

навантаженні 350 т/год (0,952 та 0,847 кВт/т), проміжною при навантаженні 450 т/год (0,877 та 0,525 кВт/т), а найменшою – при 400 т/год (0,867 та 0,518 кВт/т). Зростання витрат електроенергії при максимальному навантаженні пов'язане зі зменшенням кількості відсіву дрібних класів, що йдуть повз дробарку, а також зростанням прямого навантаження на дробарку при збільшенні швидкості подачі шихти, натомість мінімальне значення витрат електроенергії у випадку дроблення шихти III кварталу при навантаженні шихти 400 т/год пов'язано з тим, що досягається максимальна ефективність відсіву на ситах, отже, знижується навантаження на дробарку. Таким чином, аналіз роботи дробильного відділення ВПЦ показує, що максимальна ефективність, з точки зору витрат електроенергії, досягається при проміжному значенні навантаження вихідної шихти у 400 т/год.

Бібліографічний список

1. ДСТУ 4096–2002. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань. – Київ: Держстандарт України, 2002.
2. Методичні рекомендації з визначення фізико-хімічних властивостей вугілля. – Харків: Інститут вугільної хімії, 2018.
3. Бондаренко В.І. Технологія підготовки вугілля до коксування. – Донецьк: ДонНТУ, 2015.
4. Іванов П.П. Відсів дрібних класів у процесі підготовки вугільних шихт. – Дніпро: УкрНДІвуглезбагачення, 2020.

Increasing the efficiency of coal preparation for coking and reducing electricity costs for its grinding.

Myronenko Andriy, postgraduate student, Meshchanin Vaieriy, PhD in chemical sciences (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute")

The composition of coal concentrates included in the raw material base and the operation of the crushing department were studied. The scheme of preparation of coal charge using the technology of screening of fine classes at the VPC of PJSC "ZAPORIZHKOKS" was studied.

Keywords: coal concentrates, charge, preparation scheme, electricity consumption, hammer crusher, fine classes, screening.

УДК 662.741.351

АНАЛІЗ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ПЛИТ ГАСИЛЬНОГО ВАГОНА: ПОРІВНЯННЯ З ЗАРУБІЖНИМИ ДОСЛІДЖЕННЯМИ ТА РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДУ

С. В. Нестеренко¹, Л. П. Банніков², О. Л. Борисенко³

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, 61002, м.

Харків, вул. Маршала Бажанова, 17, Україна.

¹*Нестеренко Сергій Вікторович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри "Хімії та інтегровані технології", e-mail: nesterhnamg@gmail.com*

Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна.

²Банніков Леонід Петрович, док. техн. наук, завідувач хімічним відділом, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com

³Борисенко Олександр Людвикович, канд. техн. наук, директор, e-mail: zd@ukhin.org.ua

Розглянуто причини виходу з ладу плит гасильного вагона, виготовлених із нержавіючої сталі. Показано схожість руйнувань із результатами зарубіжних досліджень аналогічних руйнувань, визначено склад поверхневого шару та плити за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу.

Ключові слова: гасіння коксу, корозійне розтріскування під напругою.

Мокре тушіння коксу є невід'ємним етапом у процесі коксування, спрямованим на ефективне охолодження та гасіння високотемпературного коксу, отриманого в процесі коксування вугілля. Ця процедура вимагає використання води для зниження температури коксу до безпечного рівня та запобігання його самозагорянню. Однак мокре тушіння супроводжується рядом складних процесів, таких як утворення гарячих газів, викид води в атмосферу та вплив на фізико-хімічні властивості коксу. В таких умовах необхідно забезпечити оптимальні умови роботи обладнання, що вимагає розробки спеціалізованих конструктивних рішень для тушильних вагонів та інших елементів технологічної лінії.

Одним з ключових завдань при експлуатації таких установок є підвищення корозійної стійкості матеріалів, з яких виготовлені плити тушильних вагонів. Вплив високих температур, агресивних хімічних речовин та вплив води сприяє прискореному зношенню металевих поверхонь, що може призвести до зниження ефективності роботи обладнання та збільшення витрат на його обслуговування. Тому дослідження та впровадження нових матеріалів, а також технологій захисту від корозії, є найважливішими напрямками в галузі коксового виробництва. Розробка та покращення матеріалів для плит тушильних вагонів повинні враховувати як механічну міцність, так і стійкість до впливу різних агресивних факторів, що забезпечить довговічність та стабільну роботу обладнання.

Для захисту низьковуглецевої сталі гасильного вагона від впливу високих температур, зносу та абразивного стирання, спричинених падінням коксу, застосовуються захисні плити. Проте ці плити часто виходять з ладу через розтріскування або утворення бульбашок на їхній поверхні. Робочі умови та навколишнє середовище захисних плит коксового гасильного вагона є надзвичайно складними: вони зазнають термічного удару від розжареного коксу, температура якого сягає близько 1000°C після вивантаження з печі. Матеріал гасильного вагона працює в умовах різких перепадів температур (від 1000°C до 100–150°C під час мокрого гасіння), а також піддається ударному та ударно-абразивному зносу від контакту з коксом.

Однією з ключових особливостей експлуатації є агресивність продуктів розпаду зв'язаних солей аміаку, які утворюються на розпеченій поверхні коксу під час мокрого гасіння. Ці продукти, зокрема хлориди та сульфати, сприяють

корозійному руйнуванню плит. Крім того, як фактор, що впливає на руйнування плит, вказується рН стічних вод, який коливається в межах 6–9 одиниць [1]. Такі значення рН можуть посилювати корозійні процеси, особливо в поєднанні з високою температурою та вологістю.

Через ці складні умови конструкційні матеріали гасильних вагонів при мокрому способі гасіння мають низький термін служби та недостатню тріщиностійкість. Зазвичай на поверхні пластин плит утворюються тріщини, які швидко розростаються, що призводить до повного руйнування плити. Деформація та руйнування футеровочних плит піддону кузова гасильного вагона ускладнюють сходження коксу під час вивантаження, спричиняють його зависання, що вимагає зупинки вагона для технічного обслуговування та ремонту. Такі простоти та вихід з ладу коксового гасильного вагона негативно впливають на продуктивність усього коксохімічного підприємства, знижуючи його ефективність і збільшуючи витрати на ремонт.

Для зменшення ризику руйнування необхідно одночасно забезпечити теплостійкість, зносостійкість та корозійну стійкість матеріалів плит. Найпоширенішим матеріалом для плит коксового гасильного вагона є чавун, який відзначається високим тепловим опором. У зарубіжних технологіях мокрого гасіння коксу часто використовують жаростійкі чавуни та чавуни зі сфероїдальним графітом, які мають кращі характеристики міцності та стійкості до термічних і корозійних впливів.

Для підвищення довговічності плит розроблялися методи нанесення легуючого покриття на відливки чавунних плит коксового гасильного вагона. Як легуючий елемент використовувався вуглецевий ферромарганець марки МН-4 із зернистістю 0,2–0,315 мм. Ливарну форму з нанесеним легуючим покриттям просушували при температурі 240°C, після чого в неї заливали розплавлений чавун, нагрітий до 1295°C. Такий підхід дозволяє підвищити зносостійкість і жаростійкість поверхні плити за рахунок утворення міцного легованого шару.

Хромисті комплексно-леговані чавуни вирізняються високою жаро- та зносостійкістю, а також покращеними механічними властивостями при високих температурах. Ці характеристики забезпечуються особливостями мікроструктури таких чавунів, зокрема наявністю хромових карбідів, які підвищують міцність і стійкість до абразивного зносу. Окислювальна стійкість чавунів залежить від вмісту хрому: навіть при відносно невеликих добавках хрому (0,5–1,5%) спостерігається помітне зменшення окислення відливок. Хром сприяє утворенню захисної оксидної плівки (Cr_2O_3), яка перешкоджає подальшій корозії. Однак у вологому середовищі, особливо за наявності хлоридів і сульфатів, ця плівка може руйнуватися, що призводить до прискорення корозійних процесів.

Для підвищення терміну служби плит також можна розглянути використання сучасних матеріалів, таких як нержавіючі сталі з додаванням молібдену (наприклад, сталь 1.4404), які мають вищу стійкість до хлоридної корозії. Крім того, перспективним напрямком є нанесення захисних покриттів,

наприклад, керамічних або карбідних, які можуть значно підвищити корозійну та зносостійкість плит у складних умовах експлуатації.

У статті [2] описано аналіз причин руйнування футеровочних плит коксовозного вагона, які використовуються в процесі мокрого гасіння коксу. Плити виходили з ладу через 15 днів – 1 місяць.

Плити виготовлені з жаростійкого сплаву HP N06705-Nb Modified, який містить високий рівень хрому (24–28%), нікелю (33–37%) та ніобію (1%). Цей сплав призначений для роботи в умовах високих температур (до 1150°C) і сухого корозійного середовища, але виявився вразливим у умовах мокрого гасіння. Встановлено основний механізм руйнування – корозійне розтріскування під напругою (SCC, Stress Corrosion Cracking).

Візуально, на макрорівні, поверхня плити вкрита розгалуженими тріщинами, які починаються з поверхні. Мікроструктура демонструє розгалуження тріщин, їх міждендритне поширення та наявність хромових карбідів, що сприяють корозії.

Різкі перепади температур (з 1200°C до 100–150°C) під час гасіння коксу водою спричиняють циклічні термічні напруження. Тріщини мають характерне розгалуження і поширюються міждендритними областями, що є типовим проявом корозійного розтріскування під напругою. Тріщини зароджуються на поверхні або в місцях концентрації напружень (наприклад, у зонах зміни перерізу).

Наявність хлору (Cl) і сірки (S) у навколишньому середовищі знижує енергію, необхідну для поширення тріщин. Елементний аналіз виявив концентрацію Cl (2–4,5%) та S уздовж шляхів поширення тріщин, а також зменшення вмісту хрому (Cr) у цих зонах.

Наявність хромових карбідів уздовж дендритних меж сприяє розгалуженню тріщин, оскільки карбіди та аустенітна матриця мають різні коефіцієнти теплового розширення, що посилює внутрішні напруження. Утворення оксидів заліза (Fe_2O_3) навколо тріщин відбувається через окислення в присутності кисню та вологи.

У цій роботі проаналізовано причини виходу з ладу плити коксовозного вагона на одному з українських підприємств. На рис. 1 зображена поверхня плити коксовозного вагона з явними ознаками корозійного руйнування.



Рис. 1. Зовнішній вигляд ділянки плити гасильного вагона

Стрілка на фото вказує на велику тріщину у верхній частині плити. Тріщина виглядає глибокою і має нерівні краї, що може свідчити про її розвиток під впливом напружень. Поверхня плити вкрита шаром іржі (коричнево-червоний колір), що вказує на окислення заліза. Це відповідає опису в статті [2], де окислення пов'язане з впливом вологи та кисню під час гасіння.

У зоні, виділеній прямокутником, помітні глибші пошкодження, які можуть бути питингами або ерозійно-корозійними заглибленнями. Це узгоджується з описом у статті [2], де корозійне розтріскування під напругою (SCC) починається з питингових руйнувань. Поверхня виглядає неоднорідною, з ділянками різного ступеня руйнування. Це може бути пов'язано з нерівномірним впливом температури, води та механічних навантажень від коксу, що також відповідає умовам, описаним у статті [2].

На фото видно велику тріщину, що відповідає опису зародження тріщин із поверхні, як зазначено в [2], але тріщини виглядають більш лінійними, без явного розгалуження. Це може бути зумовлено тим, що сталь 1.3965 має іншу мікроструктуру (аустенітно-мартенситну), ніж аустенітна з карбідами, описана в [2], або тим, що процес руйнування перебуває на більш ранній стадії.

На основі статті [2] та фото на рис. 1, найбільш імовірним механізмом руйнування вашої плити є корозійне розтріскування під напругою (SCC), спричинене комбінацією термічних напружень (від циклічного нагрівання та охолодження) і агресивного середовища (вода, хлор, сірка). Окислення та питингова корозія також відіграють роль, як і в випадку з плитою гасильного вагона, описаною в [2].

Ідентифікацію та вимірювання концентрації металів виконували за допомогою рентгенівського флуоресцентного спектрометра ElvaX ProSpector 2 (ТОВ «Елватех», Україна). Результати представлені в табл.1.

Таблиця 1

Склад зразків плити коксового гасильного вагона

| Елемент | Підготовлена поверхня | Поверхня контакту з агресивним середовищем |
|---------|-----------------------|--|
| Fe | 64,87 | 75,70 |
| Cr | 16,89 | 11,90 |
| Mn | 7,58 | 2,56 |
| Ni | 6,9 | 5,88 |
| Si | 2,08 | 0,87 |
| Al | 1,08 | 0,94 |
| Cu | 0,38 | 0,21 |
| Mo | 0,11 | 0,15 |
| V | 0,03 | 0,01 |
| P | 0,03 | 0,90 |
| W | 0,03 | 0,12 |
| Ti | 0,01 | 0,02 |
| S | | 0,64 |
| As | | 0,10 |

Аналіз показав, що плита виготовлена зі сталі 1.3965 (12X17Г9АН4) – це нержавіюча сталь із меншим вмістом хрому (17%) і нікелю (4%), ніж у [2] (24–28% Cr, 33–37% Ni). Хоча сталь 1.3965 також стійка до корозії завдяки хрому, вона може бути менш стійкою до корозійного розтріскування під напругою (SCC) в умовах високої температури та агресивного середовища (вода, хлор, сірка). Це пояснює схожі ознаки руйнування, але, ймовірно, з меншою інтенсивністю розгалуження тріщин.

Хімічні зміни (зниження Cr, накопичення S, окислення Fe) і візуальні ознаки (тріщини, іржа, пітінги) на плиті вказують на корозійне розтріскування під напругою (SCC) як основний механізм руйнування, що узгоджується з висновками статті [2].

Накопичення сірки (S) і ймовірна присутність хлору (Cl) з навколишнього середовища (кокс, вода) підтверджують, що корозія посилюється за рахунок хімічної агресії.

Зниження хрому вказує на руйнування захисної оксидної плівки, що робить матеріал вразливим до подальшої корозії.

Збільшення вмісту заліза на поверхні пов'язане з утворенням оксидів заліза (Fe_2O_3), що підтверджується іржавим шаром. Це типово для корозії в умовах високої температури і вологості, як при гасінні коксу.

Для підвищення стійкості плит гасильного вагона до умов експлуатації, як і в статті [2], можна розглянути використання феррито-перлітної сталі, яка не схильна до корозійного розтріскування під напругою в умовах мокрого гасіння. Це дозволило б збільшити термін служби плит. Також можна застосовувати більш стійкі сплави з додаванням молібдену (наприклад, 1.4404), які краще протистоять хлоридній корозії.

Бібліографічний список

1. Патент на винахід CN108165871B: Спосіб зменшення корозійного руйнування плит коксотушального вагона / заявник: Китайська корпорація хімічної промисловості. – № CN108165871B. – 2018. – Бюл. № 20.
2. Кіщор, К., Мукхопадхьяй, Г. Аналіз причин руйнування футеровочних плит коксового гасильного вагона / К. Кіщор, Г. Мукхопадхьяй // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 771–776. – DOI: 10.1007/s11668-019-00657-3.

Failure Analysis of Stainless Steel Quenching Car Plates: Comparison with Foreign Studies and X-Ray Fluorescence Analysis

Nesterenko Serhiy, PhD in technical sciences (O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv), Bannikov Leonid, Doctor of Technical Sciences, Borisenko Olexandr, PhD in technical sciences (Ukrainian State Research Institute For Carbochemistry).

The reasons for the failure of the quenching car plates made of stainless steel have been investigated. The similarity of the damage to the results of foreign studies on analogous failures has been demonstrated, and the composition of the surface layer and the plate has been determined using X-ray fluorescence analysis.

Key words: coke quenching, stress corrosion.