

УДК 669.14.018.8:669.046:541.1

*Ю.С. Пройдак ^а, А.П. Горобець ^а, О.В. Жаданос ^а, Р.В. Білявський ^б***ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПЕРЕПЛАВНИХ ПІРОМЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСАХ**^а Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна^б Акціонерне товариство «Дніпровський стрілочний завод», м. Дніпро, Україна

Виконано аналітичне дослідження джерел безповоротних втрат хрому, молібдену, вольфраму в процесі переплаву легованих сталей в електродуговій печі. Наведено результати досліджень формування оксидних фаз хромшпінеліду змінного складу $(\text{Fe,Cr})\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ і Cr_2O_3 під час нагрівання металозавалки. З урахуванням вибору двох стандартних станів (чистий елемент і 1% нескінченно розведений розчин) визначено значення ізобарного потенціалу Гіббса реакцій окиснення хрому в металічному розплаві розчиненим киснем. При переплаві сталей, які містять елементи VI групи Періодичної системи (Cr, Mo, W), утворюються оксиди MeO_3 з кислотними властивостями, що визначає їхню взаємодію з високоосновними шлаками з формуванням у шлаку сполуки $n\text{CaO}\cdot\text{CrO}_3\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$. З метою зниження втрат зазначених елементів рекомендовано виключити попереднє нагрівання до 500–800°C дрібнофракційної шихти та проводити переплав металу під шлаком зниженої основності.

Ключові слова: сталь, легуючі елементи, нагрівання, термодинаміка, оксиди, фазовий склад, шлакоутворення.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-167-4-159-165

Вступ

Окиснювальне рафінування є важливою складовою традиційних і сучасних технологій виробництва сталі, що забезпечує регулювання концентрації легуючих елементів і домішок у металевому розплаві. Водночас перебіг окиснювальних процесів може супроводжуватися значними безповоротними втратами цінних легуючих компонентів. Особливого значення ця проблема набуває під час виробництва та переплаву високолегованих сталей, що містять Cr, Mo та W – елементи VI групи Періодичної системи, які визначають комплекс експлуатаційних властивостей спеціальних сталей. Відомо, що втрати легуючих елементів можуть відбуватися не лише

під час окиснення металевого розплаву, а й на стадіях нагрівання та плавлення металеві шихти. Утворення оксидних фаз на поверхні металу, їх подальша взаємодія з компонентами шлаку та видалення оксидних продуктів разом зі шлаковою фазою зумовлюють зниження ступеня засвоєння легуючих елементів і збільшення витрат легуючих матеріалів. Під час виробництва сталей, легованих хромом, значна частина хрому може безповоротно втрачатися внаслідок його окиснення та переходу утворених оксидних сполук хрому до шлакової фази. Особливо значні втрати хрому припадають на стадію плавлення в електродуговій печі, а їх величина суттєво залежить від умов окиснення металевого розплаву, а також складу

© Ю.С. Пройдак, А.П. Горобець, О.В. Жаданос, Р.В. Білявський, 2026



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Physicochemical principles for reducing alloying element losses in pyrometallurgical remelting processes

шлаку [1].

Проблема збереження легуючих елементів набуває особливої актуальності у зв'язку з високою вартістю відповідних феросплавів і обмеженою доступністю високоякісного легованого металобрухту. Для виробництва сталей спеціального призначення використання вторинної сировини металургійного виробництва, що містить цінні легуючі елементи, є одним із перспективних напрямів ресурсозбереження. Однак ефективність її використання значною мірою визначається величиною втрат легуючих компонентів під час підготовки шихти, її нагрівання та подальшого переплаву. З фізико-хімічної точки зору, величина втрат Cr, Mo та W визначається сукупністю термодинамічних і кінетичних чинників. До них належать спорідненість легуючих елементів до кисню, склад і структура оксидних фаз, швидкість формування та росту оксидних фаз під час нагрівання, активність компонентів у металевому розплаві, а також характер взаємодії продуктів окиснення з компонентами шлаку. Особливу роль при цьому відіграє основність шлаку, яка може визначати стабільність оксидних сполук легуючих елементів і сприяти їх переходу до шлакової фази.

Слід зазначити, що дослідженням окиснення легуючих елементів в сталях та закономірностей формування оксидних фаз присвячено значну кількість робіт. Автори [2] досліджували окиснення хромвмісних сталей за високих температур і показали, що руйнування хромвмісного оксидного шару може супроводжуватися розвитком внутрішнього окиснення металевої матриці. У роботі [3] на основі поєднання експериментальних досліджень і термодинамічного моделювання проаналізовано закономірності внутрішнього окиснення хромомарганцевих сталей, що підтверджує важливу роль складу металевої матриці у формуванні оксидних фаз. Термодинамічні закономірності існування оксидних фаз у багатокомпонентних системах Fe–Cr–Ni–O досліджувалися у роботі [4]. Отримані результати мають важливе значення для оцінювання стабільності оксидних фаз у хромвмісних металевих системах за високих температур. Водночас зазначені дослідження переважно стосуються закономірностей високотемпературного окиснення та фазових рівноваг, тоді як питання безповоротних втрат легуючих елементів саме під час переплаву вторинної металевої сировини потребує додаткового розгляду.

Окремим напрямом сучасних досліджень є зниження втрат хрому під час електроплавки сталі.

Робота [1] присвячена аналізу термодинамічних передумов мінімізації втрат хрому в електродуговій печі. Автори показали, що склад шлаку, його основність і умови окиснення істотно впливають на розподіл хрому між металевою і шлаковою фазами. У роботі [5] досліджено вплив молібдену на високотемпературне окиснення сталей системи Cr–Ni–Mo. Підтверджено, що вміст молібдену істотно впливає на кінетику окиснення та формування оксидного шару. Особливостям утворення сполук шестивалентного хрому під час плавлення корозійностійкої сталі та аналізу чинників, що впливають на їх утворення, присвячене дослідження [6].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить, що закономірності високотемпературного окиснення сплавів, що містять хром, термодинаміка оксидних фаз і розподіл хрому між металом та шлаком отримали значне висвітлення в науковій літературі. Водночас недостатньо систематизованими залишаються фізико-хімічні передумови безповоротних втрат легуючих елементів під час комплексного процесу переплаву легованої металевої сировини, який включає попереднє нагрівання шихти, утворення оксидних фаз на поверхні металу, окиснення елементів у металевому розплаві та їх взаємодію з компонентами шлаку. Особливої уваги потребує комплексний розгляд поведінки елементів VI групи Періодичної системи Cr, Mo та W з урахуванням як їх термодинамічної спорідненості до кисню, так і можливості зв'язування продуктів окиснення у шлаковій фазі.

У зв'язку з цим встановлення фізико-хімічних передумов втрат легуючих елементів під час переплаву легованих сталей є важливим завданням для розробки ресурсозберігальних технологій електроплавки. Метою роботи є аналітичне дослідження фізико-хімічних чинників, що визначають втрати хрому, молібдену та вольфраму під час нагрівання і переплаву легованих сталей, з урахуванням процесів утворення оксидних фаз, термодинаміки окиснення хрому та взаємодії продуктів окиснення з компонентами шлаку.

Методика досліджень

Дослідження фізико-хімічних передумов втрат легуючих елементів під час переплаву легованих сталей виконували на основі аналізу термодинамічних і кінетичних закономірностей окиснення металевої фази та розплаву, а також взаємодії продуктів окиснення з компонентами шлакової фази. Термодинамічну спорідненість Cr, Mo, W і Fe до кисню оцінювали за значеннями

стандартної зміни енергії Гіббса реакцій утворення відповідних оксидів у температурному інтервалі, характерному для нагрівання та плавлення металевих шихти. Порівняння термодинамічної стабільності оксидів дозволило оцінити відносну схильність елементів, що досліджуються, до окиснення.

Особливості формування оксидних фаз під час високотемпературного нагрівання металевих шихти аналізували з урахуванням закономірностей дифузійного окиснення металів і сплавів. При цьому враховували вплив складу металевих матриць на фазовий склад оксидного шару, характер дефектності оксидної решітки та кінетичні закономірності росту окалини. Для оцінювання впливу температури та складу сплаву на інтенсивність окиснення використовували опубліковані експериментальні дані щодо кінетики окиснення хромистих і хромонікелевих сплавів. Окиснення елементів у металевому розплаві розглядали як багатостадійний процес, що включає перенесення окиснювача до поверхні металу, формування оксидної плівки та подальше масоперенесення кисню в об'єм розплаву. Термодинамічний аналіз окиснення хрому в металевому розплаві проводили з використанням двох стандартних станів: чистого компонента та 1%-ного нескінченно розведеного розчину. На цій основі визначали зміну ізобарного потенціалу реакцій окиснення розчиненого хрому розчиненим киснем з утворенням оксиду хрому.

Вплив шлакової фази на безповоротні втрати легуючих елементів аналізували з урахуванням кислотно-основних властивостей оксидів Cr, Mo і W у високих ступенях окиснення та їхньої здатності взаємодіяти з основними компонентами шлаку. Особливу увагу приділяли впливу основності шлаку на стабілізацію продуктів окиснення хрому та їх перехід до шлакової фази. На основі узагальнення термодинамічних розрахунків, закономірностей високотемпературного окиснення та даних щодо фазоутворення в системах метал-оксид-шлак визначали основні джерела безповоротних втрат Cr, Mo і W під час нагріван-

ня та переплаву легованої металеві сировини. Такий підхід дозволив сформулювати технологічні рекомендації щодо зниження втрат легуючих елементів.

Результати та обговорення

Дослідження реакцій окиснення елементів зазвичай базується на термодинаміці утворення оксидів з використанням як базову концепцію зміни потенціалу Гіббса ($\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$). В табл. 1 наведено величини енергії Гіббса для стандартних умов (елемент) утворення окремих оксидів по даним [7].

З даних табл. 1 випливає, що хром найбільшою мірою характеризується хімічною спорідненістю до кисню. Поряд з основним джерелом втрат легуючих елементів в результаті утворення оксидів під час окиснення металевих розплавів значний внесок в загальний баланс втрат вносять хімічні реакції високотемпературного нагрівання вихідної металозавалки. Останні технології (процес Конкаст, шахтні печі Фукс, двокорпусні електродугові печі) в даний час впроваджуються в сталеплавильне виробництво з вирішенням цільового завдання економії електроенергії і підвищення техніко-економічних показників виробництва.

Основи теорії окиснення елементів при впливі високих температур розроблені К. Вагнером (1933 р.) і базуються на іонно-електронному механізмі дифузії реагентів у оксидній фазі, утвореній на поверхні металу [2,3].

У відповідності до основної теорії окиснення матеріалів, дифузія реагентів крізь окалину здійснюється шляхом проходження іонів одночасно з електронами крізь іонні та електронні дефекти решітки. У більшості оксидів решітки з'являються виключно в катіонній підрешітці (FeO , Fe_3O_4 , CoO , NiO , Cu_2O тощо). Дефекти аніонної підрешітки з'являються переважно в оксидах тугоплавких металів (ZrO_2 , NbO_2 , WO_3).

У випадках, коли окалину утворюють оксиди з дефектною катіонною решіткою, процес окиснення йде при дифузії іонів і електронів металу з боку основи, тоді як при дефектній аніонній

Таблиця 1

Стандартна вільна енергія утворення окремих оксидів

Реакція	$-\Delta G_T^0$, кДж	
	1800 К	1900 К
$1/3\text{Mo}_T + 1/2\text{O}_2 = 1/3(\text{MoO}_3)_T$	126,5	124,2
$1/3\text{W}_T + 1/2\text{O}_2 = 1/3(\text{WO}_3)_T$	135,4	129,0
$\text{Fe}_P + 1/2\text{O}_2 = (\text{FeO})_P$	150,2	145,6
$2/3\text{Cr}_P + 1/2\text{O}_2 = 1/3(\text{Cr}_2\text{O}_3)_T$	223,5	210,7

решітці окиснення відбувається в умовах дифузії іонів і електронів окиснювача в бік матриці. Швидкість дифузії реагентів в окаліні, яка визначає швидкість процесу окиснення, прямо пропорційна концентрації дефектів, крізь які здійснюється масоперенос. Склад металічної матриці зумовлює формування фазового складу окаліни на поверхні металу (рис. 1).

Згідно з класичними уявленнями про високотемпературне окиснення у системі Fe–Cr–O [8], на поверхні низьколегованої сталі первинно утворюється в'юститна фаза. За вмісту хрому в сталях до 12% фазовий склад окаліни переважно представлений хромшпінелідом змінного складу $\text{Fe}(\text{FeCr}_{2-x})\text{O}_4$. При вмісті хрому більше 12% на поверхні формується оксидний шар на основі Cr_2O_3 . Водночас, як показано у роботі [2], руйнування цього захисного хромовмісного шару за високих температур може призводити до втрати його захисних властивостей і розвитку внутрішнього окиснення металеві матриці. Для сталей системи Fe–Mn–Cr закономірності внутрішнього окиснення, склад утворених оксидних фаз і кінетика їх формування залежать від складу сплаву та кисневого потенціалу. Ці закономірності

детально досліджено із застосуванням поєднання термодинамічного моделювання та експериментальних методів у роботі [3].

Швидкість процесу окиснення визначається приростом маси окаліни, що залежить від кількості окиснювача по відношенню до поверхні металу, температури нагрівання металу, і може бути виражено наступною залежністю:

$$(\Delta m/q)^n = kt + C, \quad (1)$$

де $\Delta m/q$ – збільшення маси окаліни на одиницю поверхні;

Показник ступеня n у рівнянні (1) характеризує кінетичні закономірності окиснення металу:

- $n=1$ – лінійна залежність;
- $n=2$ – параболічна залежність;
- $n=3$ – логарифмічна залежність.

В табл. 2 наведено температурні параметри і характеристики кінетики окиснення марочних сталей.

Хімічні складі сплавів:

сплав В 398: Fe 1,43; Al 0,19; Ti 0,49; Mo 0,8; W 13,45; Cr 24,3; Ni – інше;

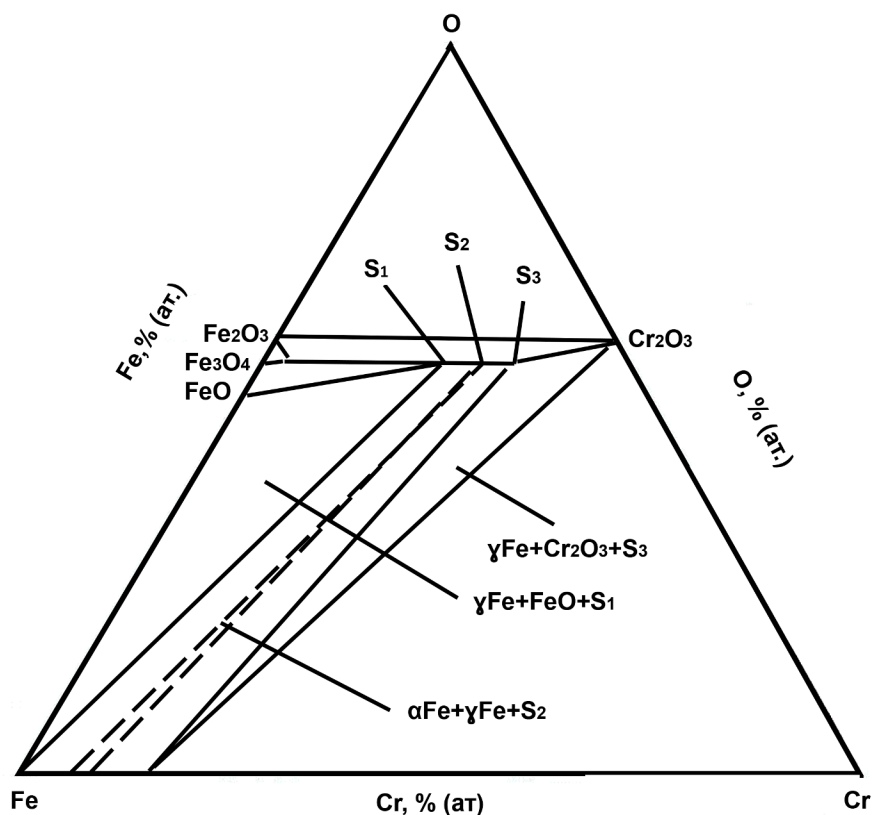


Рис. 1. Потрійна діаграма фазового стану системи Fe–Cr–O при температурі 1300°C; S_1 , S_2 , S_3 – окремі модифікації шпінелі $\text{Fe}(\text{FeCr}_{2-x})\text{O}_4$ з різним вмістом тривалентного заліза. Адаптовано за даними [8]

ЕИ 894: Fe 9,74; Al 3,11; Mn 0,45; Si 1,02; Ti 1,12; W 5,72; Cr 22,4; Ni – інше;

ХН75МБТЮ: Fe 2,09; Al 0,62; Si 0,52; Ti 0,59; Nb 1,02; Mo 2,07; Cr 20,55; Ni – інше;

ХН38БТ: Ni 37,93; Al 0,23; Si 0,42; Ti 1,01; W 2,99; Cr 21,08; Ni – інше;

1Х25Н25ТР: Ni 24,6; Al 0,36; Ti 1,7; Mn 1,3; Si 0,47; Cr 25,4; Fe – інше.

Як впливає з даних табл. 2, наявність у складі сталей 20–25% хрому визначає кінетику окиснення металів в результаті утворення щільного шару окалини з фазовим складом Cr_2O_3 , що призводить до додаткових втрат хрому в процесі нагрівання і початку плавлення металозавалки під час переплаву легованих сталей.

Окиснення рідких металів в загальному вигляді можна описати процесом, який протікає в декілька стадій [1,5]:

– перенесення молекул окисника до поверхні розплаву;

– формування окисної плівки;

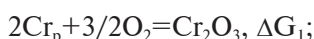
– перерозподіл кисню з поверхні металу в об'єм.

Автори [1] дослідили умови формування окисної плівки і кінетику окиснення бінарних сплавів. В практиці сталеплавильного виробництва особливого значення набувають дослідження взаємодії розчиненого кисню у багатокомпонентних розплавах. З урахуванням того, що кисень при температурах сталеплавильного процесу знаходиться в газовій фазі, для визначення окисного потенціалу розчиненого кисню як стандартний стан обирають ідеальний нескінченно розведений розчин 1% концентрації [9].

Для умов рівноваги реакції (2)



зміна ізобарного потенціалу Гіббса (ΔG^0) визначиться шляхом алгебраїчного підсумовування реакцій:



У результаті отримуємо:



Наведені значення енергії Гіббса свідчать про значний енергетичний потенціал реакції окиснення хрому розчиненим киснем з утворенням Cr_2O_3 . Крім вказаного оксиду хрому під час виплавки металу під високоосновним шлаком

($B = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2} > 2$) можливо утворення сполуки

$n\text{CaO} \cdot \text{CrO}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (рис. 2) [10]. Слід зазначити, що аналогічний підхід до аналізу фазового складу шлаків також використовувався в роботі [6].

Необхідність контролю основності шлаку обумовлена тим, що метали VI групи періодичної системи (Cr, Mo, W) у вищих ступенях окиснення утворюють оксиди MeO_3 , які виявляють кислотні властивості. З огляду на це одним із ефективних напрямів зниження втрат зазначених елементів є переплав легованих сталей під шлаком зниженої основності.

Висновки

1. Виконано аналітичне дослідження джерел безповоротних втрат хрому, молібдену, вольфраму в процесі переплаву легованих сталей в електродугової печі.

2. Наведено результати досліджень формування оксидних фаз хромшпінеліду змінного складу $(\text{Fe}, \text{Cr}) \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ і Cr_2O_3 під час нагрівання металозавалки.

3. З урахуванням вибору двох стандартних станів (чистий елемент і 1% нескінченно розведений розчин) визначено значення ізобарного потенціалу Гіббса реакцій окиснення хрому в металічному розплаві розчиненим киснем.

4. При переплаві сталей, які містять елементи VI групи Періодичної системи (Cr, Mo, W),

Таблиця 2

Вплив температури на хід окиснення хромистих і хромонікелевих сплавів на повітрі

Температура, °С	Показник ступеня n у рівнянні (1)				
	В 398	ЕИ894	ХН75МБТЮ	ХН28БТ	1Х25Н25ТР
900	3,68	логарифмічний	3,33	Логарифмічний	5,61
1000	2,05	2,44	2,00	2,43	2,81
1100	2,00	2,14	1,92	2,06	2,44
1200	1,86	2,14	1,67	1,84	2,44

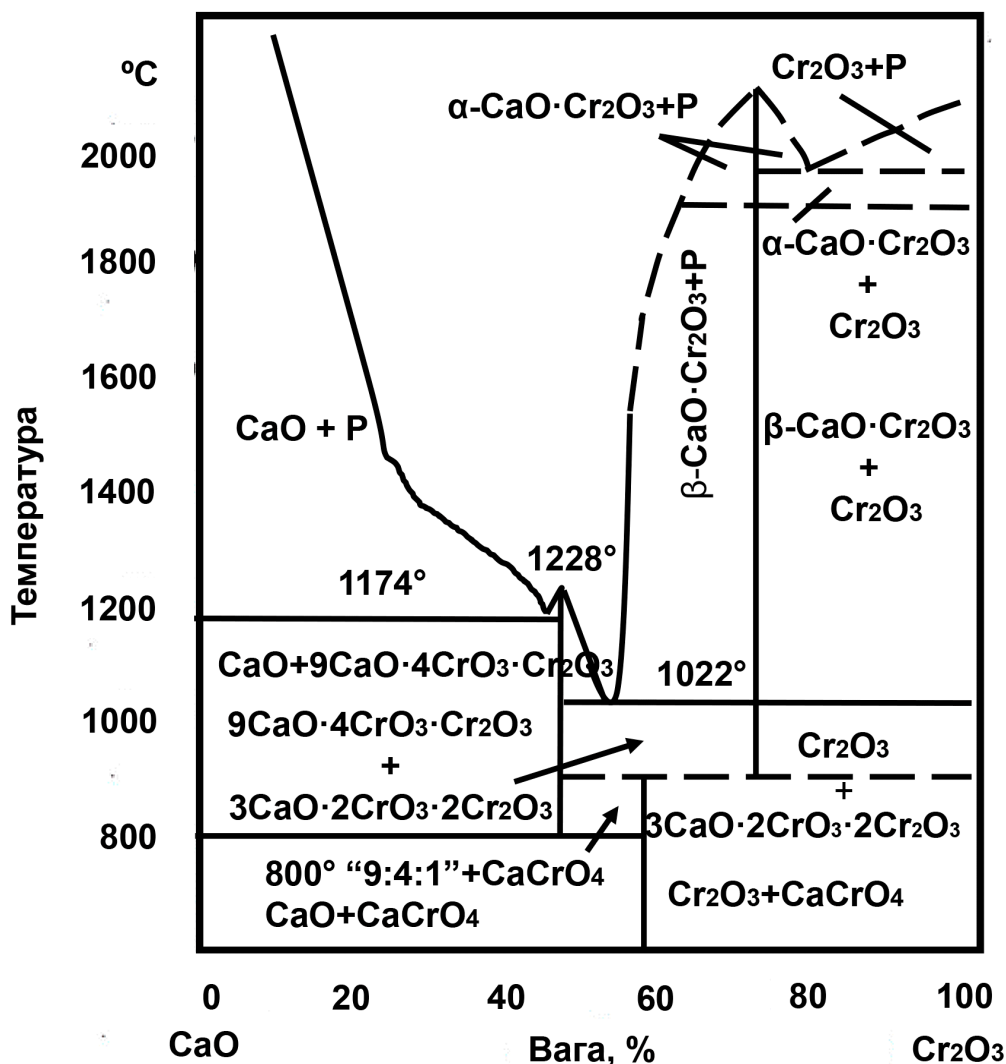


Рис. 2. Можлива рівновага фаз у псевдобінарній системі $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$. Адаптовано за даними [10]

утворюються оксиди MeO_3 з кислотними властивостями, що визначає їхню взаємодію з високоосновними шлаками з формуванням у шлаку сполуки $n\text{CaO} \cdot \text{CrO}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$.

5. З метою зниження втрат зазначених елементів рекомендовано виключити попереднє нагрівання дрібнофракційної шихти до $500-800^\circ\text{C}$ та проводити переплав металу під шлаком зниженої основності.

Подяка

Публікація підготовлена за результатами проєкту 2023.04/0037 «Розробка технології переплаву брухту військової техніки з метою збереження дороговартісних легуючих елементів при виплавці сталей спеціального функціонального призначення», профінансованим Національним фондом досліджень України за кошти державного

бюджету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bajzeli A., Burja J. Thermodynamic guidelines for minimizing chromium losses in electric arc furnace steelmaking // *Metals*. – 2025. – Vol.15. – No. 10. – Art. No. 1129.
2. Oxidation after breakdown of the chromium-rich scale on stainless steels at high temperature: internal oxidation / Jonsson T., Karlsson S., Hooshyar H., Sattari M., Liske J., Svensson J.-E., et al. // *Oxid. Met.* – 2016. – Vol.85. – P.509-536.
3. Mao W., Ma Y., Sloof W.G. Internal oxidation of Fe-Mn-Cr steels, simulations and experiments // *Oxid. Met.* – 2018. – Vol.90. – P.237-253.

4. Kjellqvist L., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic modelling of the Cr–Fe–Ni–O system // *Calphad*. – 2008. – Vol.32. – No. 3. – P.577-592.

5. Effect of Mo on the high-temperature oxidation behavior of Cr–Ni–Mo hot-work die steels / Zhang C., Zhang Y., Hu J., Wang Z., Xue J., Yu H., et al. // *Corros. Sci.* – 2023. – Vol.224. – Art. No. 111487.

6. Li W., Xue X. Emission reduction research and formation of hexavalent chromium in stainless steel smelting: cooling rate and boron oxide addition effects // *Process Saf. Environ. Prot.* – 2019. – Vol.122. – P.131-143.

7. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. Thermochemistry for steelmaking. Vol.1-2. – Addison-Wesley, 1960-1963.

8. Мровец С., Вебер Т. Сучасні жаростійкі матеріали. – М.: Металургія, 1986. – 260 с.

9. Turkdogan E.T. Physical chemistry of high temperature technology. – New York: Academic Press Inc., 1980. – 447 p.

10. Бережний А.С. Багатокомпонентні системи окислів. – Київ: Наукова думка, 1970. – 544 с.

Надійшла до редакції 27.04.2026

Надійшла після виправлення 16.07.2026

Прийнята до публікації 23.07.2026

Опублікована 10.08.2026

PHYSICOCHEMICAL PRINCIPLES FOR REDUCING ALLOYING ELEMENT LOSSES IN PYROMETALLURGICAL REMELTING PROCESSES

Yu.S. Proidak ^{a,*}, A.P. Gorobets ^a, O.V. Zhadanos ^a, R.V. Biliavskiy ^b

^a Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

^b Joint Stock Company «Dnipro Switch Plant», Dnipro, Ukraine

* e-mail: y.s.proidak@ust.edu.ua

The article presents an analytical study of irreversible losses of chromium, molybdenum, and tungsten during remelting of alloy steels in an electric arc furnace. The formation of oxide phases, including chromium spinel of variable composition (Fe,Cr)Cr₂O₃ and Cr₂O₃, during heating of steel charge materials is analyzed. Based on the use of two standard states (pure element and 1% infinitely dilute solution), the Gibbs free energy values of chromium oxidation reactions in a metallic melt with dissolved oxygen were determined. It is shown that during the remelting of steels containing Group VI elements of the Periodic Table (Cr, Mo, W), acidic oxides MeO₃ are formed, which interact with highly basic slags, leading to the formation of compounds of the type nCaO·Cr₂O₃·mCr₂O₃ in the slag phase. To reduce the losses of alloying elements, it is recommended to eliminate preheating of fine fraction scrap to 500–800°C and to conduct remelting under a slag of reduced basicity.

Keywords: steel; alloying elements; heating; thermodynamics; oxides; phase composition; slag formation.

REFERENCES

1. Bajzelj A, Burja J. Thermodynamic guidelines for minimizing chromium losses in electric arc furnace steelmaking. *Metals*. 2025; 15: 1129. doi: 10.3390/met15101129.

2. Jonsson T, Karlsson S, Hooshyar H, Sattari M, Liske J, Svensson JE, et al. Oxidation after breakdown of the chromium-rich scale on stainless steels at high temperature: internal oxidation. *Oxid Met*. 2016; 85: 509-536. doi: 10.1007/s11085-016-9610-7.

3. Mao W, Ma Y, Sloof WG. Internal oxidation of Fe–Mn–Cr steels, simulations and experiments. *Oxid Met*. 2018; 90: 237-253. doi: 10.1007/s11085-018-9836-7.

4. Kjellqvist L, Selleby M, Sundman B. Thermodynamic modelling of the Cr–Fe–Ni–O system. *Calphad*. 2008; 32: 577-592. doi: 10.1016/j.calphad.2008.04.005.

5. Zhang C, Zhang Y, Hu J, Wang Z, Xue J, Yu H, et al. Effect of Mo on the high-temperature oxidation behavior of Cr–Ni–Mo hot-work die steels. *Corros Sci*. 2023; 224: 111487. doi: 10.1016/j.corsci.2023.111487.

6. Li W, Xue X. Emission reduction research and formation of hexavalent chromium in stainless steel smelting: cooling rate and boron oxide addition effects. *Process Saf Environ Prot*. 2019; 122: 131-143. doi: 10.1016/j.psep.2018.11.025.

7. Elliott JF, Gleiser M, Ramakrishna V. *Thermochemistry for steelmaking*. Vol 1-2. Addison-Wesley Publishing Company; 1960-1963.

8. Mrovec S, Weber T. *Sovremennye zharostoikie materialy* [Modern heat-resistant materials]. Moscow: Metallurgiya; 1986. 260 p.

9. Turkdogan ET. *Physical chemistry of high temperature technology*. New York: Academic Press Inc.; 1980. 447 p.

10. Berezhnoy AS. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov* [Multicomponent oxide systems]. Kyiv: Naukova Dumka; 1970. 544 p.