відкинути правильну гіпотезу, тобто найбільшу імовірність припущення про те, що експериментальний результат помилковий. Наприклад, якщо рівень значимості вибирають рівним 0,05 (що дуже часто робиться у технічних задачах), то це означає, що допускається 5 % - ва імовірність невірного рішення і довіря 95 % - ва імовірність вірного рішення.

Якщо знайдене за експериментальними даними значення критерію попадає в область, що відповідає рівню значимості, то гіпотеза, що перевіряється, невірна і її слід відкинути, зробивши помилку з імовірністю α . Якщо ж експериментальне значення критерію попадає в область, що відповідає імовірності $1-\alpha$, то гіпотезу, що перевіряється, приймають, зробивши помилку, зв'язану вже з альтернативною гіпотезою.

Розрахункове значення критерію Кохрена обчислюється по формулі:

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

де $S_{y_u \text{max}}^2$ – максимальна порядкова дисперсія.

Розрахункове значення критерію Кохрена ($G^{\text{расч}}$) порівнюється з його табличним значенням ($G^{\text{табл}}$), яке визначається по таблицях залежно від рівня значимості α , числа ступенів свободи f_u і числа дослідів N : $G^{\text{табл}}(\alpha; f_u; N)$ [6]. Якщо $G^{\text{расч}} < G^{\text{табл}}$, ряд порядкових дисперсій однорідний, якщо $G^{\text{расч}} > G^{\text{табл}}$, ряд порядкових дисперсій неоднорідний.

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

дисперсій $\sum_{u=1}^8 S_{y_u}^2 = 5,899 \cdot 10^{-4}$. Тоді $G^{\text{расч}} = \frac{1,572 \cdot 10^{-4}}{5,899 \cdot 10^{-4}} = 0,267$. Приймавши

рівень значимості $\alpha = 0,05$, для числа ступенів свободи $f_u = 2$ і числа опитів $N = 8$ одержимо наступне табличне значення критерію Кохрена: $G_{0,05;6;8}^{\text{табл}} = 0,336$.

Оскільки $G^{\text{расч}} < G_{0,05;6;8}^{\text{табл}}$ ($0,267 < 0,336$), ряд порядкових дисперсій однорідний.

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

Дисперсія експерименту розраховується по рівнянню:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^8 S_{y_u}^2}{N}, \quad (4.10)$$

де $S_{y_u}^2$ – значення порядкових дисперсій (табл. 4.5).

Абсолютна помилка експерименту визначається з виразу:

$$\sigma_y = \sqrt{S_y^2}, \quad (4.11)$$

варіація експерименту – з виразу:

$$V_y = \frac{\sigma_y \cdot 100\%}{\bar{y}}, \quad (4.12)$$

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

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

$$V_y \leq 10\%. \quad (4.13)$$

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

$$\sigma_y = \sqrt{S_y^2} = \sqrt{7,373 \cdot 10^{-5}} = 8,587 \cdot 10^{-3};$$

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

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

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

Якщо умова (4.13) не виконується, необхідно збільшити точність вимірювання значень функції відгуку в дослідах з максимальною дисперсією. Максимальні дисперсії зазвичай відповідають найбільшим значенням функції відгуку.

Неоднорідність ряду порядкових дисперсій найчастіше має місце, якщо серед аналізованих експериментальних даних є грубі помилки або промахи, пов'язані з помилками, допущеними при проведенні експерименту. У такому випадку експеримент необхідно повторити, ретельно проаналізувавши його з методологічної точки зору і приділивши особливу увагу методиці збору та обробки експериментальних даних.

Якщо при ретельному аналізі даних, отриманих в результаті повторного експерименту, в результатах вимірювань не виявлено грубих помилок і промахів, неоднорідність ряду порядкових дисперсій означає, що значення функції відгуку дійсно визначені з різною точністю, однак у кожному окремому опиті рівень шумів (помилки) не виходить за межі припустимих значень. Така ситуація виникає при дуже великій різниці між максимальним і мінімальним значеннями функції відгуку (у 10 - 15 разів і більше) внаслідок неправильного вибору діапазонів варіювання факторів. У цьому випадку варто зменшити діапазони варіювання факторів і будувати не одну регресійну модель, а

декілька регресійних моделей для декількох діапазонів варіювання факторів.

Існує кілька простих правил, дотримуючись яких у більшості практичних випадків можна забезпечити однорідність ряду порядкових дисперсій і, відповідно, відтворюваність експериментальних даних:

1. На початкових стадіях побудови регресійної моделі при первинному аналізі експериментальних даних відфільтровувати з результатів вимірювань грубі помилки та промахи. З огляду на відносно невелику кількість дублів в дослідах, реалізація цієї процедури не представляє будь-яких принципових складностей.

2. Здійснювати усі вимірювання значень функції відгуку з використанням однієї і тієї ж самої контрольно-вимірювальної апаратури. Не рекомендується використовувати для вимірювання різних значень функції відгуку вимірювальні пристрої з різним класом точності.

3. Вибирати діапазон варіювання факторів таким чином, щоб мінімальне та максимальне значення функції відгуку відрізнялись між собою не більш ніж у 10 - 15 разів.

Якщо ряд дисперсій неоднорідний, але в експериментальних даних відсутні грубі помилки вимірювань і промахи, в якості дисперсії експерименту S_y^2 приймають максимальну порядкову дисперсію $S_{y_u \max}^2$:

$$S_y^2 = S_{y_u \max}^2 \cdot$$

Абсолютну помилку і варіацію експерименту визначають відповідно по рівнянням (4.11) і (4.12). При цьому, так само як і у випадку однорідного ряду дисперсій, повинна виконуватись умова (4.13): варіація експерименту не повинна перевищувати 10 %. Варто мати на увазі, що обчислення дисперсії експерименту по максимальній порядковій дисперсії висуває підвищені вимоги до точності вимірювання значень функції відгуку у всіх дослідах. Особливу увагу слід приділити точності постановки тих дослідів, в яких функція відгуку приймає максимальні значення.

4.3 Побудова неповної квадратичної регресійної моделі

4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії

Математична модель досліджуваного процесу в узагальненій формі має вигляд:

$$y' = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (4.14)$$

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

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

де X_1, X_2, X_3 – кодовані значення факторів, які можуть змінюватися від -1 до +1 (табл. 4.4).

Коефіцієнти регресійного рівняння (4.15) розраховуються по залежності:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i_u} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (4.16)$$

де u – номер досліджу;

X_{i_u} – кодовані значення факторів, що варіюються (незалежних змінних X_1, X_2, X_3) в u -му досліді (табл. 4.4);

\bar{y}_u – 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):

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{0_u} \cdot \bar{y}_u}{N}; \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{1_u} \cdot \bar{y}_u}{N}; \quad b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{2_u} \cdot \bar{y}_u}{N}; \quad (4.17)$$

$$b_3 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{3_u} \cdot \bar{y}_u}{N}; b_{12} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_2)_u \cdot \bar{y}_u}{N}; b_{13} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_3)_u \cdot \bar{y}_u}{N};$$

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

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).

Таблиця 4.7 – Розширена матриця плану ПФЕ 2^3

Номер досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_4 = X_1 X_2$	$X_5 = X_1 X_3$	$X_6 = X_2 X_3$	$X_7 = X_1 X_2 X_3$	$\bar{y}_u, \text{г/см}^2$
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

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

$$b_0 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 + 0,281 + 0,232 + 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 0,193;$$

$$b_1 = \frac{-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - \bar{y}_5 + \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 + 0,281 - 0,232 + 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 4,911 \cdot 10^{-3};$$

$$b_2 = \frac{-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - \bar{y}_5 - \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 - 0,281 + 0,232 + 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,025;$$

$$b_3 = \frac{-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 - 0,281 - 0,232 - 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,105;$$

$$b_{12} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4 + \bar{y}_5 - \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 - 0,281 - 0,232 + 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,017;$$

$$b_{13} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_4 - \bar{y}_5 + \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 - 0,281 + 0,232 - 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,014;$$

$$b_{23} = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 - \bar{y}_5 - \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 + 0,281 - 0,232 - 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 8,554 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{123} = \frac{-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_5 - \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 + 0,281 + 0,232 - 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = -0,024.$$

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

Таблиця 4.8 – Зведена таблиця з обчисленими значеннями коефіцієнтів 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	$8,554 \cdot 10^{-3}$	-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:

$$y' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7. \quad (4.18)$$

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 дослідю. З урахуванням цього рівняння (4.16) можна записати у наступному виді: $b_{i-\Delta b_i}^{+\Delta b_i} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i_u} \cdot \bar{y}_{u-\Delta y_u}^{+\Delta y_u}}{N}$. 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.

Якщо усі коефіцієнти регресійного рівняння (4.18) статистично значимі, з нього необхідно виключити найменший за абсолютним значенням (по модулю) коефіцієнт.

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

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

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

N – кількість дослідів ($N = 8$);

S_y^2 – дисперсія експерименту.

Середньоквадратична помилка оцінки коефіцієнтів регресії визначається як:

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2}. \quad (4.20)$$

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

$$\Delta_{b_i} = t_2 \cdot S_{b_i}, \quad (4.21)$$

де t_2 – критерій Ст'юдента, який залежить від рівня значимості α і числа ступенів свободи f_2 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:

$$|b_i| \geq \Delta_{b_i} \quad \text{або} \quad |b_i| \geq t_2 \cdot S_{b_i}. \quad (4.22)$$

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: $\Delta_{b_i} = 2,04 \cdot 1,147 \cdot 10^{-3} = 2,341 \cdot 10^{-3}$.

Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, є усі 8 коефіцієнтів, що входять у регресійне рівняння (4.18): $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$. Абсолютні значення коефіцієнтів перевищують величину їхнього довірчого інтервалу $\Delta_{b_i} = 2,341 \cdot 10^{-3}$. 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 $b_1 = 4,911 \cdot 10^{-3}$ (табл. 4.8).

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

$$y' = 0,193 - 0,025 \cdot X_2 - 0,105 \cdot X_3 + 0,017 \cdot X_4 + 0,014 \cdot X_5 + 8,554 \cdot 10^{-3} \cdot X_6 - 0,024 \cdot X_7. \quad (4.23)$$

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 y'_u у кожному з восьми дослідів (u – номер опиту). Усі значення X_i у дане рівняння входять у кодовому масштабі (табл. 4.7):

в 1-м досліді: $X_1 = -1, X_2 = -1, X_3 = -1, X_4 = +1, X_5 = +1, X_6 = +1, X_7 = -1;$

в 2-м досліді: $X_1 = +1, X_2 = -1, X_3 = -1, X_4 = -1, X_5 = -1, X_6 = +1, X_7 = +1;$

в 3-м досліді: $X_1 = -1, X_2 = +1, X_3 = -1, X_4 = -1, X_5 = +1, X_6 = -1, X_7 = +1;$

в 4-м досліді: $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = -1, X_4 = +1, X_5 = -1, X_6 = -1, X_7 = -1;$

в 5-м досліді: $X_1 = -1, X_2 = -1, X_3 = +1, X_4 = +1, X_5 = -1, X_6 = -1, X_7 = +1;$

в 6-м досліді: $X_1 = +1, X_2 = -1, X_3 = +1, X_4 = -1, X_5 = +1, X_6 = -1, X_7 = -1;$

в 7-м досліді: $X_1 = -1, X_2 = +1, X_3 = +1, X_4 = -1, X_5 = -1, X_6 = +1, X_7 = -1;$

в 8-м досліді: $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = +1, X_4 = +1, X_5 = +1, X_6 = +1, X_7 = +1.$

З урахуванням знаків X_i розрахункові значення функції відгуку (питомої втрати маси) будуть рівні, $г/см^2$:

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 y'_u необхідні для визначення дисперсії неадекватності (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку дисперсії неадекватності

Номер дослідів, u	\bar{y}_u	y'_u	$ \Delta y = y'_u - \bar{y}_u $	$\Delta y^2 = (y'_u - \bar{y}_u)^2$	f_i	$S^2_{неад}$
1	0,383	0,387	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	1	$2 \cdot 10^{-4}$
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	$25 \cdot 10^{-6}$		
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	-	-	-	$2 \cdot 10^{-4}$		

При рівномірному дублюванні дослідів дисперсія неадекватності $S_{\text{неад}}^2$ визначається по залежності:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y'_u - \bar{y}_u)^2}{f_1}; f_1 = N - k', \quad (4.24)$$

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

f_1 – число ступенів свободи;

k' – кількість залишених коефіцієнтів у рівнянні регресії, включаючи b_0 ;

N – кількість дослідів плану ($N = 8$).

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

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 $y'_u - \bar{y}_u$ буде містити інформацію про помилки у прогнозуванні значень функції відгуку.

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (4.25)$$

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

Розрахункове значення критерію Фішера – це відношення дисперсії неадекватності до дисперсії експерименту. По суті він дозволяє відповісти 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 f_1 і f_2 , обчислених раніше: $f_1 = 1$, $f_2 = 48$. При рівні значимості $\alpha = 0,05$ і ступенях свободи $f_1 = 1$ і $f_2 = 16$ табличне значення F - критерію дорівнює $F^{\text{табл.}} = 4,04$ [6].

Модель вважається адекватною, якщо виконується умова:

$$F^{\text{расч}} < F^{\text{табл.}} \quad (4.26)$$

Оскільки умова (4.26) виконується ($F^{\text{расч}} = 2,617 < F^{\text{табл.}} = 4,04$), 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:

$$V_a = \frac{\sqrt{S_{\text{неад}}^2} \cdot 100\%}{\bar{y}}, \quad (4.27)$$

де \bar{y} – 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.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{y}_u}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193; S_{\text{неад}}^2 = 2 \cdot 10^{-4}.$$

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

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:

$$X_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta x_1}; X_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta x_2}; X_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta x_3}, \quad (4.28)$$

де X_1, X_2, X_3 – 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: $x_1 = 2,5 - 3,5$ % (Al), $x_2 = 9 - 12$ % (Mn), $x_3 = 3,2 - 3,8$ % (C);

x_{10}, x_{20}, x_{30} – основний рівень, відносно якого варіювались концентрації легуючих елементів в експерименті: $x_{10} = 3,0$ % (Al), $x_{20} = 10,5$ % (Mn), $x_{30} = 3,5$ % (C);

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ – інтервал варіювання концентрації легуючих елементів: $\Delta x_1 = 0,5$ % (Al), $\Delta x_2 = 1,5$ % (Mn), $\Delta x_3 = 0,3$ % (C).

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

$$y' = 0,193 - 0,025X_2 - 0,105X_3 + 0,017X_4 + 0,014X_5 + 0,00855X_6 - 0,024X_7; \rightarrow$$

$$\rightarrow y' = 0,193 - 0,025X_2 - 0,105X_3 + 0,017X_1X_2 + 0,014X_1X_3 + 0,00855X_2X_3 - 0,024X_1X_2X_3; \rightarrow$$

$$\begin{aligned}
&\rightarrow y' = 0,193 - 0,025 \left(\frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \right) - 0,105 \left(\frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) + 0,017 \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \right) + \\
&+ 0,014 \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) + 0,00855 \left(\frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) - \\
&- 0,024 \cdot \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) \rightarrow \\
&\rightarrow y' = 0,193 - 0,025 \left(\frac{x_2 - 10,5}{1,5} \right) - 0,105 \left(\frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) + 0,017 \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_2 - 10,5}{1,5} \right) + \\
&+ 0,014 \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) + 0,00855 \left(\frac{x_2 - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) - \\
&- 0,024 \cdot \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_2 - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right).
\end{aligned}$$

Таким чином, максимальною зносостійкістю після поверхневого оплавлення володіє чавун з максимальним вмістом вуглецю – 3,8 мас. %. Найменші питомі втрати маси ($0,059 \text{ г/см}^2$) отримані на зразку № 7 із чавуну, який містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C (табл. 4.9).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету.

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках.

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;
- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю необхідно негайно покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

5.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів гасіння пожежі.

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;

- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;

- наявності та справності блокувальних і запобіжних пристроїв, зблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Виключено". Повторне включення преса має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення. Повернення у вихідне положення органів аварійного відключення не повинно викликати повторного включення будь-якої частини преса.

Робота на пресах повинна проводитися після перевірки:

- справності роботи приладів системи управління, наявності та рівня мастила в резервуарі;
- відсутність течії масла;
- дії аварійно-попереджувальної сигналізації на сигнальному табло (червона лампочка - небезпеки);
- справності роботи фотозахисту;
- наявності тиску і відповідності його зусилля.

5.3 Вимоги охорони праці під час роботи

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220В електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захаращували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

5.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220В.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займисті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

5.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій.

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально оптимізовано хімічний склад фрикційних аустенітних марганцевих чавунів з використанням методики повного факторного експерименту 2^3 ; параметр оптимізації – питома втрата маси зразків. Показано, що для литих нетермооброблених чавунів оптимальний вміст вуглецю складає 3,0 - 3,2 %, для чавунів після поверхневої обробки з локальним оплавленням – 3,8 %.

2. Експериментально доведено, що зміна вмісту алюмінію в чавуні від 2,5 до 3,5 % не призводить до суттєвої зміни зносостійкості чавуна. Отже, недоцільно збільшувати концентрацію алюмінію в чавуні більше 2,5 %. Оптимальна концентрація марганцю в чавуні, при якій досягається мінімальна інтенсивність його зношування, складає 12 %.

3. Запропоновано дві інженерні методики розрахунку основних параметрів режиму електронно - променевої та лазерної обробки.

4. Розглянуто питання охорони праці в лабораторії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Электронно-лучевая сварка / Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук, думка, 1987. – 256с.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496с.
3. Шиллер З. и др. Электронно - лучевая технология: Пер. с нем. / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М.: Энергия, 1980. – 528с.
4. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Наук. думка, 1970. – 396с.
5. Барабашук В.И. и др. Планирование эксперимента в технике. – К.: Техніка, 1984. – 200с.
6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение. – 1980. – 304с.
7. Розанов Ю.Н. Методы математической статистики в материаловедении. – Л.: Машиностроение. – 1990. – 232с.
8. Будагьянц Н.А., Карский В.Е. Литые прокатные валки. – М.: Металлургия, 1983. – 173с.
9. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. – Киев: Техніка, 1990. – 192с.
10. Балицкий М.Г. Экспериментальні методи оптимізації ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка. – 2003. – 204с.
11. Литвиненко Е.Г. Литейные фрикционные сплавы / Е.Г. Литвиненко, Л.П. Ващенко. – К.: Наук. думка, 1991. – 326с.
12. Шелушевич А.М. Структура и свойства литых фрикционных материалов / А.М. Шелушевич, С.П. Бортников. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2010. – 287с.
13. Зеленко И.С. Фрикционные чугуны / И.С. Зеленко, Е.А. Матюшин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 189с.

14. Терентьев К.М. Особенности конструирования фрикционных узлов. Технология и материалы / К.М. Терентьев, А.Н. Стеценко. – М.: Металлургия, 1984. – 415с.
15. Раскатов А.Л. Специальные фрикционные и антифрикционные чугуны / А.Л. Раскатов, И.П. Расторгуев. – К.: Наук. думка, 1989. – 301с.
16. Марушкевич П.А. Износостойкие материалы в машиностроении / П.А. Марушкевич, А.В. Ратушняк. – М.: Машиностроение, 1987. – 212с.
17. Марукович Е.И. Новые фрикционные материалы / Е.И. Марукович, О.П. Зинченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 274с.
18. Марукович Е.И. Структура и свойства износостойких чугунов / Е.И. Марукович, О.П. Зинченко. – М.: Машиностроение, 2010. – 306с.
19. Стоянов Е.Р. Методы испытаний фрикционных материалов / Е.Р. Стоянов, А.И. Прохоров. – М.: Машиностроение, 1986. – 189с.
20. Ползунов В.В. Металловедение износостойких чугунов / Ползунов В.В., Вягилев К.М., Меркулов Е.И. – М.: Металлургия, 1982. – 356с.
21. Коршунов Л.С. Современные износостойкие материалы / Л.С. Коршунов, Е.П. Вяткин. – М.: Мир, 1991. – 431с.
22. Аввакумов Н.С. Лигатуры для модифицирования чугунов / Н.С. Аввакумов, Е.А. Сватов. – М.: Металлургия, 1981. – 252с.
23. Марукович Е.И. Износостойкие сплавы / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 428с.
24. Кузнецов О.П. Сплавы для работы в экстремальных условиях трения / О.П. Кузнецов, Р.С. Махненко. – К.: Наук. думка, 1991. – 267с.
25. Селиванов Ю.К. Фрикционные материалы / Селиванов Ю.К., Мордвинова А.В., Тищенко А.И. – К.: Наук. думка, 1992. – 192с.
26. Трофимов Н.М. Методы измерения износа материалов / Н.М. Трофимов, П.Н. Глущенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 189с.
27. Сомов А.В. Получение деталей из фрикционных чугунов методами центробежного литья / А.В. Сомов, Г.А. Воронов. – М.: Металлургия, 1988. – 241с.

28. Пархоменко В.Н. Легирование и микролегирование износостойких чугунов / В.Н. Пархоменко, Л.М. Дронов. – М.: Metallurgy, 1990. – 282с.
29. Котельников С.П. Микролегированные чугуны / С.П. Котельников, В.В. Маслов. – М.: Metallurgy, 1991. – 247с.
30. Дронов Л.М. Высокотемпературные узлы трения / Л.М. Дронов, С.П. Никитин. – М.: Машиностроение, 1987. – 324с.
31. Сомов А.В. Динамика и кинетика изнашивания фрикционных материалов / А.В. Сомов, А.Р. Лихицкий. – М.: Машиностроение, 1989. – 201с.
32. Марукович Е.И. Методы оценки долговечности фрикционных пар трения / Е.И. Марукович, А.Т. Гиршман. – М.: Машиностроение, 1998. – 273с.
33. Сапунов Д.Н. Усталостный износ фрикционных материалов / Сапунов Д.Н., Корягин П.В., Самойлов В.В. – К.: Наук. думка, 1992. – 193с.
34. Кравченко М.И. Фрикционные чугуны с интерметаллидным упрочнением / М.И. Кравченко, А.Л. Гринченко. – М.: Машиностроение, 1985. – 194с.