



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: L61

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.06

Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing

Citation:

Panchenko H., Ivanov A., Suslo N., Huk Y. (2025). Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol.3 No.2 (2025), 66–77. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.06>

Hanna Panchenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-7565-0380*

Andrii Ivanov

Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

Nataliia Suslo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-9280-6316*

Yelyzaveta Huk

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-8866-9467*

Abstract: This investigation analyzes the influence of alkali metal compounds introduced into the firing process through the bentonite binder contained in iron ore pellets on the durability of grate bar assemblies in conveyor-type induration machines. During pellet firing, sodium- and potassium-bearing components inherent to montmorillonitic bentonites transform into reactive forms and interact at high temperatures with the grate bar material. In the presence of chromium in the steel, a complex oxide scale develops at the metal–oxide interface, incorporating low-melting chromate phases. These phases significantly reduce the protective capacity of the oxide film, promote intense scale spalling, and accelerate high-temperature chemical erosion, ultimately resulting in rapid and catastrophic grate bar degradation. To evaluate the degradation mechanisms, laboratory tests were carried out on samples of cast steel 40Kh24N12SL, which were oxidized and exposed to sodium-containing components at 1070 °C for six hours. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed the formation of multilayer oxide scales enriched in sodium and chromium and the presence of reaction products characteristic of chromates, confirming the intensification of corrosion processes in the presence of alkali metals. The obtained results clarify the origins of severe grate bar wear under pellet induration conditions when bentonite is used as the binder. Since the alkali metal content is defined by the mineralogical nature of bentonite and is technologically necessary for achieving adequate pellet strength, its reduction is not feasible. Therefore, mitigating the destructive effect of alkali metals must rely on selecting more corrosion-resistant alloys for grate bars and optimizing the temperature–oxidation parameters of the firing process.

Keywords: alkali metals; sodium compounds; pellet firing; grate bar field; high-temperature corrosion; chromates; ferrates; bentonite binder; conveyor induration machine

Received: 11/12/2025

Accepted: 15/12/2025



JEL: L61

Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing

Hanna Panchenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Andrii Ivanov

Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

Nataliia Suslo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Yelyzaveta Huk

Assistant State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Abstract: This investigation analyzes the influence of alkali metal compounds introduced into the firing process through the bentonite binder contained in iron ore pellets on the durability of grate bar assemblies in conveyor-type induration machines. During pellet firing, sodium- and potassium-bearing components inherent to montmorillonitic bentonites transform into reactive forms and interact at high temperatures with the grate bar material. In the presence of chromium in the steel, a complex oxide scale develops at the metal–oxide interface, incorporating low-melting chromate phases. These phases significantly reduce the protective capacity of the oxide film, promote intense scale spalling, and accelerate high-temperature chemical erosion, ultimately resulting in rapid and catastrophic grate bar degradation. To evaluate the degradation mechanisms, laboratory tests were carried out on samples of cast steel 40Kh24N12SL, which were oxidized and exposed to sodium-containing components at 1070 °C for six hours. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed the formation of multilayer oxide scales enriched in sodium and chromium and the presence of reaction products characteristic of chromates, confirming the intensification of corrosion processes in the presence of alkali metals. The obtained results clarify the origins of severe grate bar wear under pellet induration conditions when bentonite is used as the binder. Since the alkali metal content is defined by the mineralogical nature of bentonite and is technologically necessary for achieving adequate pellet strength, its reduction is not feasible. Therefore, mitigating the destructive effect of alkali metals must rely on selecting more corrosion-resistant alloys for grate bars and optimizing the temperature–oxidation parameters of the firing process.

Keywords: alkali metals; sodium compounds; pellet firing; grate bar field; high-temperature corrosion; chromates; ferrates; bentonite binder; conveyor induration machine.

Дослідження впливу сполук лужних металів на стійкість колосникового поля конвеєрних машин при обпаленні залізорудних окатишів

Ганна Панченко

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Андрій Іванов

заступник начальника фабрики огрудкування

ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», Кривий Ріг, Україна

Наталія Сусло

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Єлизавета Гук

асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Анотація: У роботі досліджено вплив сполук лужних металів, що надходять у процес обпалення разом із бентонітовою зв'язкою у складі залізорудних окатишів, на стійкість колосникового поля конвеєрних машин. Під час обпалення натрієві та калієві компоненти, присутні в монтморилонітових бентонітах, переходять у реакційно здатні форми та за високих температур взаємодіють із матеріалом колосника. За наявності в сталі хрому в зоні контакту утворюється окалина складної структури, у якій фіксуються легкоплавкі хромати. Такі фазові утворення різко знижують захисні властивості оксидної плівки, спричиняючи її інтенсивне відшаровування та стрімке прогресування хімічної ерозії, що призводить до передчасного руйнування колосників. Для оцінювання механізмів деградації проведено лабораторні дослідження зразків литої сталі 40Х24Н12СЛ, які окиснювали та піддавали дії натрієвмісних компонентів за температури 1070 °С упродовж шести годин. Методами електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу встановлено формування багатошарової окалини з підвищеним умістом натрію та хрому й наявністю фаз, характерних для хроматів, що підтверджує інтенсифікацію корозійних процесів у присутності лужних металів.

Отримані результати дозволяють пояснити природу катастрофічного зношування колосникового поля за умов обпалення окатишів із бентонітовою зв'язкою. Оскільки вміст лужних металів визначається мінералогічною природою бентоніту та є технологічно необхідним для забезпечення міцності окатишів, мінімізація їхнього впливу має ґрунтуватися на виборі більш корозійностійких матеріалів колосників і коригуванні температурно-окиснювальних параметрів обпалення.

Ключові слова: лужні метали; натрієві сполуки; обпалення окатишів; колосникове поле; високотемпературна корозія; хромати; феррати; бентонітова зв'язка; конвеєрна обпалювальна машина.

Вступ (Introduction)

Обпалення залізорудних окатишів на конвеєрній машині Lurgi ОК-552 супроводжується високотемпературною хімічною ерозією литих сталевих колосників. Унаслідок цього їхня експлуатаційна стійкість у середньому не перевищує шести місяців. Заміна колосників

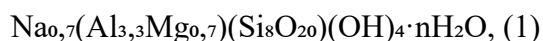
призводить до простоїв обладнання, зниження продуктивності машини та, відповідно, до зростання питомої витрати колосників і підвищення собівартості окатишів.

Встановлено, що основними причинами виходу з ладу колосників є: механічне зношування; хімічна ерозія під дією матеріалу окатишів і газового середовища; температурний режим роботи обпалювальної машини; низька якість литих колосників та невідповідність хімічного складу сталі встановленим вимогам (*Panchenko et al, 2008*).

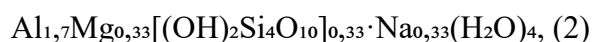
Сирі офлюсовані окатиші діаметром 12–15 мм, що надходять на окиснювальний обпал, складаються з дрібних фракцій магнетитового концентрату, вапна та зв'язувальної речовини, переважно бентоніту. Під час аналізу процесів хімічної ерозії колосників із хромонікелевої сталі необхідно враховувати хімічний склад і мінералогічну природу бентоніту. Термін «бентоніт» (bentonite) є загальноприйнятою в США назвою глини, що утворилася внаслідок конседиментаційного вивітрювання. Основним мінеральним компонентом бентоніту є монтморилоніт (*Strübel et al, 1991*)

Слід підкреслити, що при одному й тому ж загальному найменуванні мінералу монтморилоніту його різновиди істотно відрізняються за хімічним складом і будовою. Межі складів монтморилонітової групи змінюються від чисто алюмосилікатних (тип А) до магнезіальних (тип Б). Серед обмінних катіонів найбільше значення мають іони лужних металів і кальцію. Іони магнію значно міцніше зв'язані в структурі у вигляді груп $[MgO_6]$, що заміщують $[AlO_6]$ в октаедричних шарах пірофілітового типу. У мінералогічній різновидності, що називається бейделітом – $(Na, Ca_{0,5})_{0,33}Al_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ – як кінцевим членом групи монтморилонітів, кількість лужних елементів є досить значною (*Strübel et al, 1991*).

За даними К. Фрея (*Frye, 1983*), монтморилоніт має лужну реакцію (рН 6,2–9,0) та наступний формульний склад:



У «Мінералогічному словнику» Г. Штрубеля та З. Х. Циммера (*Strübel et al, 1991*) цей мінерал (тип Б) подається формулою:



Таким чином, наведені вище дані свідчать про суттєві відмінності між різновидами монтморилоніту за вмістом лужних компонентів (зокрема іонів натрію), що актуалізує необхідність дослідження впливу хімічного складу бентоніту разом із температурно-окиснювальними параметрами обпалення окатишів на хімічну ерозію колосників.

У разі використання бентоніту, який містить достатню кількість мінеральних форм Na_2O і K_2O , для отримання механічно міцних окатишів натрієва добавка (сода) як «активатор» зазвичай не вводиться або додається у незначній кількості. Якщо ж застосовуються монтморилонітові глини з низьким вмістом Na_2O та K_2O , але з підвищеним вмістом CaO (наприклад, Дашуківського родовища), передбачається введення соди у кількості 5–7%. Це може посилювати хімічну ерозію колосників під час обпалення окатишів через зниження захисних властивостей окалини.

Окиснювальний обпал магнетитових окатишів здійснюється за температурно-газовим режимом, розробленим на ПрАТ «ПівніГЗК» для обпалювальних машин Lurgi ОК-552. Температурно-часові режими сушіння сирих окатишів практично виключають види руйнування, що проявляються утворенням тріщин на поверхні або високотемпературним вибуховим руйнуванням, пов'язаним з розвитком об'ємно-напруженого стану внаслідок великих градієнтів вологості та температури (*Pokhyl et al, 2003*)

При окиснювально-зміцнювальному обпалі офлюсованих окатишів перебігає низка важливих окисно-відновних процесів, серед яких екзотермічне окиснення магнетиту до гематиту:



Термокінетика окиснення та дифузійний транспорт іонів під час обпалення були предметом багатьох досліджень (Едстрем та ін.). Максимальна ступінь окиснення спостерігається у діапазоні 900–1000 °С [4]. За вищих температур ступінь окиснення магнетиту зменшується через термічну дисоціацію гематиту згідно з реакцією:



Е. Ф. Вегман та ін. (*Pokhyl et al, 2003*) зазначають, що при вмісті кисню у газовому теплоносії 10–15% температура дисоціації гематиту становить 1360–1370 °С.

Під час обпалення окатишів відбувається твердофазна хімічна взаємодія між Fe_3O_4 і SiO_2 (як із концентрату, так і з бентоніту) з утворенням силікатного розплаву, який бере участь у формуванні зміцнювальної фази. Лужний силікатний розплав може бути значно активнішим щодо хімічної ерозії металу колосників порівняно з розплавом, утвореним за участю кремнезему магнетитового концентрату та магнієвмісного монтморилоніту. З огляду на те, що різновиди бентонітів суттєво відрізняються за вмістом натрію та калію, а додаткове введення натрієвмісних активаторів у технологію офлюсованих окатишів може змінювати характер реакцій у зоні високотемпературного обпалення, виникає потреба у поглибленому вивченні впливу сполук лужних металів на інтенсивність хімічної ерозії та стійкість колосникового поля конвеєрних машин. Саме це визначає актуальність даного дослідження та формує його мету – встановити роль лужних компонентів в процесі обпалення окатишів у механізмах деградації колосників.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для дослідження хімічної ерозії колосникового поля були використані зразки, виготовлені з жароміцної литої сталі марки 40Х24Н12СЛ, що застосовується для виготовлення колосників конвеєрних обпалювальних машин. Перед проведенням основного експерименту зразки піддавали попередньому окисненню газовим пальником з метою формування оксидної плівки, характерної для реальних умов роботи колосників у зоні високотемпературного обпалення.

Для моделювання дії лужних компонентів бентонітової зв'язки поверхню окиснених зразків обробляли натрієвмісним реагентом (Na_2CO_3), що відтворює хімічний вплив лужних оксидів, присутніх у складі монтморилонітового бентоніту. Подальше термооброблення проводили у муфельній печі при температурі 1070 °С протягом 6 годин. Вибраний температурний режим відповідає зоні максимального термохімічного навантаження на колосникове поле конвеєрної машини типу Lurgi ОК-552 та забезпечує інтенсивний розвиток окисно-лужних взаємодій.

Аналіз структури та фазового складу окатишів, матричної зони та оксидних шарів зразків колосників здійснювали методами електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Дослідження проводили на сканувальному електронному мікроскопі JSM-6360LA із застосуванням режимів точкового аналізу, картування та лінійного елементного сканування. Прискорююча напруга для вивчення мікроструктури окатишів становила 15 кВ, зразків колосників – 20 кВ, що дозволяє коректно визначати концентрацію хрому, заліза та натрію у складних оксидних утвореннях (*Goldstein et al, 2018*)

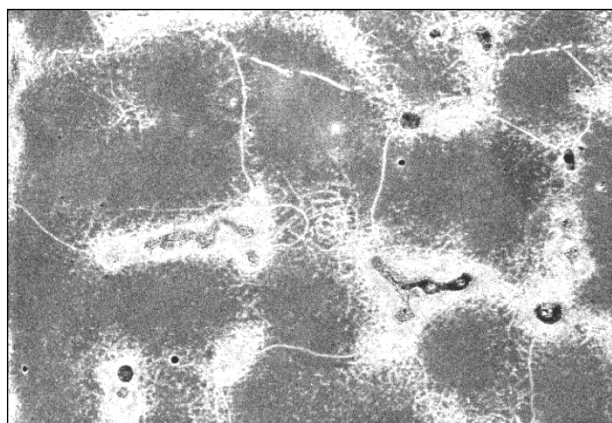
Металографічну підготовку зразків колосників виконували шляхом електрополірування у суміші метанолу, сірчаної кислоти та гліцерину з подальшим хімічним травленням реактивом Марбля для виявлення мікроструктурних особливостей зони хімічної ерозії.

Результати (Results)

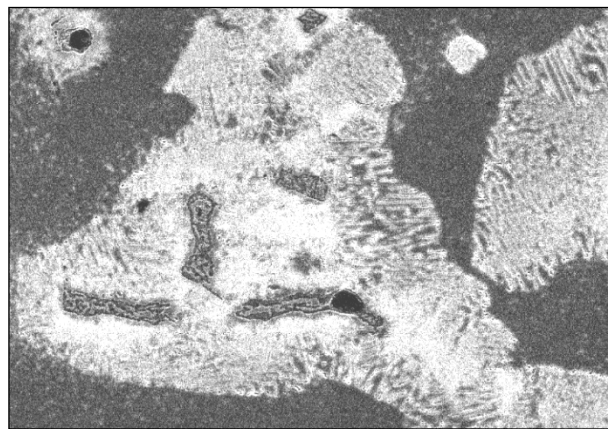
Дослідження мікроструктури зразків колосників і поверхневих шарів окатишів дозволяють оцінити взаємодію матеріалів у зоні високотемпературного обпалення та виявити особливості формування ерозійних процесів. Аналіз мікроструктур і хімічного складу окалини

та матриці металу дає змогу встановити локалізацію фазових виділень і характер перерозподілу лужних компонентів із бентоніту. Отримані дані є основою для пояснення механізму утворення агресивних умов для колосникового поля.

На рис. 1 представлена мікроструктура серцевини зразка сталі 40Х24Н12СЛ при збільшеннях. Уздовж меж зерен чітко спостерігаються темноколірні виділення, які за морфологією та характером локалізації ідентифікуються як сульфідна фаза, що узгоджується з даними про типові міжзеренні включення у жароміцних хромонікелевих сталях (*ASM International, 1994*). При збільшенні 3500 (рис. 2) добре видно відшаровування окалини після обпалення зразка в присутності натрійвмісного компонента. Трансформація зони металу, що прилягає до реакційної області, проявляється у зменшенні кількості темних сульфідних виділень.

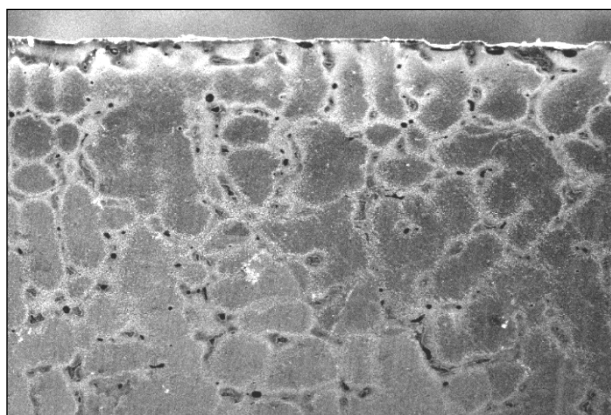


x500

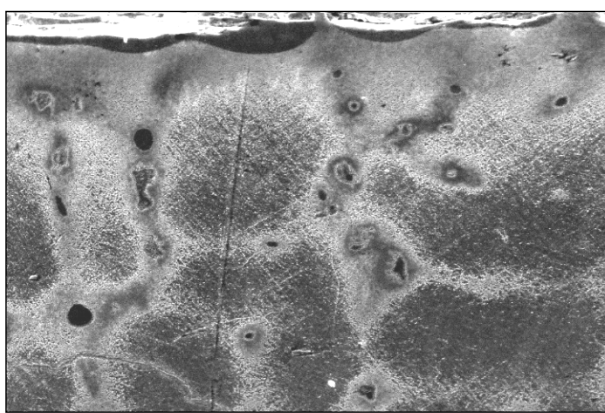


x1000

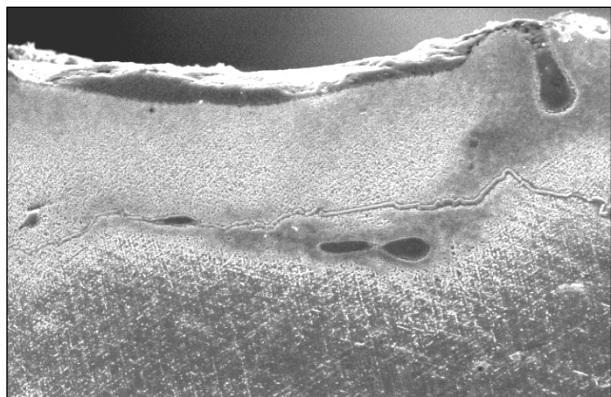
Рисунок 1. Мікроструктура литого зразка сталі 40Х24Н12СЛ при різних збільшеннях; травлення електролітичне у реактиві метанол – 60 мл, H_2SO_4 – 20 мл та гліцерин – 10 мл.



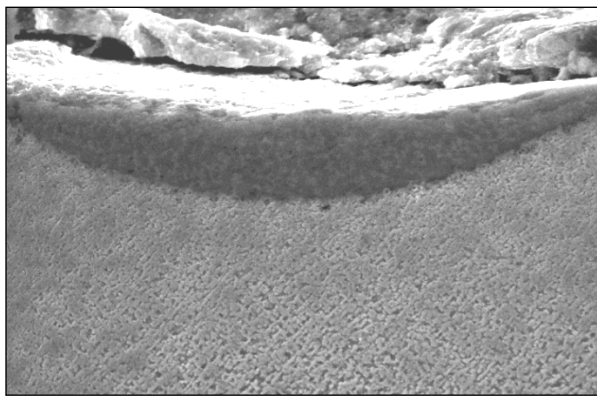
x150



x500



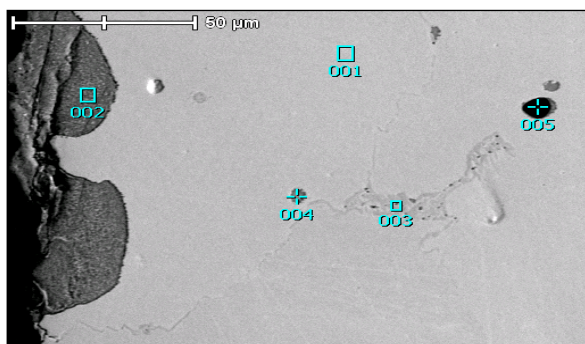
x1000



x3500

Рисунок 2. Мікроструктура реакційної зони зразка сталі 40Х24Н12СЛ при різних збільшеннях; травлення хімічне у реактиві Марбля.

Спектрограми РСМА матричної фази наведено на рис. 3 (рамка – точка 001) та рис. 4 (хрестик – точка 006). Хімічний склад матриці відповідає марочному складу сталі. Прикордонні виділення темної фази, відповідно до результатів точок 001 (рис. 3), та 008–011 (рис. 4), являють собою сульфід CrS стехіометричного складу (38,1% S та 61,9% Cr), частково ізоморфно заміщений атомами Mn та Fe, що відповідає відомим даним про фазовий склад сульфідних виділень у сталях аналогічного класу (*Edström, (2008); Lyakishev& Gasik, (2020)*).



x800 a

№ ділянки	C	O	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Всього, %
001	0	0	0	0.37	0	0	20.26	0	66.96	12.42	100
002	0	11.02	0	0.45	0.15	0	39.21	0	30.54	18.63	100
003	3.43	0.22	0	0.21	3.13	0	63.44	0	26.73	2.83	100
004	1.42	0	0	0	32.97	0	36.18	29.43	0	0	100
005	0	26.44	4.76	42.68	0.52	1.99	11.73	8.82	3.05	0	100

Рисунок 3. Результати РСМА фаз у реакційній зоні зразка сталі 40X24H12СЛ: а – точки аналізу, позначені рамками; б – приблизний склад за результатами РСМА. Шліф у стані після електрополірування



x1200 a

№ ділянки	O	Na	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Всього, %
006	0	0	0.35	0	21.35	0	65.72	12.58	100
007	9.91	0.53	0.18	6.41	72.74	2.82	7.41	0	100
008	0	0	0	33.57	61.84	2.9	1.69	0	100
009	0	0	0	34.64	54.45	9.02	1.89	0	100
010	0	0.88	0.4	1.45	21.32	0	64.46	11.5	100
011	0	0	0	33.18	59.79	5.23	1.8	0	100
012	4.12	0	0	20.8	57.92	3.48	11.69	1.98	100

б

Рисунок 4. Результати РСМА фаз у серцевині зразка сталі 40X24H12СЛ: а – точки аналізу, позначені рамками; б – приблизний хімічний склад за результатами РСМА. Шліф у стані після електрополірування

Особливу увагу привертає окалина, що сформувалась на поверхні після обпалення зразка в присутності натрієвмісного реагенту (рис. 3, рамка – точка 002). Вона має виразну шарувату будову.

Елементні карти (рис. 5) демонструють чіткий перерозподіл компонентів: внутрішній шар окалини збагачений Si, Na та Cr, тоді як вміст Fe у цій зоні значно знижений. Гетерогенність структури простежується за нерівномірним розподілом Ni. Концентрація натрію у внутрішній частині окалини вказує на інтенсивне протікання реакцій Na_2O з Cr_2O_3 , що узгоджується з термодинамічними передумовами утворення хроматів низької температури плавлення (Pokhyl et al, 2003).

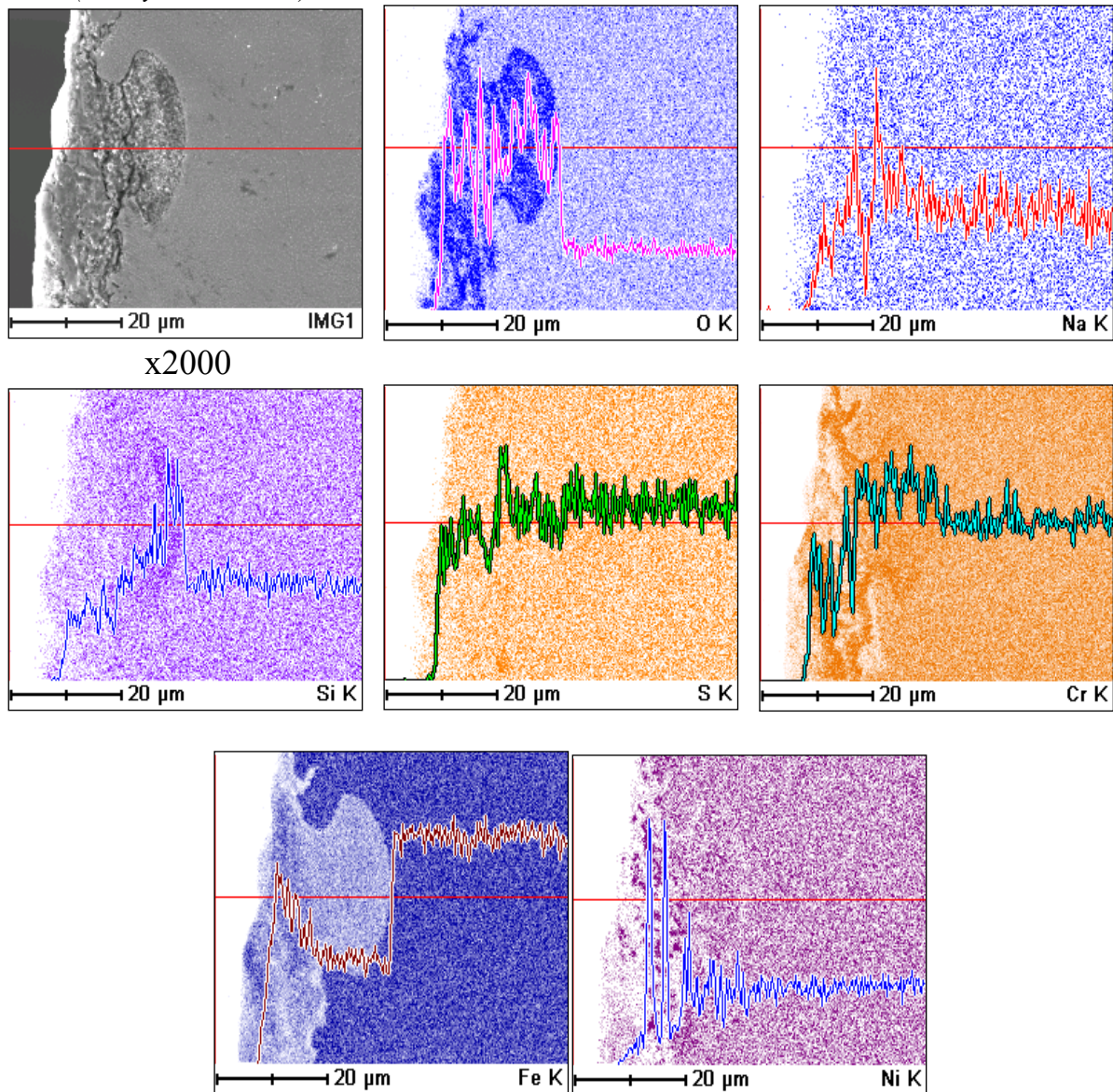
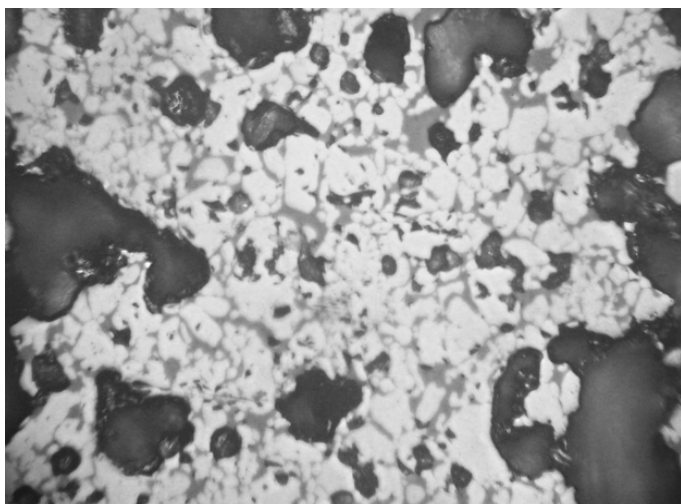


Рисунок 5. Результати РСМА сталі 40X24H12СЛ у режимі картування шляхом накладання спектрограм уздовж лінії сканування реакційної зони зразка. Шліф у стані після електрополірування.

Для коректного пояснення цих результатів необхідно врахувати будову обпалюваних окатишів та поведінку бентонітової зв'язки під час термооброблення.

Як видно на рис. 6, поверхнева зона обпаленого окатиша має складну шарувату структуру, що складається зі спечених зерен залізних мінералів та бентонітової зв'язки, розташованої переважно в міжзернових проміжках між частками магнетиту. Окремі зерна обрамлені частково відновленими окислами заліза. При збільшенні $\times 100$ бентонітова зв'язка виглядає як відносно гомогенна фаза.



×100

Рисунок 6. Мікроструктура обпаленого окатиша (оптична металографія)

Хімічний склад бентоніту, що використовувався в якості зв'язуючого, характеризується високим вмістом кремнезему та значними концентраціями оксидів лужних металів (мас. %):

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
48,82	16,64	4,28	2,73	0,55	0,065	0,041
S _{заг}	F _{сзаг}	Fe ₂ O ₃	FeO _{заг}	Na ₂ O	K ₂ O	CO
0,022	6,0	8,14	0,39	0,58	0,94	3,08

Наявність 0,58% Na₂O і 0,94% K₂O є критичною з точки зору високотемпературної взаємодії з поверхнею колосників. У структурі монтморилоніту (головної мінеральної фази бентоніту), ці елементи перебувають у міжшаровому просторі та легко переходять у реакційноздатні форми при температурах 900–1200 °С.

Під час обпалення відбуваються глибокі структурні й фазові перетворення бентонітових компонентів, що простежується на рисунку 7. Хімічний склад бентонітової зв'язки змінюється наступним чином, %:

Na ₂ O	Mg ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO
0,45	1,72	1,1	43,56	0,71	16,47	35,98

Тобто, під час обпалення окатишів, оксиди Na₂O та K₂O, що містяться у складі бентонітової зв'язки, не видаляються, а активно беруть участь у формуванні нових мінеральних утворень, що підвищують механічні властивості обпалюваних окатишів.

Розподіл елементів між рудним зерном і бентонітовою зв'язкою обпаленого окатиша при скануванні кожного елемента в режимі кольорового картування з нанесенням спектра випромінювання елементів наведено на рис. 8. При збільшенні ×3500 видно, що бентонітова зв'язка має гетерогенну будову, що зумовлено взаємодією поверхні зерна рудного мінералу з компонентами бентоніту, що добре ілюструється на карті заліза. Характерною є плавна зміна інтенсивності спектра Fe на межі «руда – зв'язка»: від максимального вмісту заліза у рудному зерні до мінімального у бентонітовому прошарку. Це підтверджує активну участь бентонітових компонентів у формуванні поверхневої структури окатиша під час сушіння та обпалення. Таким чином, лужні компоненти, які надходять до зони контакту «окатиш – колосник» разом із бентонітом, не є випадковими домішками, а є закономірним результатом високої початкової концентрації Na₂O та K₂O у складі бентоніту й їхньої безпосередньої участі в термохімічних перетвореннях.

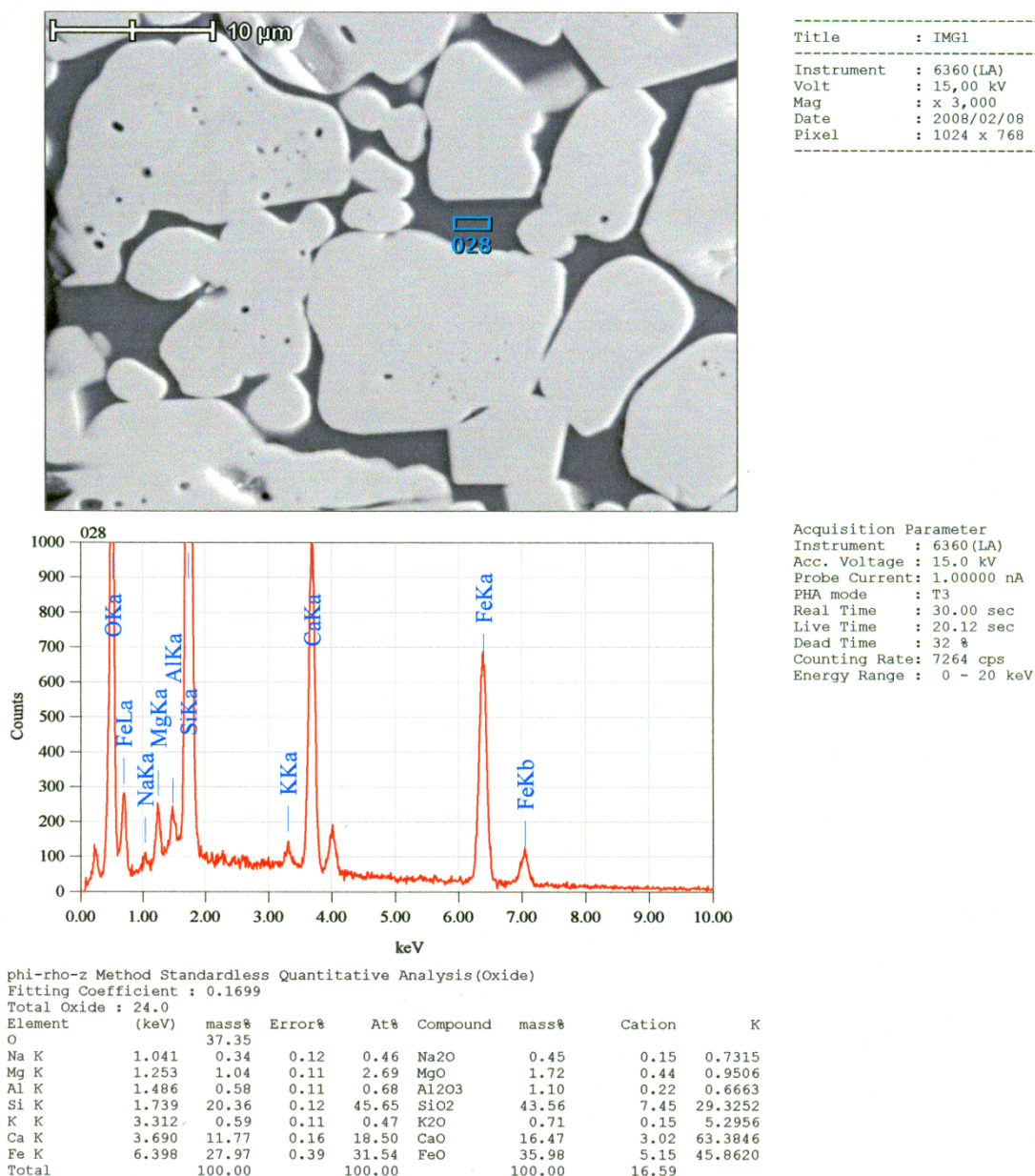
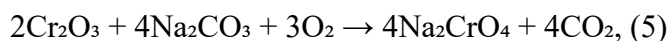


Рисунок 7. Мікроструктура зони окатиша по середині радіуса

В умовах високотемпературного обпалення окатишів (1000–1200 °C), коли поверхня колосника покрита окалиною зі значним вмістом Cr_2O_3 , лужні оксиди, що переходять у реакційно активні форми в результаті дегідроксиляції монтморилоніту, вступають у взаємодію з оксидами хрому та заліза. У таких системах $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})\text{--Cr--O}$ формуються термодинамічно стійкі хімічні сполуки — монохромати Na_2CrO_4 та K_2CrO_4 , які є солями хромової кислоти та здатні утворюватися в окиснювальному середовищі при температурах, характерних для зони високотемпературної дії обпалювальної машини [9,10]. Хромати лужних металів характеризуються низькою температурою плавлення ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \approx 790$ °C; $\text{K}_2\text{CrO}_4 \approx 968$ °C), високою розчинністю та схильністю до проникнення в дефекти оксидної плівки, що істотно знижує її адгезію до металевої основи [10].

Утворення цих фаз відбувається за реакціями типу:



де проміжною стадією є формування NaCrO_2 , здатного легко окиснюватися до Na_2CrO_4 у потоках гарячого газового середовища. Важливою є також участь ферратів натрію Na_2FeO_4 ,

які можуть виникати при взаємодії натрійвмісних компонентів із Fe_2O_3 окалини. Ферати діють як каталізatori окиснення $\text{Cr(III)} \rightarrow \text{Cr(VI)}$, прискорюючи формування хроматів і сприяючи локальному руйнуванню захисного шару окалини (Zheng et al, 2006).

Мікроструктурні дослідження колосникової сталі після взаємодії з натрійвмісним середовищем демонструють відповідність цьому механізму: внутрішній шар окалини збагачується Na і Cr, показує ознаки розрідження та часткового переплавлення, втрачає структурну цілісність, що проявляється у відшаровуванні (рис. 2). Ці явища повністю корелюють з властивостями хроматів — легкоплавких та високодисперсних фаз, здатних порушувати стабільність оксидного шару на поверхні хромонікелевих сталей.

Таким чином, ключовою ланкою у механізмі деградації є те, що бентоніт, збагачений Na_2O і K_2O , створює в поверхневій зоні окатиша лужно-силікатну реакційну оболонку, з якої лужні катіони активно дифундують до поверхні колосника. Саме їхня взаємодія з Cr_2O_3 окалини приводить до утворення легкоплавких хроматів, що провокують втрату адгезії оксидної плівки, відшаровування окалини та інтенсивну хімічну ерозію металу.

Результати експериментальних досліджень підтверджують фізико-хімічний механізм деградації: лужні оксиди, що походять із бентоніту у складі окатишів, взаємодіють з оксидами хрому окалини сталі 40X24H12СЛ з утворенням легкоплавких хроматів, які істотно знижують ерозійну стійкість колосникових решіток. Це свідчить про ключову роль мінералогічного складу бентонітової зв'язки у формуванні агресивних умов для роботи колосникового поля конвеєрних обпалювальних машин.

Висновки (Conclusions)

1. Основною причиною деградації колосників конвеєрних обпалювальних машин є хімічна ерозія в зоні високотемпературного обпалення, яка значно посилюється під впливом лужних оксидів (Na_2O , K_2O) із бентонітової зв'язки окатишів.

2. Мінералогічний склад бентоніту, зокрема наявність монтморилоніту типу Б та бейделіту, визначає активність лужних катіонів у процесах взаємодії з Cr_2O_3 окалини на поверхні колосників.

3. Під час високотемпературного обпалення (1000–1200 °C) лужні оксиди утворюють легкоплавкі хромати Na_2CrO_4 і K_2CrO_4 , що знижує адгезію оксидної плівки та провокує відшаровування окалини, прискорюючи хімічну ерозію металу.

4. Експериментальні дані підтверджують, що концентрація Na_2O та K_2O у бентонітовій зв'язці прямо корелює з інтенсивністю ерозійного процесу, що підкреслює ключову роль мінералогічного складу бентоніту та лужних компонентів у формуванні агресивних умов для роботи колосникового поля.

5. Оскільки вплив лужних компонентів є критичним для механічних властивостей окатишів і їх повне виключення з технологічного процесу виробництва окатишів неможливе, виникає необхідність пошуку альтернативних методів підвищення стійкості колосників.

6. Подальше вивчення проблеми підвищення стійкості колосників до хімічної ерозії рекомендується розглядати в напрямках пошуку і застосування інших складів жароміцних і жаростійких сплавів, нанесення захисних покриттів або модифікацію окалини, а також контроль температурно-газового режиму обпалювальної машини.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація – П.Г. та І.А.; формальний аналіз І. А. І; Методологія – П. Г та І. А.; візуалізація – П. Г. та С. Н ; оригінальна чернетка – П. Г. та Г. Є.; перегляд і редагування – С. Н. та Г. Є. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- ASM International. (1994). *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*. ASM International. ISBN 978-0871705037.
- Edström, H. (2008). High-temperature oxidation of Fe–Cr–Ni steels. *Materials Science and Technology*, 24(8), 969–976. <https://doi.org/10.1179/174328407X213917>
- Frye, K. (Ed.). (1983). *The Encyclopedia of Mineralogy*. New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-30720-6>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Lyakishev, N. P., & Gasik, M. I. (2020). *Chromium: Metallurgy and Environmental Issues*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38903-4>
- Panchenko, A. N., Ivanov, A. S., Khmel, V. V., & Gribenko, M. G. (2008). *Fakty, opredelyayushchie rabotosposobnost' kolosnikov obzhigovykh konveyernykh mashin*. Naukovyi visnyk KUEITU. Novi tekhnolohii, (1(19)), 241–245.
- Pokhyl, P. H., Kotsarenko, N. Ya., & Kuts, V. P. (2003). *Metallurhiya chavunu*. Kyiv: Lybid'.
- Strübel, G., & Zimmer, S. H. (1991). *Lexikon der Minerale* (2nd expanded and corrected ed.). Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag. ISBN 3-432-92722-3.
- Wei, Y., La, P., Zheng, Y., Zhan, F., Yu, H., Yang, P., Zhu, M., Bai, Z., & Gao, Y. (2025). Review of Molten Salt Corrosion in Stainless Steels and Superalloys. *Crystals*, 15(3), 237. <https://doi.org/10.3390/cryst15030237>
- Zheng, S., Zhang, Y., Li, Z., Oi, T., Li, H., & Xu, H. (2006). Green metallurgical processing of chromite. *Hydrometallurgy*, 82(3–4), 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.014>