

УДК 621.745.55

Ямшинський М. М., Федоров Г. Є.

**ОКАЛИНОСТІЙКІСТЬ ХРОМОАЛЮМІНІЄВИХ СТАЛЕЙ ЗАЛЕЖНО  
ВІД ВМІСТУ ХРОМУ ТА АЛЮМІНІЮ**

Властивості низьковуглецевих залізохромистих сплавів з алюмінієм вивчено достатньо глибоко [1, 2]. На жаль, середньовуглецеві сплави приблизно такого ж хімічного складу, які мають набагато кращі технологічні властивості, обмежено використовують в техніці високих температур як матеріал для виробів, що працюють в умовах складних газових середовищ. Обмежене їх використання пояснюється відсутністю в технічній літературі даних щодо їх окалиностійкості, термостійкості та ростостійкості.

Ливарні середньовуглецеві хромоалюмінієві сталі відносять до нових матеріалів для виготовлення литих деталей, які працюють в умовах високих температур та агресивних середовищ. Технологічні характеристики цих сталей (ливарні та механічні властивості, оброблюваність, зварюваність) вивчені досить глибоко, а дані щодо спеціальних, тобто таких, що проявляють себе під час експлуатації виробів (окалиностійкість, термостійкість, ростостійкість) практично відсутні. Знання цих характеристик дасть можливість обґрунтовано вибирати відповідні галузі використання цих матеріалів як з урахуванням умов експлуатації, так і з урахуванням їх ливарних властивостей на підставі визначеного співвідношення вмісту в них основних компонентів – хрому та алюмінію.

У цій роботі зроблена спроба доповнити відомості щодо основної експлуатаційної характеристики – окалиностійкості – сталей з високим вмістом хрому та алюмінію в різних газових середовищах: в атмосфері перегрітого повітря, повітря з водяною парою та з вуглекислим газом.

Основним легувальним елементом хромистих жаростійких сталей є хром. Дослідженнями окалиностійкості середньовуглецевих хромистих сплавів [3, 4] підтверджено доцільність додаткового їх легування алюмінієм, хоча ці сталі є найекономічнішими й надійно працюють до температур 1100 °С, але слід зазначити, що за вмісту в середньовуглецевих сталях 17...20% хрому окалиностійкість їх порівняно невисока, оскільки значна частина хрому зв'язана в карбіди, а ферит збіднений хромом. Захисна плівка  $Cr_2O_3$ , яка утворюється на поверхні металу, не суцільна, легко відокремлюється від виробу й створює умови для нового його окиснення.

Із збільшенням вмісту хрому понад 20% на поверхні зразків утворюється тонкий суцільний шар окалини із оксидів  $Cr_2O_3$ , який міцно утримується на виробі. Підвищення в сталях вмісту хрому понад 30% суттєвого впливу не справляє на характер окиснення металу та його окалиностійкість. Характер окиснення залишається незмінним, а окалиностійкість – сталою.

Отже оптимальним вмістом хрому в жаростійких хромистих сталях для роботи в умовах високих температур слід вважати 23–30%.

Алюміній є легувальним елементом, який здатний забезпечувати вищу окалиностійкість хромистим сталям, тобто надає металу властивості протистояти окисненню в різних газових середовищах за температур до 1250 °С [5].

Спільна дія хрому та алюмінію полягає, насамперед, у тому, що вони змінюють склад, структуру та властивості окалини, яка утворюється на поверхні виробу, а отже, і швидкість окиснення.

Проте до цих пір не встановлено оптимального співвідношення цих елементів, за якого утворювалася б стабільна, міцна та щільна захисна плівка й забезпечувала б максимальну окалиностійкість виробів. Така задача сьогодні є досить актуальною.

У цій роботі зроблена спроба наблизитися до вирішення цього питання. Спочатку досліджено окалиностійкість середньовуглецевих (0,30–0,35% С) жаростійких сталей з різним вмістом хрому та обмеженими добавками алюмінію.

Випробовуванню, тут і далі, піддавали зразки діаметром 10 мм і довжиною 20 мм у трубчастій печі за температури 1250 °С протягом 100 год.

Результати досліджень окалиностійкості цих сталей в атмосфері перегрітого повітря показано на рис. 1. Установлено, що із збільшенням вмісту алюмінію підвищується окалиностійкість усіх досліджених хромистих сталей. Для забезпечення високої окалиностійкості (втрати маси 2–4 г/м<sup>2</sup>·год) в умовах перегрітого повітря необхідно витримувати вміст хрому в сталях на рівні 22–27% та алюмінію – в межах 2–4%.

Для визначення оптимального співвідношення хрому та алюмінію вивчено окалиностійкість середньовуглецевих сталей (0,28–0,33% С) з більшим діапазоном концентрацій цих елементів – хрому від 17,3 до 37,0% та алюмінію – до 7,4%.

Окалиностійкість визначали в атмосфері перегрітого повітря. Аналізом одержаних результатів установлено, що підвищення вмісту алюмінію суттєво покращує окалиностійкість (зменшує приріст маси) усіх досліджених сталей (рис. 2). Для забезпечення високої окалиностійкості (збільшення маси на 2–4 мг/см<sup>2</sup> за 100 год) сталь має вміщувати 25–35% хрому та 2–3% алюмінію, що добре узгоджується з положеннями робіт [6, 7] щодо окалиностійкості.

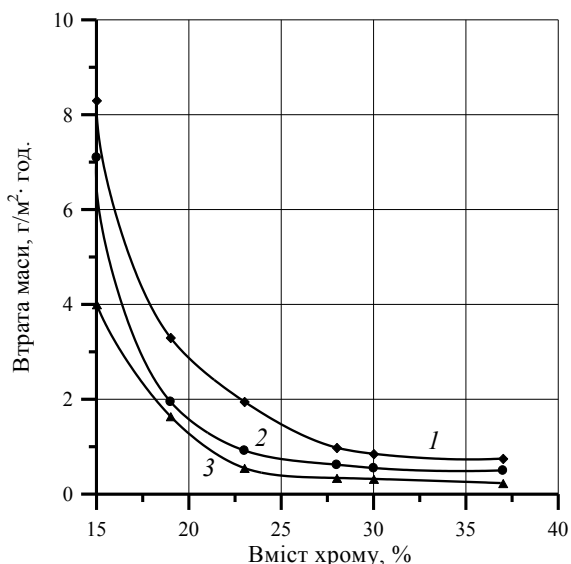


Рис. 1. Окалиностійкість хромистих сталей в атмосфері перегрітого повітря:

1 – 2,5% Al; 2 – 5,0% Al; 3 – 6,8% Al

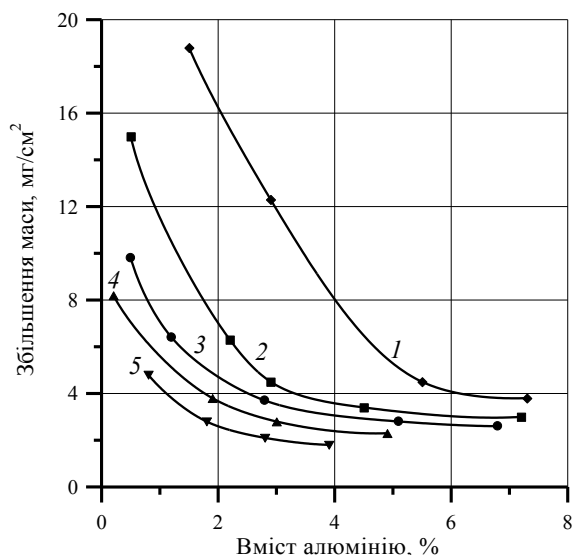


Рис. 2. Окалиностійкість жаростійких сталей з різним вмістом хрому та алюмінію:

1 – 17,3% Cr; 2 – 18,5% Cr; 3 – 23,0% Cr; 4 – 25,5% Cr; 5 – 37,0% Cr;

Подальше підвищення алюмінію в цих сталях не сприяє помітному покращанню їх окалиностійкості в наведених умовах і погіршує ливарні та механічні властивості.

Рентгенографічним і мікрохімічним аналізами оксидів, які утворювалися під час випробовування на поверхні виробу, виготовленого із сталі, легованої 17,3% Cr та 2–4% алюмінію, установлено, що така сталь не може бути використана для виготовлення литих деталей, які працюють за температур вищих 1000 °С, оскільки окалина окрім оксидів Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вміщує значну кількість заліза в складі шпінелі FeO·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Захисні властивості такої плівки значно гірші, ніж плівки на основі α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> або шпінелі CrO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Дослідженнями оксидів, утворених на поверхні виробів із сталей з вмістом 25–30% Cr та 2–3% Al, установлено, що захисна плівка складається на 95–97% з оксидів α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

На внутрішній поверхні плівки, тобто на межі розділу «метал-оксид», виявлено підвищений вміст оксиду  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та до 1,0–1,5% оксидів заліза (рис. 3).

Ці дані добре узгоджуються з результатами досліджень, які наведено в роботах [3, 8]. У роботі [9] установлено, що під час окиснення виробу із сплаву з 25% Cr, 5% Al та 0,1% C на його поверхні утворюється окалина, яка складається на 98,7% з  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Така оксидна плівка має високі захисні властивості через низьку іонну провідність  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , а тому виробу тривалий час можуть працювати за температур до 1250 °С.

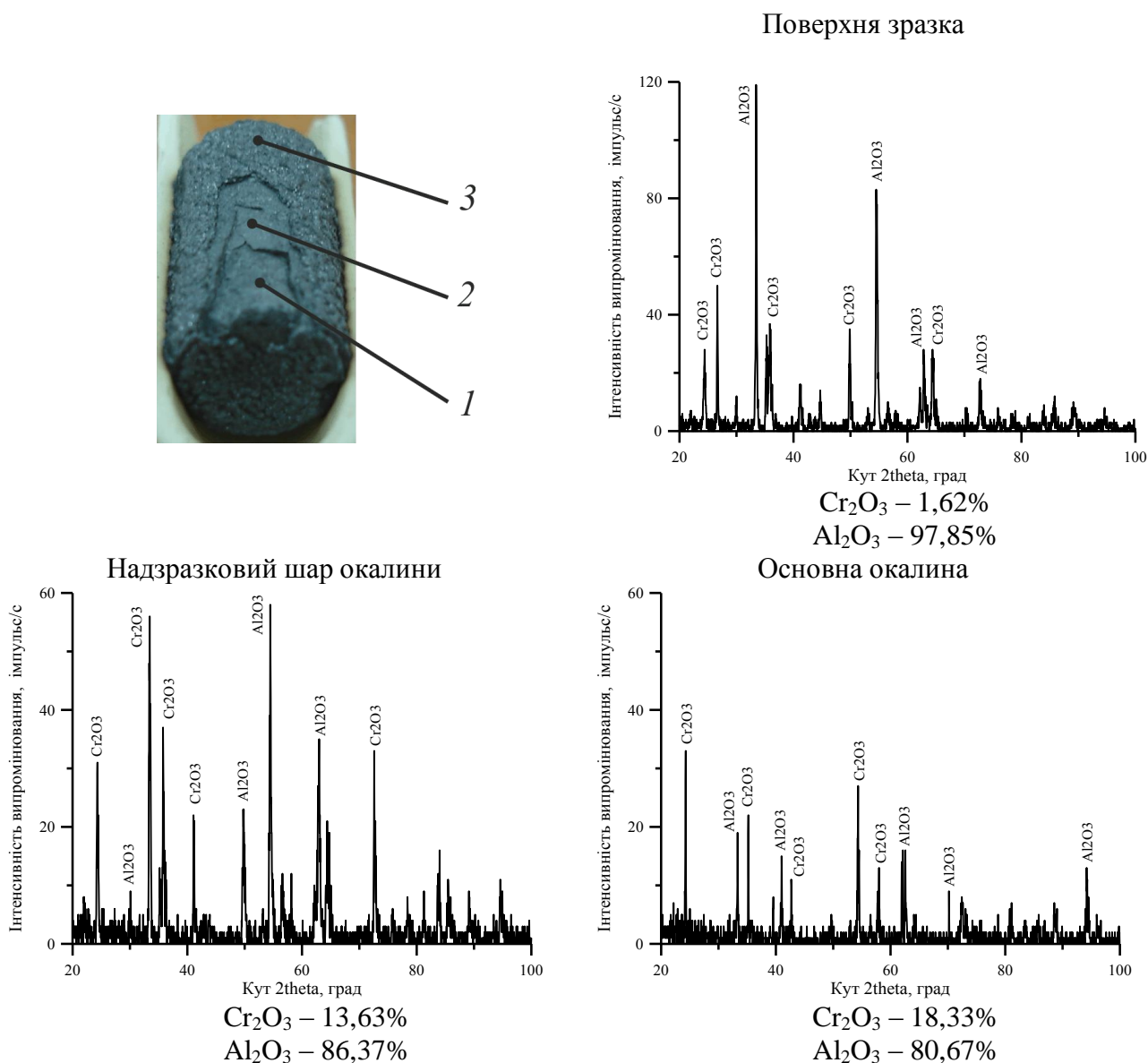


Рис. 3. Склад оксидів хромоалюмінієвої сталі залежно від розташування від поверхні зразка:

1 – поверхня зразка; 2 – надзразковий шар окалини; 3 – основна окалина

На рис. 4 показано зміну втрат маси зразків залежно від вмісту хрому та алюмінію за різних температур. Підвищення кількості алюмінію від 2 до 5% покращує окалиностійкість усіх сталей внаслідок утворення оксидної плівки, збагаченої оксидами алюмінію. Для зберігання задовільної окалиностійкості сталей з підвищеним вмістом хрому, кількість алюмінію можна зменшити, оскільки хром покращує ступінь легуваності фериту та зменшує кількість оксидів заліза, які не мають захисних властивостей. Підвищення температури дослідження до 1300 °С

(рис. 4, б) пришвидшує дифузію аніонів кисню та катіонів металу до поверхні розділу «метал-оксид» і цим прискорює процес окиснення. Зменшити швидкість окиснення можливо, якщо створити щільнішу оксидну плівку. Цього можна досягти підвищенням вмісту хрому та алюмінію в сплавах, а отже й в окалинні. Кращим сплавом для роботи за температур до 1300 °С є сталь з вмістом хрому 27–30% та алюмінію 4–6%, але для збереження ливарних і механічних властивостей таку сталь доцільно додатково мікролегувати титаном або РЗМ.

Установлено, що високі захисні властивості має плівка, яка утворюється за температур 1200–1300 °С на поверхні виробу, виготовленого із хромоалюмінієвої сталі, якщо в ній відношення  $[\%Cr] / [\%Al] = 8-10$ , тобто за вмісту 25–30% хрому та біля 3% алюмінію.

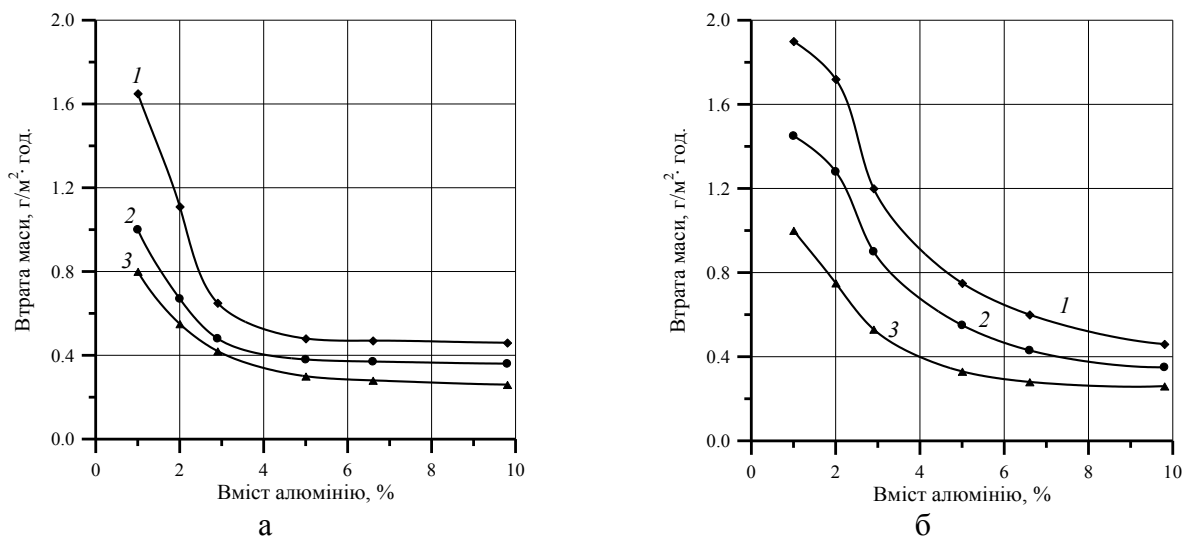


Рис. 4. Окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей у перегрітому повітрі за різних температур

а – 1200 °С; б – 1300 °С; 1 – 23, 0% хрому; 2 – 27% хрому; 3 – 30% хрому

Якість вихідних шихтових матеріалів суттєво впливає на окалинностійкість виробів, виготовлених із хромоалюмінієвих сталей. Для порівняння як основний компонент шихти для виплавляння сталі 30Х25Л використано звичайний середньовуглецевий брукхт і залізо Армко. Результати досліджень показано на рис. 5.

Установлено, що окалинностійкість середньовуглецевої хромоалюмінієвої сталі, виплавленої з використанням звичайного сталевого брукхту, суттєво нижча окалинностійкості сталі, виплавленої з використанням заліза Армко, хоча залишається на високому рівні. Крім того, сталь, виплавлена з використанням сталевого брукхту, для досягнення однакового значення окалинностійкості для сталі, виплавленої з використанням заліза Армко, потребує більшої кількості алюмінію за однакового вмісту хрому. Так, для досягнення високої (0,8–1,2 мг/см<sup>2</sup>·год) окалинностійкості в сталі, виплавленій з використанням сталевого брукхту, має бути 3–5% алюмінію, в той же час, як для сталі, виплавленої з використанням заліза Армко, необхідно лише 1–2% алюмінію.

Підвищення температури випробовування суттєво змінює окалинностійкість обох сплавів. За даними рис. 5 можна вибрати необхідний температурний інтервал експлуатації жаростійких виробів залежно від вмісту в сталі алюмінію. Проте при цьому необхідно брати до уваги, що з підвищенням вмісту алюмінію в сталі погіршуються її рідкотекучість та оброблюваність виробів, знижується теплопровідність металу, що призводить до росту зерна та підвищення крихкості сплаву [9–13].

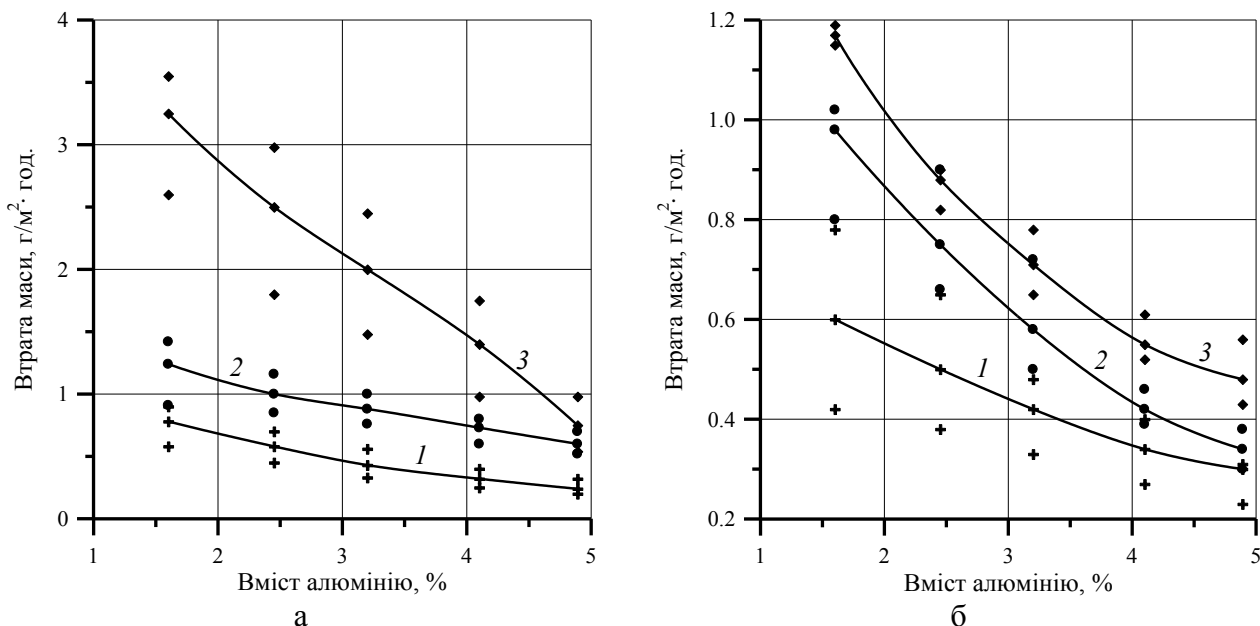


Рис. 5. Окалиностійкість сталі 30X25Л залежно від вихідних шихтових матеріалів і вмісту алюмінію

а – хромоалюмінієва сталь, виплавлена з використанням середньовуглецевого сталєвого брухту; б – така ж сталь, виплавлена з використанням заліза Армко;

1 – 1100 °С; 2 – 1200 °С; 3 – 1300 °С. Умови випробовування: тривалість – 100 год

Процес окиснення металів і сплавів за високих температур залежить від різноманітних факторів: одні прискорюють ці процеси, інші – знижують. До найважливіших факторів, які впливають на окалиностійкість, можна віднести склад і швидкість газового потоку, температуру та тривалість її дії, склад сталі та структуру оксидних плівок тощо. На практиці під час вибору сталі для жаростійких виробів особливу увагу слід приділяти складу газового середовища та швидкості окиснення металу, оскільки на швидкість окиснення особливо інтенсивно впливає парціальний тиск кисню.

Відомо [12], що під час окиснення заліза в газовому середовищі, де парціальний тиск кисню вищий пружності дисоціації гематиту ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), на поверхні виробу утворюється тришарова оксидна плівка –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (поверхневий),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (усередині) та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (внутрішній). Якщо процес окиснення заліза відбувається в газовому середовищі, де парціальний тиск кисню нижчий пружності дисоціації гематиту, утворюється двошарова оксидна плівка – із гематиту та вюститу, а за подальшого зниження концентрації кисню утворюється одношарова оксидна плівка із вюститу [11–13].

У сумішах газів парціальний тиск кисню залежить від співвідношення відновлювальних та окиснювальних газів, при цьому чим більше відновлювальних газів, тим менший парціальний тиск кисню. Великий вплив на ступінь окиснення сплавів у виробничих умовах справляють водяні пари або домішки у вигляді  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  тощо, які входять до складу газового середовища. Вони збільшують частку вюститу в оксидній плівці й характеризуються більшою дифузійною проникністю, ніж інші сполуки.

Під час окиснення сталі, легувальні елементи, які входять до її складу, також окиснюються й утворюють складні оксиди у вигляді окремих фаз або твердих розчинів, причому їх концентрація має бути такою, щоб запобігти утворенню вюститу. Виходячи з цього, й визначають мету жаростійкого легування, перш за все беручи до уваги склад агресивного середовища та властивості легувальних елементів, щоб на поверхні виробу утворювалися плівки шпінелей, які склалися би із оксидів легувальних елементів і заліза.

Процес окиснення жаростійких сталей здійснюється за параболічним законом, проте аналізом сучасної технічної літератури з питань утворення окалини встановлено, що єдиної думки навіть щодо впливу водяної пари на окиснення сплавів за високих температур немає. Одні автори [11–13] вважають, що окиснення заліза в середовищі водяної пари здійснюється повільно, інші [2, 3, 8] вважають, що процеси утворення окалини протікають швидко.

Більшість дослідників [1–3, 9–13] пов'язують особливості окиснення в присутності водяних парів із структурою окалини, яка утворюється, головним чином, через вюститний шар. Встановлено, що коефіцієнт дифузії заліза через вюстит під час окиснення заліза у водній парі приблизно в 6–10 разів більший коефіцієнта дифузії заліза через вюстит під час окиснення заліза в сухому повітрі.

До цих пір відсутні достовірні кількісні дані щодо впливу водяної пари на кінетику окиснення та дані щодо єдиного механізму цього явища, а вплив водяної пари на окалиностійкість хромистих і хромоалюмінієвих сплавів взагалі вивчено мало.

Нами досліджено вплив газового середовища такого складу: повітря; повітря + 45% CO<sub>2</sub> (за об'ємом); повітря + 45% H<sub>2</sub>O (за об'ємом у вигляді пари) на окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей. Швидкість руху газових сполук становила 10 см/с.

Спираючись на власні дослідження [4, 5, 9], вивчено зміну окалиностійкості хромистої сталі в наведених вище середовищах залежно від вмісту алюмінію (рис. 6). Встановлено, що підвищення вмісту алюмінію до 1,4% збільшує стійкість хромистої сталі проти окиснення приблизно вдвічі в порівнянні із сталлю без алюмінію.

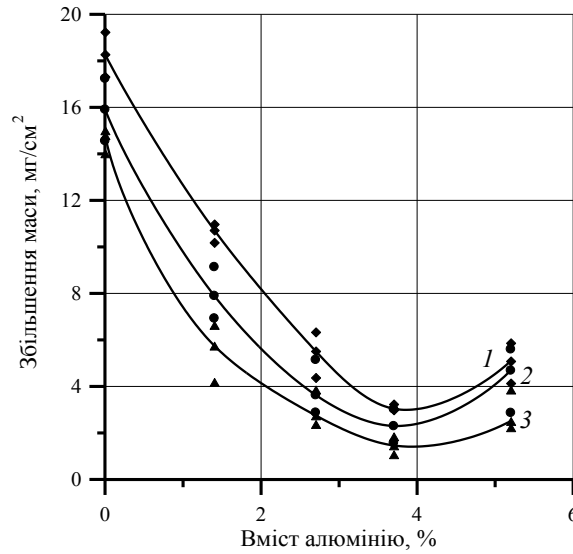
Подальше підвищення вмісту алюмінію зменшує приріст маси зразків внаслідок окиснення. Він досягає мінімуму за вмісту 3,5–4,0% алюмінію. Одночасно з цим змінюється й вигляд окалини: за 1200 °С на зразках хромистої сталі, окисненої в середовищі перегрітого повітря, утворюється окалина чорного кольору. За вмісту алюмінію до 1,4% окиснення суттєво зменшується з утворенням окалини сірого кольору, а за вмісту алюмінію понад 3,0% утворюється тонка плівка сіро-рожевого кольору. Підвищення вмісту алюмінію до 3,7–5,2% призводить до зниження окалиностійкості, при цьому утворюється складчаста окалина, яка має слабе зчеплення з поверхнею зразка й легко сколюється. Якщо кожна перша реакція протікає із збільшенням об'єму твердої фази, то для других реакцій критерій Пілінга й Бедварса менший одиниці, що призводить до утворення пористого оксиду. Таке пояснення ймовірне, але не є єдиним.

Вплив H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub> на швидкість окиснення сплавів супроводжується зміною фазового складу окалини в бік збільшення вюститу. Вюстит в свою чергу характеризується більшою дифузійною проникністю, ніж інші оксиди, а також високою швидкістю адсорбційно-десорбційних процесів [11, 12].

Ймовірність протікання реакцій окиснення після того, як тверді продукти реакції розташовувалися між фазами й таким чином відокремлювалися один від другого, є наслідком отримання металом кисню із робочого середовища макроскопічними порами (критерій Пілінга й Бедварса менший одиниці), або мікродефектами окалини (критерій більший одиниці). Це положення є головним і сьогодні. Якщо утворюється щільна захисна плівка, тоді це положення не можна перенести на такі процеси.

Таким чином тут можна вважати, що ймовірнішою може бути дифузія елементів через дефекти кристалевої ґратки захисної плівки. Проте сьогодні не можна однозначно сказати, який механізм переважає: дифузія металу від внутрішньої поверхні розділу до зовнішніх з утворенням сполук з металоїдом на міжфазній межі оксид-середовище чи дифузія металоїду від зовнішньої поверхні окалини до металу із протіканням хімічної реакції на поверхні розділу метал-оксид.

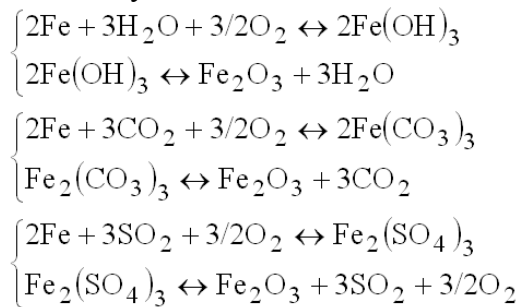
Авторами [9, 11–13] встановлено, що пічні гази завжди вміщують малі добавки сполук, які можуть змінити протікання реакцій, а значить, змінити кінетику й закон окиснення в цілому.



1 – повітря + 45% H<sub>2</sub>O; 2 – повітря; 3 – повітря + 45% CO<sub>2</sub>

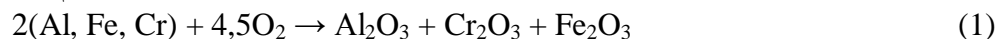
Умови випробовування: температура – 1200 °С, тривалість – 100 год

Рис. 6. Зміна окалиностійкості хромоалюмінієвої сталі (0,25% С, 24,2%Cr) в різних газових середовищах залежно від вмісту алюмінію



У парах води сталі окиснюються приблизно в 2 рази швидше, а частка FeO в окалині збільшується. Покращання окалиностійкості хромистих сталей після додавання алюмінію можна пояснити ще й тим, що в процесі окиснення відбувається дифузія алюмінію до поверхні розділу «метал-оксидна плівка» з утворенням окалини складного типу Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такий склад окалини повною мірою захищає метал від окиснення. Наявність виразкового окиснення за вмісту в сталі до 1,4% алюмінію можна пояснити тим, що такої його концентрації недостатньо для утворення оксидної плівки з високими захисними властивостями на всій поверхні зразка (рис. 7, а).

Після збільшення вмісту алюмінію в межах 3,7–5,2% можна спостерігати деяке зменшення окалиностійкості. Зразки із вмістом 5,2% алюмінію мають грубішу окалину, ніж зразки з 2,7–3,7% алюмінію. Окалина така ж сама, має світлий колір, але утворюється на поверхні зразка складками, легко сколюється та обсипається. Таку поведінку хромоалюмінієвої сталі, яка вміщує близько 5% алюмінію, можна пояснити наступним чином: процес окиснення хромоалюмінієвих сталей за високих температур можна представити схематично як результат таких трьох реакцій:



За температури 1200 °С вирішальний вплив на формування окалини справляють реакції (2) й (3). Товщина оксидного шару та вміст в ній Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> безперервно збільшуються. Критерій Пілінга й Бедварса під час утворення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> більший одиниці. Оксидна плівка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, яка утворилась, знаходиться під дією стискових напружень. Збільшення кількості Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в такій окалині призводить до руйнування внаслідок високої її крихкості та збільшення стис-

кових напружин в ній. З підвищенням вмісту алюмінію до 5–6% зростає товщина оксидної плівки із вмістом чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , яка має ще більшу крихкість, що призводить до руйнування її під дією стискових напружин.

Дослідженнями встановлено, що різноманітні газові середовища по-різному впливають на окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей. За температур 1200 °С найбільше окиснюються зразки в середовищі водяної пари, найменше – в середовищі вуглекислого газу.

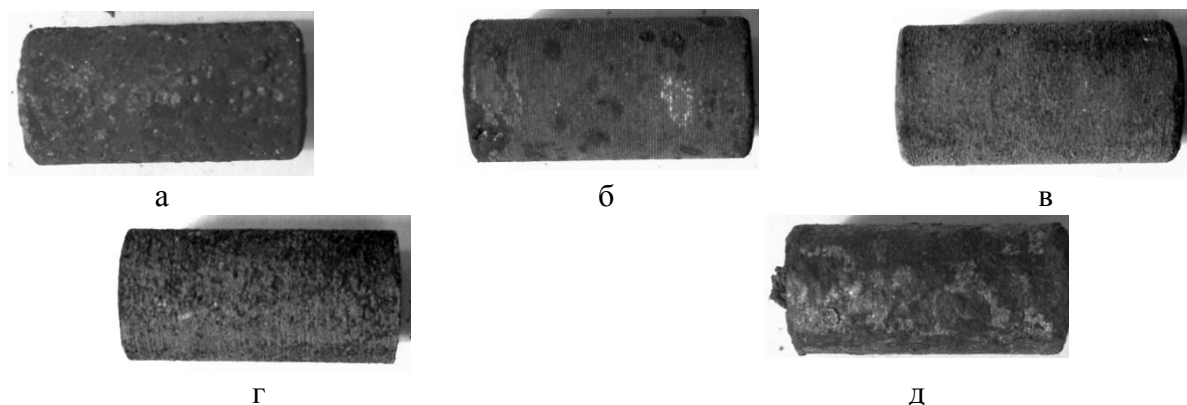


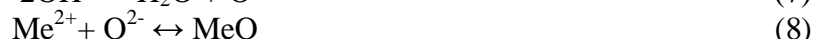
Рис. 7. Зовнішній вигляд зразків хромоалюмінієвої сталі (0,25% С, 24,2%Cr) залежно від вмісту в ній алюмінію після окиснення в перегрітому повітрі

а – 0,9% Al; б – 1,4% Al; в – 2,7% Al; г – 3,7% Al; д – 5,2% Al

Умови випробовування: температура – 1200 °С, тривалість – 100 год

Додавання алюмінію до 3% сприяє зниженню маси ( $\text{мг}/\text{см}^2$ ): до 3,5 – у перегрітому повітрі; 4,6 – у повітрі з 45%  $\text{H}_2\text{O}$  та 2,0 – в повітрі з 45%  $\text{CO}_2$ .

Оксидна плівка, яка утворилась на поверхні зразків в середовищі водяної пари, пориста й покрита дрібними виразками. У присутності парів води утворюються пухирі й тріщини внаслідок дифузії через окалину водню з наступною його молярізацією в різноманітних дефектах за такими первинними реакціями, які здійснюються як на поверхні металу, так і в його товщині:



Таку дію можна пояснити тим, що в складі оксидних плівок, які утворилися у водній парі, можуть бути присутніми складні оксиди (шпінелі), а також гідроксиди із складними ґратками (реакція 4). Гідроксид металу, який знаходиться в рівновазі з молекулами води, може сприяти утворенню високої концентрації гідроксидної групи, які під час реакції утворюють воду та іони кисню (реакція 7). Іони  $\text{O}^{2-}$ , які виникають у товщині оксидної плівки, сприяють інтенсивнішому, ніж на повітрі, окисненню металу. Це, ймовірно, є одним із пояснень утворення великої кількості виразок на поверхні зразків під час випробовування їх у середовищі повітря з 45%  $\text{H}_2\text{O}$ .

Найвища окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей спостерігається в середовищі вуглекислого газу. Колір зразків світлий, окалина рівномірна. Це свідчить про те, що оксидна плівка, яка складається повністю із  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , є високоякісним захистом металу в середовищі  $\text{CO}_2$ . Зменшення окиснення в середовищі повітря з 45%  $\text{CO}_2$  в порівнянні з окисненням у перегрітому повітрі можна пояснити тим, що в середовищі вуглекислого газу парціальний тиск кисню, який визначає інтенсивність окиснення, менший, ніж парціальний тиск кисню в повітрі. Заміна майже половини об'єму повітря вуглекислим газом суттєво зменшує кількість азоту в газовому середо-



вищі. Азот негативно впливає на окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей, а тому зменшення його в агресивному середовищі сприяє покращанню окалиностійкості цих сталей.

Азот за наявності в сталі алюмінію та хрому утворює нітриди алюмінію й голчасті нітриди хрому або складні голчасті нітриди хрому з алюмінієм [3, 11]. Внаслідок цього зменшується кількість алюмінію, яка витрачається на утворення захисного шару. Шкідлива дія азоту поглиблюється утворенням нітридів, які не покращують властивості захисного шару, а сам азот глибоко проникає в глибину металу, знижуючи його ростостійкість. Отже зменшення кількості азоту в газовому середовищі сприяє зниженню реакційної здатності повітря з 45%  $\text{CO}_2$  та підвищенню окалиностійкості сталей.

Зона внутрішнього окиснення обумовлена дифузією кисню в глибину металу, а легувального елемента в зворотному напрямку до взаємодії з киснем. Оксид внутрішнього шару (надзразковий шар окалини) не створює протидії дифузії кисню. Зростання зовнішнього шару окалини гальмує розвиток шару внутрішнього окиснення [8, 12].

Виокремлення тонких часточок оксиду в металевій фазі під час внутрішнього окиснення призводить до поверхневого зміцнення сплаву, утруднює рекристалізацію і ріст кристалів металу. Надзразковий шар окалини підвищує зчеплення із сплавом і цим сприяє покращанню стійкості сплаву під час теплових змін – тобто покращує термостійкість. Таку дію справляють, наприклад, церій та ітрій після додавання до хромоалюмінієвих сталей [8, 10, 12].

На підставі проведених досліджень отримано моделі, які можна застосовувати для прогнозування окалиностійкості за будь-яких значень концентрацій хрому та алюмінію (з додаванням титану) в межах верхнього та нижнього рівнів (рис. 8).

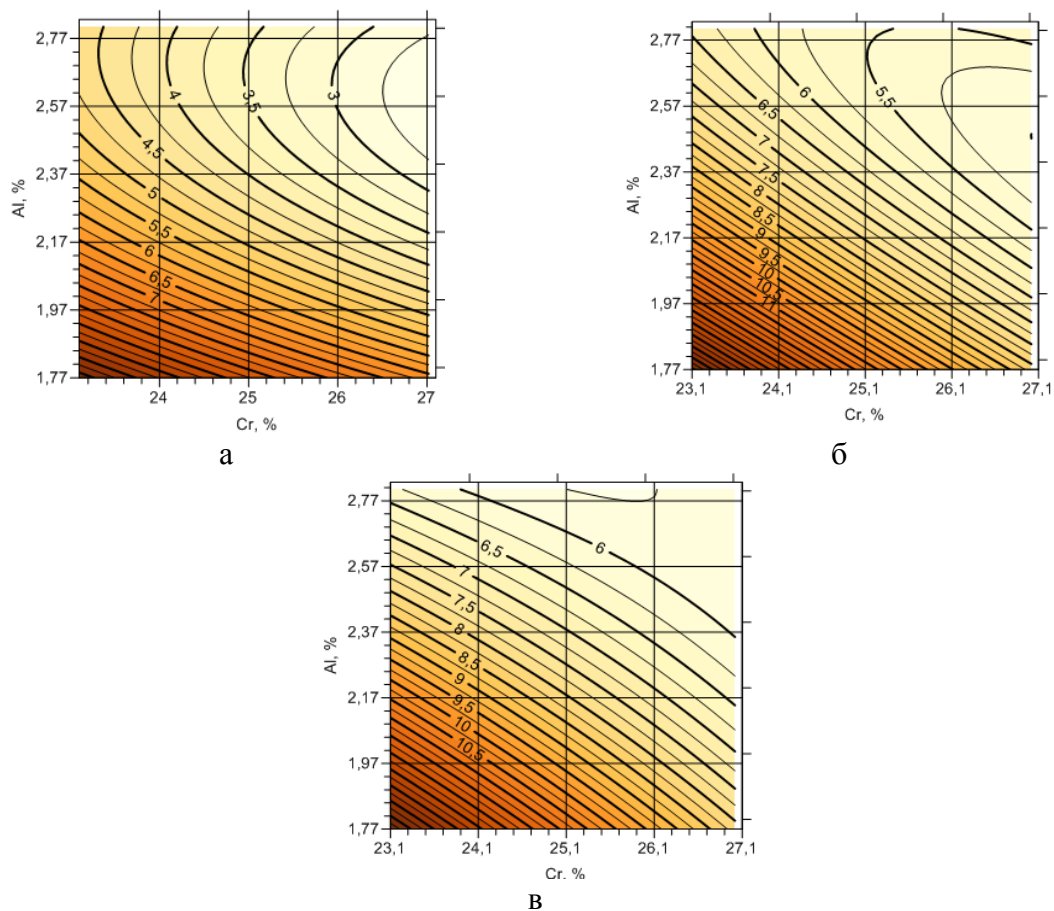


Рис. 8. Моделі для прогнозування окалиностійкості хромоалюмінієвих сталей (вміст титану 0,29%) :

а – перегріте повітря; б – повітря + 45%  $\text{H}_2\text{O}$ ; в – повітря + 45%  $\text{CO}_2$ . Умови експлуатації: 1200 °С

## ВИСНОВКИ

– для забезпечення високої окалиностійкості виробів, які працюють за температур до 1250 °С в агресивних газових середовищах, концентрація хрому в металі має бути в межах 25–32%, а вміст алюмінію – від 1,5 до 3,5%;

– зміна концентрації хрому та алюмінію в жаростійких сталях суттєво впливає на термостійкість металу. Це треба враховувати в технологічних процесах виготовлення литих деталей та під час їх експлуатації;

– хромоалюмінієві сталі з високим вмістом хрому та алюмінію повною мірою відповідають вимогам, які пред'являють до жаростійких матеріалів. Вони мають високі температури плавлення, високу корозійну стійкість в умовах звичайних температур і високу жаростійкість в умовах високих температур та агресивних середовищ, задовільні ливарні властивості, є недефіцитними та дешевими;

– виливки із хромоалюмінієвих сталей для роботи в екстремальних умовах можна виготовляти будь-яким способом лиття.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корнилов И.И. Жароупорный сплав №3 / И. И. Корнилов. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 120 с.
2. Архаров В. И. Окисление металлов при высоких температурах / В. И. Архаров. – М.: Металлургиздат, 1945. – 171 с.
3. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали / К. А. Ланская. – М.: Металлургия, 1976. – 216 с.
4. Ямишинський М.М. Спеціальні властивості ливарних хромоалюмінієвих сталей / М. М. Ямишинський, Г.Є. Федоров, Є.О. Платонов // *Металознавство та обробка металів*. – 2004. – № 3. – С. 14–19.
5. Ямишинський М. М. Кінетика окиснення хромоалюмінієвих сталей / М. М. Ямишинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – № 1 (32). – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С.167–172.
6. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1964. – 672 с.
7. Гудремон Э. Специальные стали. Т.1. – М.: Металлургия, 1966. – 736 с.
8. Лютый В.А. Хромоалюминиевая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200°С. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.04. – К.: КПИ, 1969 – 320 с.
9. Ямишинський М.М. Оптимізація хімічного складу жаростійких хромоалюмінієвих сталей в залежності від умов експлуатації литих деталей / М. М. Ямишинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов // *Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ»*. – 2004. – №5 – С. 68–74.
10. Повышение специальных свойств жаростойких хромоалюминиевых сталей микролегированием и модифицированием / М.М. Ямишинский, Г.Е. Федоров, Е.А. Платонов, А.Е. Кузьменко, В.С. Назаренко // *Вісник ДДМА*. – Краматорськ : ДДМА, 2009. – №1 (15). – С. 220–225.
11. Бенар Ж. Окисление металлов. Теоретические основы / Ж. Бенар. – М.: Металлургия 1968 – 499 с.
12. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
13. Кубашевский О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – М.: Металлургия, 1965. – 315 с.