

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, інженерно – фізичний факультет  
(повне найменування інституту, факультету)

Фізичне матеріалознавство  
(повне найменування кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

Магістр  
(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження можливостей досягнення високих показників  
корозійної стійкості при обмеженому вмісті хрому

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи ІФз219м  
Спеціальності 132 Матеріалознавство  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

Никоненко Сергій Анатолійович  
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н, доцент Ткач Д.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Гавришко З.В.  
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Фізико-технічний, інженерно-фізичний факультет

Кафедра Фізичного матеріалознавства

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Анатолий В. Ю.

« 7 » листопада 20 20 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**  
**Никоненко Сергій Анатолійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження можливостей досягнення високих показників корозійної стійкості при обмеженому вмісті хрому

керівник проєкту (роботи) ТКАЧ ДАРІЯ ВОЛОДИМИРІВНА, доцент каф.ФМ, к.т.н  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «02» 11 2020 року №

2. Строк подання студентом проєкту (роботи)

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) зразки зі сталі 12X18H10T, 08X18T1, 08X8СЮТч, 08кп, хімічний склад

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ 1. Аналітичний огляд 2. Матеріали та методика досліджень. 3. Експериментальна частина 4. Економічна частина 5. Охорона праці в галузі. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Матеріали для порівняльних досліджень, Схема установки для випробувань зразків на жаростійкість в продуктах горіння автомобільного палива; Характеристики жаростійкості сталі 08X8СЮТч; Зовнішній вигляд зразків після польових випробувань на стійкість до атмосферної корозії; Зовнішній вигляд зразків після пришвидшених випробувань на корозійну стійкість в атмосферних умовах; Жаростійкість сталей; Порівняльна окалиностійкість зразків; Приріст маси після випробувань при температурах до 1300 °С

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                           |
|--------|-------------------------------------------|----------------|---------------------------|
|        |                                           | завдання видав | прийняв виконане завдання |
| 1      | Ткач Д.В.                                 | 10.09.2020     | 12.10.2020                |
| 2      | Ткач Д.В.                                 | 12.10.2020     | 18.10.2020                |
| 3      | Ткач Д.В.                                 | 18.10.2020     | 12.11.2020                |
| 4      | Круглікова В.О                            | 18.10.2020     | 23.12.2020                |
| 5      | Нестеров О.В                              |                |                           |
| НК     | Ткач Д.В                                  |                | 19.12.2020                |

7. Дата видачі завдання « 10 » жовтня 2020 року.

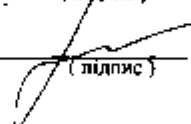
## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи)          | Строк виконання етапів проєкту ( роботи ) | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний огляд                                 | 12.10.2020                                |          |
| 2     | Матеріали та методики досліджень                  | 18.10.2020                                |          |
| 3     | Експериментальна частина                          | 17.11.2020                                |          |
| 4     | Економічна частина                                | 30.11.2020                                |          |
| 5     | Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях | 12.12.2020                                |          |
|       |                                                   |                                           |          |
|       |                                                   |                                           |          |
|       |                                                   |                                           |          |
|       |                                                   |                                           |          |

Студент(ка)

 (підпис) Нестеров О.В (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

 (підпис) Ткач Д.В (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ІІЗ: 102 стор., 26 табл., 19 рис., 48 джерела

Мета роботи: встановити можливість застосування економнолегованих жаростійких сталей замість сталей з високим вмістом нікелю.

В даній роботі розглядались такі питання як причини виникнення корозії, матеріали, які мають підвищену жаростійкість. Були розглянуті методики розрахунку жаростійкості металів. Матеріалами для порівняльних досліджень було обрано сталі 12Х18Н10Т, 08Х18Т1, 08Х8СЮТч, 08кп, ХН45Ю, YUS 409D. Ці матеріали випробували на корозійну стійкість та жаростійкість, також проводили металографічний та рентгеноспектральний аналіз.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що економнолегована сталь 08Х8СЮТч зберігає жаростійкість і не поступається за нею сталі 12Х18Н10Т до температур 1200 °С, а сплав ХН45Ю до температур 1100 °С. Подальше вдосконалення системи легування може надати можливість використовувати сталі феритного класу і при більш високих температурах. Оптимістичні прогнози можна вважати цілком коректними, оскільки відомо про величезний практичний досвід використання фехралів (типу Х25Ю5) до температур порядку 1350 °С.

ЖАРОСТІЙКІСТЬ, СТАЛЬ, КОРОЗИЯ, ОКСИДНІ ПЛІВКИ,  
НАСИВАЦЯ, ОКАЛИНОСТІЙКІСТЬ, МЕТОДИКА

## ЗМІСТ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                          | 7  |
| 1 Аналітичний огляд .....                                                                           | 9  |
| 1.1 Механізми високотемпературного окислення (ВТО) .....                                            | 9  |
| 1.1.1 Вплив легувальних елементів на процеси<br>утворення жаростійких оксидних плівок .....         | 10 |
| 1.1.2 Природа та властивості захисних жаростійких плівок при ВТО.....                               | 14 |
| 1.2 Уявлення про механізм пасивації.....                                                            | 16 |
| 1.3 Основні марки хромистих сталей, що використовуються<br>в умовах ВТО та атмосферних умовах ..... | 18 |
| 1.4 Характеристики жаростійкості металевих матеріалів .....                                         | 19 |
| 1.5 Можливі методи розрахунку жаростійкості металів.....                                            | 30 |
| 1.5.1 Розрахунок жаростійкості при постійній температурі .....                                      | 30 |
| 1.5.2 Розрахунок жаростійкості при змінній температурі .....                                        | 35 |
| 2 Матеріали та методи дослідження жаростійкості.....                                                | 44 |
| 2.1 Матеріали для порівняльних досліджень .....                                                     | 44 |
| 2.2 Дослідження жаростійкості в інтервалі температур<br>700 – 850 °C та 1100 – 1300 °C.....         | 45 |
| 2.3 Металографічний аналіз.....                                                                     | 47 |
| 2.4 Мікрорентгеноспектральний аналіз .....                                                          | 48 |
| 2.5 Випробування корозійної стійкості .....                                                         | 48 |
| 3 Результати та їх обговорення.....                                                                 | 50 |
| 3.1 Прогнозування стійкості сталі 08X8CrOTч в умовах газової корозії.....                           | 50 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Дослідження стійкості до атмосферної корозії.....                                      | 52 |
| 3.3 Порівняльні випробування жаростійкості в різних<br>газових середовищах до 800 °С ..... | 56 |
| Марка сталі .....                                                                          | 59 |
| 3.4 Дослідження складу оксидних плівок .....                                               | 61 |
| 3.5 Порівняння жаростійкості при температурах до 1300 °С.....                              | 63 |
| 3.6 Практичне використання результатів .....                                               | 75 |
| 4 Економічна частина .....                                                                 | 77 |
| 4.1 Тенденції розвитку світового ринку феритних<br>корозійностійких сталей.....            | 77 |
| 4.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення<br>науково-дослідницької роботи.....         | 78 |
| 5 Охорона праці .....                                                                      | 86 |
| 5.1 Аналіз потенційних небезпек .....                                                      | 86 |
| 5.2 Заходи по забезпеченню безпеки .....                                                   | 87 |
| 5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці .....                     | 89 |
| 5.4 Заходи з пожежної безпеки .....                                                        | 92 |
| 5.5 Заходи з цивільної оборони .....                                                       | 94 |
| Висновки .....                                                                             | 96 |
| Перелік посилань.....                                                                      | 97 |
| Додаток А .....                                                                            | 77 |

## ВСТУП

Елементи багатьох машин та агрегатів сучасної техніки в процесі їх експлуатації піддаються дії різних агресивних середовищ, в результаті якої відбувається їх самодовільне руйнування. Найбільш поширеними видами такої дії є високотемпературне окислення (ВТО) та атмосферна корозія.

В умовах реальної експлуатації матеріал виробів, які працюють при високих температурах, крім дії гарячого повітря часто піддаються дії інших технічних газів різного складу. Це продукти горіння твердих та рідких палив, захисні контрольовані атмосфери, які використовують при термічній обробці, та інші газообразні середовища, які використовують в техніці.

Комплексний вплив середовища або окремих, найбільш агресивних його компонентів, визначають методи захисту металів та сплавів від руйнування при ВТО. Одним із основних таких методів є легування металів хімічними елементами, які підвищують їх жаростійкість.

Задачею розрахунку жаростійкості металів є визначення кількісних характеристик їх жаростійкості. При цьому дослідників цікавить перш за все характеристики рівномірної корозії; серед них найбільшу цікавість для техніки представляє питома втрата маси, або глибина корозії металу за заданий час – ресурс експлуатації машини або агрегату. Іноді важливо також знати швидкість корозії металу. Видно, що від точності методів розрахунку жаростійкості матеріалів в значній мірі залежить працездатність промислових установок.

Отримання доволі оптимістичних результатів щодо показників жаростійкості сталі 08X8CЮТч дозволило зробити припущення про можливість використання даного матеріалу і при більш високих температурах (1000–1300 °C). На сьогодні такі вироби як насадки реактивних двигунів літальних апаратів виготовляються із комбінованих багатошарових матеріалів. Роль наповнювача в них виконує сітка з вольфрамового дроту, а захисні оболонки виготовляються з листового матеріалу марки ХН45Ю. Залізо-

нікелевий сплав ХН45Ю є гостродефіцитним, через значний вміст нікелю, тому заміна цього матеріалу на економлеговану марку 08Х8СЮТч є дуже актуальним, практично вагомим питанням.

В зв'язку з цим дипломна робота має велике значення, оскільки надає можливість заощадження коштів за рахунок економії від заміни сталі 12Х18Н10Т на 08Х8СЮТч при збереженні тих же показників жаростійкості.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Елементи багатьох машин та агрегатів сучасної техніки в процесі їх експлуатації піддаються дії різних агресивних середовищ, в результаті якої відбувається їх самодовільне руйнування. Найбільш поширеними видами такої дії є високотемпературне окислення (ВТО) та атмосферна корозія.

Процес високотемпературного окислення металу – вид хімічної корозії. Це взаємодія металу з окислювальним газовим середовищем визначеного складу (або компонентом газового середовища) за умови відсутності на поверхні металу плівки вологи. Часто цей різновид корозії називають газовою корозією. Здатність металу протистояти ВТО називають жаростійкістю [4].

Під атмосферною корозією металів розуміють їх руйнування, яке відбувається під впливом електрохімічної дії зовнішнього середовища. Головною відмінністю цього виду корозії є те, що провідним середовищем, необхідним для протікання процесу, є тонкі шари електrolітів, які виникають в атмосфері та осаджуються на поверхні металу [5].

### 1.1 Механізми високотемпературного окислення (ВТО)

В умовах реальної експлуатації матеріал виробів, які працюють при високих температурах, крім дії гарячого повітря часто піддаються дії інших технічних газів різного складу. Це продукти горіння твердих та рідких палив, захисні контрольовані атмосфери, які використовують при термічній обробці, та інші газообразні середовища, які використовують в техніці.

Комплексний вплив середовища або окремих, найбільш агресивних його компонентів, визначають методи захисту металів та сплавів від руйнування при

ВТО. Одним із основних таких методів є легування металів хімічними елементами, які підвищують їх жаростійкість.

### 1.1.1 Вплив легувальних елементів на процеси утворення жаростійких оксидних плівок

В якості елементів, які підвищують стійкість до ВТО сплавів на основі заліза відомі хром, алюміній, кремній. Хром, алюміній та кремній мають більшу спорідненість до кисню, ніж залізо. Ці елементи утворюють на поверхні сталі захисну плівку, яка складається з їх оксидів.

Одним із елементів, який суттєво підвищує жаростійкість сталі, є хром. Висока жаростійкість хромомістких сталей та сплавів обумовлена утворенням на їх поверхні дуже міцної тугоплавкої плівки, яка складається із оксиду хрому ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) або із складних оксидів шпінельного типу. В залізохромистих сплавах чистий оксид хрому утворюється тільки при дуже високих вмістах хрому, порядку 30 % та вище. Цей оксид стійкий в широкому інтервалі позитивних та від'ємних температур при різних товщинах плівки, добре з'єднаний з матрицею та має високі захисні властивості [7]. При меншій концентрації хрому в складі сплавів їх висока жаростійкість обумовлена утворенням на поверхні оксидів шпінельного типу ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ) з наступною трансформацією при температурі 500 °C,  $\text{FeO}$  в  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В зв'язку з тим, що  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  мають близькі параметри ґратки та ідентичність формули типу  $\text{Me}_2\text{O}_3$ , то припускають, що  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при ВТО утворюють твердий розчин [8]. Хром розподіляється у внутрішньому та зовнішньому шарах захисної плівки неоднаково. Це залежить від температури та вмісту хрому в складі сталі. Як правило, вміст хрому в плівці збільшується при підвищенні температури та збільшенні часу експозиції. Вплив хрому стає помітним, починаючи з вмісту біля 5 %. Сталі з 5 % хрому мають добрий опір окисленню при температурах 600 – 650 °C. З підвищенням вмісту хрому до 10 –

15 % стійкість до окислення підвищується до 800 – 900 °С. При вмісті хрому 20 – 22 % сплав стає повністю стійким до ВГО до 1000 – 1100 °С (рис. 1.1) [9].

Опір газовій корозії хромистих сталей значно підвищується при введенні в їх склад таких легуючих елементів як алюміній та кремній.

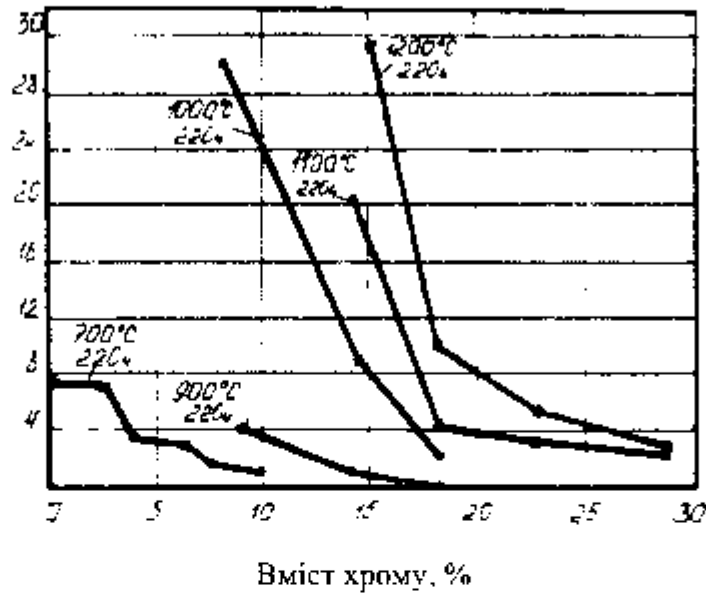


Рисунок 1.1 – Вплив хрому на окислостійкість сталі при різних температурах та тривалості випробувань на повітрі

Алюміній є найбільш ефективною присадкою, яка підвищує жаростійкість заліза та залізохромистих сплавів. Додавання алюмінію в залізо приводить до утворення на поверхні сплаву стійкої захисної плівки, яка при великих вмістах алюмінію складається переважно із оксиду  $Al_2O_3$  [10]. При вмісті 7 – 8 % алюмінію в залізі сплав набуває таку ж жаростійкість, як і ніхром. Але, подвійні сплави заліза з алюмінієм, із-за високої крихкості, в техніці практично не використовуються. Широке використання отримали залізохромисті сталі та сплави з невеликими (до 5 % мас.) добавками алюмінію в якості легуючого елемента. При цьому, чим вище вміст хрому в залізі, тим менше необхідно алюмінію та, навпаки, чим вищий вміст алюмінію, тим менше необхідно хрому для досягнення тієї ж жаростійкості [11]. Вплив алюмінію на жаростійкість залізохромистого сплаву показано на рис. 1.2.

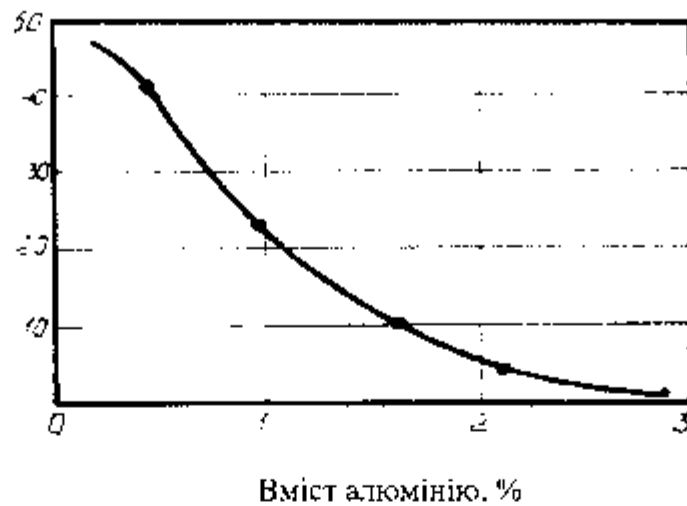
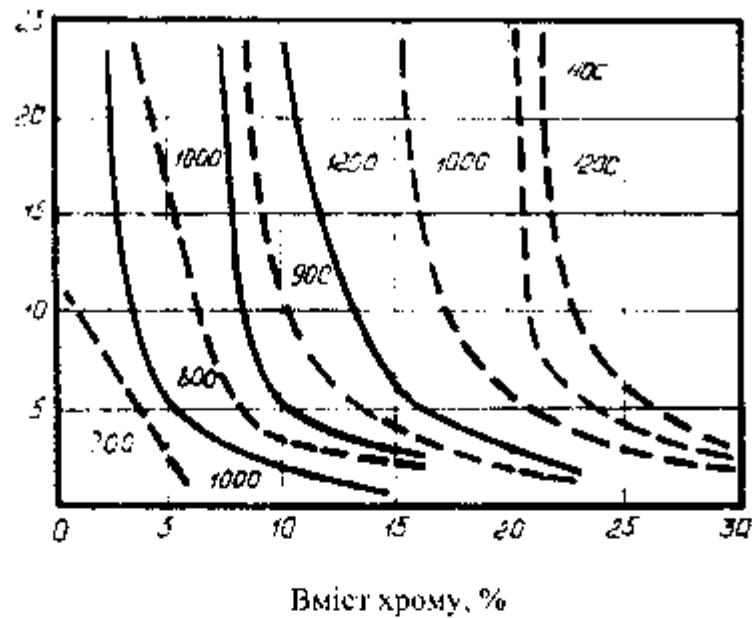


Рисунок 1.2 Вплив алюмінію на жаростійкість залізохромистого сплаву, при вмісті хрому 6 %. Експозиція 24 години 800 °С на повітрі

Вітчизняні та закордонні дослідники [12, 13] детально вивчали процес окислення залізохромоалюмінієвих сплавів. Встановлено, що при температурах близько 700 °С окислюються усі три компоненти сплаву, з утворенням на поверхні металу твердих розчинів оксидів шпінельного типу  $\text{FeO}$  ( $\text{Cr,Al}$ ) $_2\text{O}_3$ . при високих температурах, внаслідок великої хімічної активності алюмінію, відбувається більш складний процес, при якому металевий алюміній може проявляти свою відновлювальну здатність по відношенню до оксидів заліза та хрому, з протіканням загальновідомих алюмотермічних реакцій. Це приводить до збагачення оксидних плівок оксидами алюмінію та зменшення його вмісту в матриці.

Присадка кремнію до залізохромистих сталей діє декілька своєрідно [8, 14]. Утворення захисних окисних плівок відбувається в інтервалі температур 700 – 900 °С. На початку процесу кремній та хром окислюються одночасно з утворенням шпінелі  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  та силікатів, а потім відбувається потовщення захисного шару, внаслідок спікання оксидів кремнію та силікатів. Вплив кремнію на жаростійкість сталі з різним вмістом хрому проілюстровано на рис. 1.3.



----- — 0,5–1 % кремнію; ————— — 2–3 % кремнію.

Рисунок 1.3 – Вплив кремнію на жаростійкість сталей з різним вмістом хрому

За сучасним міркуванням введення в хромисту сталь, в невеликих кількостях, рідкоземельних металів також підвищує її жаростійкість [15–17]. Ці елементи завдають наступного впливу:

- перешкоджаючи коагуляції карбідів при тривалих нагріваннях, сприяють збереженню рівномірного розподілу легуючих елементів в хімічному складі;
- маючи великий атомний радіус, ці елементи розташовуються на границі поділу оксид–основа, при цьому вони заповнюють пори та попереджують утворення полостей;
- покращують пластичність як самої плівки, так і підложки.

В сучасній металургії феритних сталей в якості такої добавки найбільше поширення отримав церій [18].

### 1.1.2 Природа та властивості захисних жаростійких плівок при ВТО

В загальному вигляді взаємодія газів, що окислюють, з чистою поверхнею металів можна представити як процес, який протікає в три етапи:

- адсорбція молекул газу, що окислює;
- нуклеація, тобто утворення зародків плівки;
- ріст суцільної оксидної плівки.

На стадії адсорбції прийнято розрізняти фізичну адсорбцію та хемосорбцію. При фізичній адсорбції гази утримуються на поверхні металу Ван-дер-Ваальсовими силами, а при хемосорбції адсорбовані молекули або атоми вступають в хімічний зв'язок з поверхневим шаром металу. Таким чином, процес хемосорбції заключається в перенесенні електронів. При окисленні, наприклад, заліза, оскільки швидкість дифузії іонів металу більша, ніж швидкість дифузії іонів газу, що окислює, окислення протікає за рахунок дифузії іонів металу у бік поверхні. Слід відмітити, що процес хемосорбції має місце при високих температурах. Важлива особливість цього початкового етапу утворення оксиду складається в тому, що окремі його зародки розташовуються на поверхні неупорядковано. Місця їх зародження уявляють з себе недосконалості поверхні металу або домішкові атоми [19, 20]. Згідно міркувань Блумера [21], острівки оксидів на початкових стадіях уявляють з себе циліндричні диски висотою в один мономолекулярний шар. Подальший їх ріст залежить від ряду факторів – температури, парціального тиску газу, що окислює, структури металу, кількості поверхневих дефектів. Коли захисна плівка повністю покриває поверхню металу, то швидкість реакції окислення визначається перенесенням електронів або іонів крізь плівку. При високих температурах цей процес пов'язан з дифузією реагентів, яка обумовлена наявністю градієнта хімічного потенціалу за товщиною плівки, який згідно механізму Вагнера приводить до параболічного окислення. При низьких температурах для пояснення характеру реакції

враховуються ще й електричне поле за товщиною плівки або просторові заряди в ній [22].

Теорія Мотта та Каббери [23] припускає, що атоми газу, що окислює, адсорбуються на поверхні оксидної плівки, а електрони, завдяки „тунельному ефекту” можуть швидко проходити крізь плівку, внаслідок чого встановлюється рівновага між металом та адсорбованим окисником. Цей процес утворює електричне поле, яке полегшує перенесення іонів крізь плівку. Припускається, що перенесення іонів металу на поверхню поділу метал–оксид є фактором, який визначає швидкість окислення. Треба припускати, що модель Мотта та Каббери, яка описує такий механізм росту, дійсна тільки при товщині плівки менше 2,0 нм. Це максимальна товщина, при якій завдяки „тунельному ефекту” крізь плівку проходить достатня кількість електронів.

Існують й інші теорії, згідно однієї із них, яка була розроблена Хауфе [24], концентрація дефектів в середині оксидної плівки постійна та швидкість окислення визначається тільки кількістю іонів окисника, який проходить крізь плівку.

Для забезпечення високої жаростійкості необхідно, щоб в захисній плівці не утворювались тріщини та відшарування, а сама плівка щільно вкривала поверхню металу. В свою чергу, на зчеплення плівки впливають наступні фактори:

- дифузія іонів металу або іонів окисника повинна протікати повільно;
- оксидна плівка повинна мати певну пластичність для того, щоб при згинанні та крутінні матриці не виникали тріщини;
- якщо тріщини та відшарування утворюються, то повинна утворюватись нова плівка з такими ж захисними властивостями.

## 1.2 Уявлення про механізм пасивації

Пасивність металу визначається як стан підвищеної корозійної стійкості в умовах, коли з термодинамічної точки зору він цілком реакційноздатний.

Найбільш поширенні теорії пов'язують пасивний стан хромистих сталей з явищами, які відбуваються на поверхні металу. В основі цих явищ лежить плівчастий або адсорбційний механізм гальмування анодного процесу. Плівчаста теорія знайшла найбільше відображення в роботах Г.В.Акімова, П.Д.Данкова, Н.Д.Томашова, Ю.Р.Еванса [25–28]. Згідно цієї теорії корозійна стійкість пояснюється утворенням на поверхні поділу дуже тонкої захисної плівки, яку не можна побачити, в результаті взаємодії кисню навколишнього середовища з поверхнею металу, при цьому потенціал металу зсувається в більший бік.

Друга теорія пасивного стану металу, яка розвивається в трудах А.Н.Фрумкіна, Б.П.Кабанова, І.Л.Розенфельда [29–31], пов'язана з адсорбцією атомів кисню поверхнею металу, яка ускладнює анодний процес його розчинення.

Останнім часом ці дві теорії були об'єднані в єдину адсорбційно-плівчасту теорію. Доведено, що у ряді випадків помітне гальмування анодного процесу може виникнути вже при адсорбції на поверхні металу мономолекулярного шару кисню. Це пояснюється різкою зміною потенціалу в подвійному шарі (по обидва боки фазової границі), яка ускладнює проходження крізь нього іонів або блокування окремих активних центрів поверхні.

В більшості випадків припускається наявність суцільних мономолекулярних або полімолекулярних адсорбційних шарів будь-яких з'єднань (частіше хемосорбційних шарів кисню) з утворенням оксидних плівок. Пасивність такого характеру спостерігається на хромі, неіржавіючих сталях, залізі, де товщина адсорбційних пасивних плівок складає 1,0 – 5,0 нм.

При збільшенні анодного потенціалу первинний хемосорбційний шар кисню може потовщуватись. Якщо він повністю зберіг щільність, то його захисні властивості, тобто гальмування анодного процесу, будуть підвищуватись. Також шари є перехідними від чисто адсорбційних до фазових та можуть сягати товщини 5,0 – 100,0 нм. Щоб відрізнити їх від хемосорбційних шарів з одного боку та фазових з іншого доцільно називати їх бар'єрними. Вони мають аморфну або неявну кристалічну структуру, яка знаходиться в декотрій орієнтаційній відповідності зі структурою нижчерозташованих шарів металу.

Гальмування анодного процесу хемосорбційною або бар'єрною плівкою заключається не в покриваючій дії, як це раніше припускалося, а має більш складний електрохімічний або напівпровідниковий характер. Слід розрізняти два типи анодних процесів на пасивній поверхні металу:

- анодні процеси, при яких перенесення зарядів крізь адсорбційний пасивуючий шар здійснюється тільки рухом електронів при майже повній відсутності перенесення зарядів іонами;
- анодні процеси, при яких утворюється менш досконала пасивна плівка, яка має крім електронної, помітну іонну провідність.

Розчинення металу в пасивному стані визначається в першу чергу прямим переходом катіонів металу із кристалічної ґратки в розчин ( $Me \rightarrow Me^+ + e^-$ ), тобто анодною іонізацією металу крізь пасивну плівку. Потовщення пасивної плівки пов'язано з утворенням з'єднань металу з іоном ( $Me + A_n \rightarrow MeA_n + e^-$ ). З'єднання  $A_n$  може бути складним комплексним з'єднанням або оксидом. Потовщення пасивної плівки веде до зниження швидкості її росту та швидкості розчинення металу а пасивному стані. Якщо на оксидну плівку немає хімічної дії і не відбувається її механічне руйнування, то ріст її зазвичай гальмується. Гальмування цього процесу залежить від величини іонної провідності пасивної плівки. Чим вона менше, тим сильніше гальмування, і тим при менших граничних товщинах настає повна пасивність та припинення росту бар'єрної плівки. При хімічному розчиненні зовнішньої поверхні пасивної плівки може встановитися рівновага між процесом хімічного розчинення та анодним

процесом її росту [32]. Але, в цьому випадку, згідно сучасним теоріям [33–35], поряд з анодним процесом хімічного розчинення плівка зберігається і анодний процес прямого переходу іонів металу в розчин. Співвідношення швидкостей прямого переходу іонів металу в розчин та крізь наступне хімічне розчинення анодоутворювального окисла може сильно змінюватись в залежності від умов корозійного процесу та природи металу, що розглядається.

Таким чином, в залежності від типу металу та виду середовища, пасивація може бути викликана як адсорбцією кисню на окремих точках поверхні (або утворенням суцільних моно- або поліхемосорбованих шарів кисню), так і захисними бар'єрними шарами.

### 1.3 Основні марки хромистих сталей, що використовуються в умовах ВТО та атмосферних умовах

Вітчизняна металургійна промисловість використовує широкий спектр феритних корозійностійких сталей, які забезпечують технічні вимоги різних галузей машинобудування. До основних із них належать сталі 08X18T1, 04X17T, 15X25T, X25, 06X18ч. Вміст хрому в цих сталях не нижче 13 % [36–39].

Феритні хромисті сталі мають високу корозійну стійкість в різних газових та рідких середовищах: кисні повітря, продуктах горіння різних палив, азотній кислоті, водних розчинах аміаку та інш. Корозійна стійкість цих сталей підвищується зі збільшенням вмісту хрому та зменшенням вмісту вуглецю та азоту.

В закордонній практиці розроблені сталі з низьким сумарним вмістом вуглецю та азоту (0,025 – 0,035 %), додатково леговані кремнієм та титаном типу AISI – 316, YUS – 409D, DIN WNR 4512, що дозволило суттєво знизити вміст хрому до 10 – 12 %, при збереженні рівня жаростійких та корозійностійких властивостей [2, 3].

## 1.4 Характеристики жаростійкості металевих матеріалів

Процес окислення є край небажаним для техніки, так як може викликати зниження працездатності (а в деяких випадках і аварії) машин та агрегатів. Тому в практичних цілях повинні використовуватись металеві матеріали, які здатні добре чинити опір окисленню, тобто які мають високу жаростійкість. Щоб судити про жаростійкість металів, необхідно вміти правильно розраховувати характеристики цієї властивості металу.

Глибинний показник корозії  $\Pi$  пропонується для характеристики глибини корозійного руйнування металу за певний час [мм/рік]. Під глибинним показником корозії розуміється середня її швидкість, яка вираховується в певних одиницях.

Від'ємний показник зміни маси металу:

$$K_{\text{м}} = \frac{m_0 - m}{St}, \quad (1.1)$$

де  $(m_0 - m)$  – втрата маси металу за час випробування  $t$ , яка визначається за різницею маси  $m_0$  та маси металу після видалення продуктів корозії  $m$ ;

$S$  – поверхня металу, що окислюється.

Позитивний показник зміни маси металу:

$$K'_{\text{м}} = \frac{m - m_0}{St}, \quad (1.2)$$

де  $(m - m_0)$  – збільшення маси металу за час  $t$ , яке викликане утворенням плівки окислів.

Із рівнянь (1.1) та (1.2) видно, що обидва показники зміни маси, які кількісно виражають зміну маси металу, яке віднесене до одиниці часу та

одиниці поверхні, характеризують також як і глибинний показник, швидкість корозійного процесу.

Тому між показниками  $\Pi$  та  $K_m$  існує зв'язок та вони можуть бути перераховані один в другого за наступною формулою:

$$\Pi = \frac{K_m}{\rho} 8,76, \quad (1.3)$$

де  $\rho$  – густина металу, г/см<sup>3</sup>;

$K_m$  – вимірюється в г/(м<sup>2</sup>год).

До числа показників корозії, які також характеризують швидкість процесу, відноситься і об'ємний показник:

$$K_{об'єм} = \frac{V}{St}, \quad (1.4)$$

де  $V$  – об'єм кисню, що поглинається, який приведений до нормальних умов (температура 0 °С, тиск 760 мм рт. ст.);

$t$  – час окислення металу;

$S$  – поверхня металу, що окислюється.

Рекомендуються для використання на практиці показники корозії, які називають, як і  $\Pi$ , глибинними (ГОСТ 6130 – 71), але які не відносяться до одиниці часу, і які не характеризують швидкість корозії. Таким показником є глибина проникнення корозії:

$$h = \frac{\Delta q}{\rho 100}, \quad (1.5)$$

де  $\Delta q$  – зменшення маси, яке віднесене до одиниці площі поверхні металу, що окислюється, мг/см<sup>2</sup>;

$\rho$  – густина металу, г/см<sup>3</sup>.

Розрахована за формулою глибина проникнення корозії визначається в міліметрах.

Величину глибини проникнення корозії за ГОСТ 6130 – 71 рекомендується також визначати за експериментальними даними, які характеризують збільшення маси металу:

$$h = \frac{C\Delta q}{\rho 100}, \quad (1.6)$$

де  $\Delta q$  – збільшення маси, яке віднесено до одиниці площі поверхні металу, що окислюється, мг/см<sup>2</sup>;

$C$  – коефіцієнт, який характеризує співвідношення величин збільшення та зменшення маси даного металу:

$$C = \frac{\Delta q_+}{\Delta q_-}, \quad (1.7)$$

Разом з тим глибину проникнення корозії рекомендується визначати не тільки за розрахунками, але і безпосередньо визначенням зміни розмірів металевого зразка, якщо це можливо.

Приведені вище показники корозії характеризують рівномірноплиний корозійний процес. В деяких випадках спостерігається нерівномірна локальна корозія металу, яка виражається в утворенні на його поверхні виразок або в появі міжкристалітного руйнування. Такий вид корозії буває, наприклад, на сталях, які працюють при високій температурі в окисному газовому середовищі та з золотими відкладеннями, які утворюються при згоранні деяких видів палива (мазут, вугілля). Міжкристалітній корозії піддаються також деякі нікелеві сплави в газовому середовищі, яке містить SO<sub>2</sub>. Глибину виразок та міжкристалітної корозії металів вимірюють за допомогою мікроскопів на металографічних

шліфах. Глибину виразок вимірюють, крім того, спеціальними пристроями (глибиномірами та інш.).

Крім перерахованих найбільш використовуваних показників жаростійкості, іноді використовують для оцінки дії на метали окисного газового середовища інші показники, які можна віднести до спеціальних: механічний, резистометричний та відбивний (оптичний). Механічний показник корозії характеризує зміну будь-якого показника механічних властивостей металу внаслідок дії на нього окисного середовища. До механічних показників відносяться міцносний

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\sigma_0} - \sigma_{\sigma}}{\sigma_{\sigma_0}} \quad (1.8)$$

та пластичний показник корозії

$$K_{\delta} = \frac{\delta_0 - \delta}{\delta_0}, \quad (1.9)$$

де  $\sigma_{\sigma_0}$  та  $\delta_0$  – границя міцності (тимчасовий опір розриву) та відносне видовження металу в вихідному стані;

$\sigma_{\sigma}$  та  $\delta$  – ті ж характеристики механічних властивостей металу після його окислення.

Резистометричний показник характеризує зміну електричного опору зразка металу, що окислюється:

$$K_R = \frac{R_0 - R}{R_0}, \quad (1.10)$$

де  $R_0$  – початковий електричний опір зразка;

$R$  – його опір після окислення за час  $t$ .

Відбивний (оптичний) показник корозії визначає зміну відбивної здатності поверхні металу, яке відбувається в результаті його окислення. Цей показник придатний для характеристики лише початкових стадій корозії, які не супроводжуються сильною зміною рельєфу поверхні металу. Кількісно відбивний показник корозії визначають у вигляді відношення фотоструму  $I$  для поверхні зразка, що досліджується, та фотоструму для стандартного дзеркала  $I_0$ , які вимірюють на спеціальній установці, яка перетворює енергію відбитих променів в електричну енергію:

$$K_{\text{відбл}} = \frac{I}{I_0}. \quad (1.11)$$

Всі кількісні характеристики жаростійкості (або характеристики корозії металів в окисному газовому середовищі) рекомендується розбити на чотири групи та ввести наступні найменування, позначення та розрахункові формули цих характеристик:

1. Характеристики рівномірної корозії металу.
1. Характеристики ступеню рівномірної корозії.

Питома втрата (зменшення) маси металу:

$$q = \frac{m_0 - m}{S}, \quad (1.12)$$

де  $m_0$  – початкова маса металевих зразка;

$m$  – його маса в будь-який момент часу  $t$  після повного видалення продуктів окислення;

$S$  – площа поверхні, що окислюється (приймається, що площа не змінюється в процесі окислення).

Глибина рівномірної корозії металу:

$$h = \frac{q}{\rho} = \frac{m_0 - m}{\rho S}, \quad (1.13)$$

де  $\rho$  – густина металу.

Питомий приріст маси металу (за рахунок утворення плівки окислів):

$$q_* = \frac{m_* - m_0}{S}, \quad (1.14)$$

де  $m_*$  – маса металевого зразка разом зі всіма продуктами його окислення, які утворюються на його поверхні за час  $t$ .

Товщина окисної плівки на металі:

$$h_* = \frac{q + q_*}{\rho_*} = \frac{m_* - m}{\rho_* S}. \quad (1.15)$$

## 2. Характеристики інтенсивності рівномірної корозії.

а) Характеристики істинної (миттєвої) швидкості корозії металу. Ці характеристики визначають величину швидкості корозії в даний період часу  $t$ .

Істина швидкість втрати (зменшення) маси металу:

$$v_q = \frac{dq}{dt} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dm}{dt}. \quad (1.16)$$

Істина швидкість проникнення корозії в метал

$$v_h = \frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{\rho S} \frac{dm}{dt}, \quad (1.17)$$

Істина швидкість приросту (збільшення) маси металу

$$v_{q^*} = \frac{dq^*}{dt} = \frac{1}{S} \frac{dm^*}{dt} \quad (1.18)$$

Істина швидкість росту окисної плівки

$$v_{h^*} = \frac{dh^*}{dt} = \frac{1}{\rho^*} \left( \frac{dq}{dt} + \frac{dq^*}{dt} \right) = \frac{1}{\rho^* S} \left( \frac{dm}{dt} + \frac{dm^*}{dt} \right) \quad (1.19)$$

б) Характеристики середньої швидкості корозії металу. Характеристики цієї групи визначають величину швидкості (інтенсивності) корозії, усереднену для інтервалу часу  $t_2 - t_1$ , де  $t_2 \neq t_1$ .

Середня швидкість втрати (зменшення) маси металу

$$\bar{v}_g = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = \frac{m_2 - m_1}{S(t_2 - t_1)} \quad (1.20)$$

Середня швидкість проникнення корозії в метал

$$\bar{v}_h = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} \quad (1.21)$$

в) Середня швидкість приросту (збільшення) маси металу

$$\bar{v}_{q^*} = \frac{q_{*2} - q_{*1}}{t_2 - t_1} = \frac{1}{S} \cdot \frac{m_{*2} - m_{*1}}{t_2 - t_1} \quad (1.22)$$

Середня швидкість росту окисної плівки

$$\bar{v}_{h^*} = \frac{h_{*2} - h_{*1}}{t_2 - t_1} = \frac{q_2 - q_1 + q_{*2} - q_{*1}}{\rho^* (t_2 - t_1)} = \frac{m_1 - m_2 + m_{*2} - m_{*1}}{\rho^* S (t_2 - t_1)} \quad (1.23)$$

## II. Характеристики локальної корозії металу.

### 1. Характеристики ступеня локальної корозії.

Максимальна глибина виразок:

$$h_{B \max} > h_{B i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1.24)$$

де  $h_{B i}$  – будь-яка виміряна глибина виразок на металі;

$N$  – кількість виміряних виразок.

Середня глибина виразок

$$\bar{h}_B = \frac{h_{B_1} + h_{B_2} + \dots + h_{B_N}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{B_i}. \quad (1.25)$$

Густина розташування виразок на поверхні металу

$$\rho_B = N_B/S, \quad (1.26)$$

де  $N_B$  – кількість виразок на окисненій поверхні металу, яка має площу  $S$ .

Максимальна глибина міжкристалітної корозії металу:

$$h_{mk \max} > h_{mk i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1.27)$$

де  $N$  – кількість вимірювань глибини міжкристалітної корозії.

Середня глибина міжкристалітної корозії металу

$$h_{mk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{mk_i}. \quad (1.28)$$

### 2. Характеристики інтенсивності локальної корозії.

Середня швидкість росту максимально глибоких виразок

$$\bar{U}_{g_{max}} = \frac{h_{g_{max,2}} - h_{g_{max,1}}}{t_2 - t_1} \quad (1.29)$$

Середня швидкість росту виразок

$$\bar{U}_h = \frac{h_{h,2} - h_{h,1}}{t_2 - t_1} \quad (1.30)$$

Середня швидкість росту максимально глибоких осередків міжкристалітної корозії

$$\bar{U}_{sk_{max}} = \frac{h_{sk_{max,2}} - h_{sk_{max,1}}}{t_2 - t_1} \quad (1.31)$$

Середня швидкість росту шару міжкристалітної корозії

$$\bar{U}_{sk} = \frac{h_{sk,2} - h_{sk,1}}{t_2 - t_1} \quad (1.32)$$

III. Характеристики пошкодження підокисного шару металу.

1. Характеристики ступеня пошкодження підокисного шару.

Середня товщина підокисного шару металу, який збіднений легувальними елементами:

$$\bar{h}_{\lambda\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{\lambda\gamma,i} \quad (1.33)$$

де  $h_{\lambda\gamma,i}$  – товщина підокисного шару в окремих ділянках поверхні металу;

$N$  – кількість вимірів товщини шару.

Середня товщина шару внутрішнього окислення металу:

$$\bar{h}_{BO} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{BOi} \quad (1.34)$$

де  $h_{BOi}$  – товщина шару внутрішнього окислення в окремих ділянках поверхні металу;

$N$  – кількість вимірів товщини шару.

## 2. Характеристики інтенсивності пошкодження підокисного шару.

Середня швидкість росту підокисного шару металу, який збіднений легувальними елементами:

$$\bar{v}_{\text{ЛТ}} = \frac{h_{\text{ЛТ}_2} - h_{\text{ЛТ}_1}}{t_2 - t_1} \quad (1.35)$$

Середня швидкість утворення шару внутрішнього окислення металу:

$$v_{BO} = \frac{h_{BO_2} - h_{BO_1}}{t_2 - t_1} \quad (1.36)$$

Що стосується одиниць вимірювання введених вище характеристик жаростійкості металів, то вони можуть бути різними. В система СІ одиницею виміру характеристик глибини корозії ( $h$ ,  $h^*$ ,  $h_{B \text{ max}}$ ,  $\bar{h}_B$ ,  $h_{MK \text{ max}}$ ,  $\bar{h}_{\text{ок}}$ ,  $h_{BO}$ ) є метр (м); для величин, які визначають швидкість цих характеристик ( $v_h$ ,  $v_k$ ,  $v_{h^*}$ ,  $v_{h^*}$ ,  $v_{B \text{ max}}$ , і інш.) одиницею є метр в секунду (м/с); для питомих величин корозії  $q$  та  $q^*$  – кілограм на метр квадратний ( $\text{кг/м}^2$ ); для швидкості зміни питомих величин ( $v_q$ ,  $v_{q^*}$ ,  $\bar{v}_q$ ,  $\bar{v}_{q^*}$ ) – кілограм на метр квадратний і на секунду [ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ]; механічні, резистометрична та відбивальна характеристики є безрозмірними або вимірюються у відсотках.

Для практичного використання в техніці більш зручними є наступні одиниці вимірювання, які мають наглядність, і успішно використовуються до сих пір: для характеристик глибини корозії – міліметр (мм); для величин

швидкості зміни характеристик глибини корозії – міліметр на рік (мм/рік); для питомих величин – грам на сантиметр квадратний ( $\text{г/см}^2$ ); для швидкості зміни питомих величин – грам на сантиметр квадратний і на рік [ $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{рік})$ ]. Однією із переваг використання перерахованих вище одиниць є також близькість чисельних значень характеристики глибини рівномірної корозії  $h$  та характеристики питомої втрати маси  $q$  для заліза, нікелю та широко використовуваних в техніці сталей та сплавів на нікелевій основі.

Вище наведена систематизація всіх характеристик, які можуть бути використані при дослідженні жаростійкості матеріалів. Але, як правило, визначається в таких дослідженнях лише частина цих характеристик. Зазвичай це характеристики ступеня та інтенсивності рівномірної корозії (групи I та II), так як в окисних газових середовищах локальна корозія металів, які використовуються в техніці, рідко відбувається, а визначення спеціальних характеристик жаростійкості необхідно лише для вирішення окремих, вузьких задач, а не для масової оцінки жаростійкості металів.

З метою співставлення жаростійкості різних металів іноді використовують десятибальну шкалу (ГОСТ 5272 – 50). За цією шкалою метали поділені на групи стійкості в залежності від величини їх середньої швидкості корозії. Використання таких шкал корисно лише для угруповання матеріалів за рівнем їх жаростійкості при систематизації отриманих експериментальних даних.

Характеристики жаростійкості, які наведені вище, дають можливість достатньо добре описати опір високотемпературному окисленню металевих конструкційного матеріалу. Але враховуючи те, що зміна цих характеристик в часі та в зв'язку зі зміною температури є неоднаковою у різних матеріалів, то більш повне співставлення жаростійкості матеріалів може бути виконано не на підставі окремих кількісних значень  $q$ ,  $h$ ,  $v_q$ ,  $v_h$  та інш., а за кінетичним та температурним залежностям окислення (наприклад,  $\lg q - \lg t$ ,  $\lg q - 1/T'$  та інш.).

### 1.5 Можливі методи розрахунку жаростійкості металів

Задачею розрахунку жаростійкості металів є визначення кількісних характеристик їх жаростійкості. При цьому дослідників цікавить перш за все характеристики рівномірної корозії; серед них найбільшу цікавість для техніки представляє питома втрата маси, або глибина корозії металу за заданий час – ресурс експлуатації машини або агрегату. Іноді важливо також знати швидкість корозії металу (зазвичай на стадії порівняння властивостей конструкційних матеріалів для вибору найбільш придатного з них). Видно, що від точності методів розрахунку жаростійкості матеріалів в значній мірі залежить працездатність промислових установок. Нижче описуються існуючі методи розрахунку жаростійкості при постійній та змінній температурі.

#### 1.5.1 Розрахунок жаростійкості при постійній температурі

Існуючі методи розрахунків можна поділити на аналітичні та графічні. До аналітичних методів відноситься визначення показників корозії – глибинного, від'ємного та позитивного показників зміни маси металу. Хоча призначення цих показників – використання їх для порівняння жаростійкості різних матеріалів, часто їх використовують для розрахунку корозії за певний проміжок часу. Такий розрахунок проводиться зазвичай шляхом множення відповідного показника на величину проміжку часу – термін служби металу в корозійному середовищі. Отримана величина уявляє з себе глибину корозії, питоми втрату та збільшення маси металу – в залежності від використаного при розрахунку показника – за весь період експлуатації.

Але очевидно, що такий метод дозволяє правильно розрахувати корозійне руйнування металу лише у випадку дотримання лінійного кінетичного закону

окислення. Якщо закон окислення металу параболічний (який частіше за все спостерігається на практиці) або логарифмічний, то отримана розрахункова величина буде заниженою в порівнянні з фактичною при значеннях часу менших, ніж яке використовується для визначення показника, та завищеною при значеннях часу вищих, ніж проміжок часу, який використовується для підрахунку показника.

Н.П. Жук пропонує розраховувати жаростійкість за формулами, які об'єднують кінетичну та температурну закономірності окислення металів. Так, для металів, які характеризуються лінійною кінетичною закономірністю окислення, розрахунок глибини рівномірної корозії рекомендується проводити за формулою

$$h = A_1 e^{\frac{Q_1}{RT}} t = A_1 10^{\frac{b_1}{T}} t, \quad (1.37)$$

де  $A_1$  та  $b_1$  – сталі коефіцієнти, які залежать від властивостей металу та окислювального газового середовища.

Для металів, кінетична закономірність окислення яких параболічна, розрахунок глибини корозії рекомендується за формулою

$$h = (A_2 e^{\frac{Q_2}{RT}} t)^{1/n} = (A_2 10^{\frac{b_2}{T}} t)^{1/n}, \quad (1.38)$$

де  $A_2$  та  $b_2$  – сталі коефіцієнти, які також залежать від властивостей металу та окисного середовища.

Розрахунок глибини корозії металів за формулами (1.37) та (1.38) проводиться шляхом підстановки в них заданих значень температури та часу, які характеризують умови окислення металу. Значення сталих коефіцієнтів, які входять до формул, визначаються попередньо за експериментальними даними. Коефіцієнти  $A_1$  та  $A_2$  та енергію активації  $Q_1$  та  $Q_2$  рекомендується визначати із графіка для константи швидкості окислення  $\lg k - 1/T$ , який побудовано за

експериментальними даними. При цьому можна скористатися співвідношеннями:

$$\lg A = \lg k \text{ при } 1/T = 0, \quad (1.39)$$

$$Q = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.40)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу температурної залежності константи швидкості окислення до вісі  $1/T$ .

Таким чином, сталі  $A_1$  та  $A_2$  визначають за величиною відрізка, який відсікається на вісі  $\lg k$  на початку координат температурною залежністю окислення. Енергію активації  $Q_1$  та  $Q_2$  та відповідно сталі  $b_1$  та  $b_2$  визначають за тангенсом кута нахилу температурної залежності окислення. Їх також можна визначити за формулою:

$$\lg \frac{k_2}{k_1} = \frac{Q}{2,3R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (1.41)$$

де  $k_1$  та  $k_2$  – величини константи швидкості окислення на температурній залежності окислення при значеннях температури  $T_1$  та  $T_2$  відповідно.

Значення показника параболи  $n$ , який входить до формули (1.38), рекомендується визначати за нахилом експериментальної кінетичної залежності окислення в координатах  $\lg q - \lg t$ .

Недоліком аналітичного методу Н.П. Жука є складність та трудомісткість розрахунку, а також можливість систематичних похибок, так як точні значення коефіцієнтів в формулах (1.37) та (1.38) складно визначити. Із-за відсутності експериментальних значень цих коефіцієнтів навіть для найбільш використовуємих конструкційних матеріалів аналітичний метод залишається недоступним для конструкторів та технологів.

Другу групу методів розрахунку жаростійкості при постійній температурі утворюють графічні методи. Ряд дослідів рекомендує представляти

експериментальні данні за кінетикою окислення металів у вигляді залежностей  $q$  –  $\sqrt{t}$  або  $q^2 - t$ . Якщо кінетична закономірність є квадратичною параболою, то в таких координатах результати дослідів розташовуються на прямій лінії. Природно, що ця залежність може бути використана для розрахунків величин  $q$  в області інтер- та екстраполяції, якщо квадратична параболічна залежність при даній температурі зберігається у всьому цікавлячому нас інтервалі значень часу. Але, як правило, рідко величина показника параболи для технічних матеріалів дорівнює 2. Тому емпірична залежність, хоча і може здаватися лінійною в координатах  $q^2 - t$ , так як діапазон витримок зразків зазвичай недостатньо велик, при екстраполяції дослідницьких даних за цією залежністю може бути допущена велика похибка.

В зв'язку з цим більш надійним є представлення експериментальних даних в логарифмічних координатах  $\lg q - \lg t$ . В цьому випадку дослідні точки розташовуються на прямій лінії при будь-якому значенні показника параболи в кінетичній закономірності окислення металу. Використання логарифмічних координат для представлення експериментальних даних та розрахунків за цією емпіричною залежністю питомої втрати маси або інших характеристик жаростійкості в області інтер- та екстраполяції є достатньо точним методом розрахунку жаростійкості. Недоліком такого методу є придатність його лише для тієї температури, при якій визначена кінетична залежність окислення металу.

Для розрахунку характеристик жаростійкості в декотрому інтервалі температури при заданому значенні часу рекомендовано використовувати залежність  $\lg q - 1/T$ , яка побудована за експериментальними даними. Пряма лінія, яку отримуємо в цих координатах, дає можливість визначати величини, які необхідно знайти, в областях інтер- та екстраполяції за температурою. При цьому слід мати на увазі, що на температурній залежності окислення можуть бути перегини, які обумовлені структурними та іншими змінами в окисній плівці або в металі. Тому використання залежності  $\lg q - 1/T$  допустимо лише в обмеженому температурному інтервалі, де закономірність окислення не змінюється.

Існує пропозиція, яка об'єднує частково обидва описаних вище методів графічного визначення корозійного пошкодження металевих матеріалів. А.І. Ритвінський, П.А. Антикайн та В.М. Зусман рекомендують використовувати для визначення глибини корозії металів номограми, які уявляють з себе серію залежностей  $\lg h - \lg t$ , які побудовані для декількох температур з інтервалом 10 град і для діапазону часу 1000 – 100000 год.

Номограму будують наступним чином. Експериментально досліджують корозію металу приблизно при трьох температурах шляхом витримок різної тривалості. На підставі цих даних будують кінетичні залежності  $\lg q - \lg t$  та температурну  $\lg k - 1/T$ . за цими емпіричними залежностями визначають сталі коефіцієнти  $a$ ,  $b$  та  $c$  в рівнянні окислення металу

$$\lg q = a - b/T + c \lg t. \quad (1.42)$$

Потім, використовуючи це рівняння, розрахунковим шляхом будують номограму  $\lg h - \lg t$  для інтервалу температур, який розташовано між крайніми значеннями температури в експерименті. Перерахунок величин втрати маси в величини глибини корозії проводять, виходячи із значення густини металу. Наприклад, для перлітних сталей такий перерахунок роблять за формулою

$$h = 1,28 q, \quad (1.43)$$

де  $h$  дано в мм,

$q$  – в г/см<sup>2</sup>.

Метод номограм має ряд недоліків. По-перше, із-за малої кількості експериментальних даних та, як наслідок, із-за недостатньо коректного розрахунку коефіцієнтів в температурній залежності окислення металу в номограмах можуть бути неточності. По-друге, метод не придатний для екстраполяції за температурою, а відсутність експериментальних точок на номограмі робить неможливим оцінку відповідності розрахункових величин та

експериментальних. По-третє, відсутні будь-які данні про точність величин, що визначаються із монограми.

Оцінюючи в цілому існуючі методи розрахунку жаростійкості металів при постійній температурі, слід відмітити, що графічні методи мають більшу наглядність, ніж аналітичні, і не потребують величезних розрахунків. Недоліком графічних методів є дискретність величин, що визначаються за їх допомогою: так, за кінетичними залежностями інтер- та екстраполяцію можна проводити безперервно тільки за часом, а за температурою – дискретно; використання же температурних залежностей окислення не дозволяє проводити неперервної інтерполяції за часом.

### 1.5.2 Розрахунок жаростійкості при змінній температурі

Методів розрахунку жаростійкості металів при змінній температурі запропоновано порівняно небагато, зокрема всі ці методи є аналітичними.

В.Ф. Копитов розробив метод розрахунку окислення сталей при нагріванні в печах з окисним газовим середовищем. Ніяких специфічних особливостей, які пов'язані з умовами нагрівання сталей в печах, цей метод не містить і може розглядатися як маючий більш загальний характер. Метод В. Ф. Копитова придатний тому і для розрахунку окислення будь-яких металів при змінній температурі. Цей метод є наближеним, так як істина крива зміни температури замінюється ступінчатою: приймається, що нагрівання металу проходить шляхом ряду послідовних витримок при значеннях температури  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ , при цьому відповідні витримки дорівнюють  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ . Розрахунок окислення металу проводять при уявленні, що зберігається квадратична параболічна закономірність окислення

$$q_1 = q_{01} \sqrt{t_1}, \quad (1.44)$$

де  $q_1$  – питоме збільшення маси металу за час  $t_1$  при температурі  $T_1$ ;

$q_{01}$  – питоме збільшення маси металу за одиницю часу (наприклад, за 1 год., якщо  $t$  вимірюється в годинах) при температурі  $T_1$ .

Час  $t_1'$ , який необхідний для утворення такої ж кількості окалини  $q_1$  при температурі другої витримки  $T_2$ , можна визначити із виразу

$$q_1 = q_{02} \sqrt{t_1'}, \quad (1.45)$$

де  $q_{02}$  – питоме збільшення маси металу за одиницю часу при температурі  $T_2$ .

Отримаємо

$$t_1' = \left( \frac{q_1}{q_{02}} \right)^2. \quad (1.46)$$

Щоб визначити загальну кількість окалини, яка утворилася за перші дві температурні сходинки  $T_1$  та  $T_2$ , слід провести розрахунок окислення за формулою (1.44), розраховуючи, що весь процес окислення проходив при температурі  $T_2$  в проміжку часу  $t = t_1' + t_2$ :

$$q = q_{02} \sqrt{t_1' + t_2}. \quad (1.47)$$

Із формули (1.47) слідує, що  $t_1'$  під знаком кореня враховує утворення окисної плівки під час витримки на попередній температурній сходинці.

Далі для наступних температурних сходінок розрахунок ведуть так же, як і для другої сходинки. Значення збільшення маси металу, отримане таким

розрахунком для  $n$ -ої температурної сходинки, буде загальним збільшенням його маси при нагріванні при змінній температурі.

Недоліком розглянутого методу є: придатність лише для ступінчатих режимів зміни температури або для режимів близьких до них; використання квадратичної параболічної закономірності окислення, яка рідко зберігається для технічних металевих матеріалів; велика трудомісткість розрахунків; необхідність попереднього експериментального визначення великої кількості сталих  $q_{01}, q_{02}, q_{03}, \dots, q_{0n}$ .

В.І. Губінський, А.Н. Мінаєв та Н.Ю. Тайц запропонували метод розрахунку маси окалини, яка утворюється при нагрівання або охолодження (з високої температури) металу. Метод розроблений для окислення заліза та сталей, але, як вважають автори, придатний і для інших металів при використанні індивідуальних для цих металів констант.

Для виведення розрахункового рівняння автори виходять із закону Фіка у формі:

$$\frac{dq}{dt} = D \frac{dc}{dx} = D_* \frac{dc_*}{dx}, \quad (1.48)$$

де  $D$  та  $D_*$  – коефіцієнти дифузії в окалині заліза та кисню відповідно;

$dc/dx$  та  $dc_*/dx$  – градієнти концентрації в окалині заліза та кисню.

Рівняння (1.48) автори вирішують в представленні сталості граничних концентрацій заліза та кисню і припускаючи, що розподіл концентрації заліза та кисню в окалині описується параболічними рівняннями. Далі, використовуючи емпіричну експоненціальну залежність константи швидкості окислення від температури та вважаючи, що нагрівання (охолодження) металу проходить з постійною швидкістю  $\omega$ :

$$T = T_0 + \omega t, \quad (1.49)$$

де  $T_0$  – початкова температура.

Автори методу отримують наступну формулу, яка рекомендується ними для розрахунку питомої маси окалини, яка утворюється на металі:

$$(q^2 - q_0^2) \frac{\omega}{k_0 B} = \int_{T_0}^{T_N} \exp(-1/y) dy = |\Psi|_{T_0}^{T_N}, \quad (1.50)$$

де  $q_0$  – питома маса окалини в початковий момент часу;

$k_0$  – передекспоненціальний коефіцієнт в температурній залежності константи швидкості окислення:

$$B = Q/R;$$

$$y = T/B.$$

З метою полегшення розрахунків за формулою (1.50) автори вираховували методом приблизного інтегрування значення безрозмірної функції  $\Psi$  для різних значень  $B/T$  та побудовували залежність  $\Psi - B/T$ . Рівняння (1.50) та залежність  $\Psi - B/T$  автори методу рекомендують для розрахунку характеристик окислення металів при їх нагріванні або охолодженні не лише з постійною швидкістю зміни температури, але і при будь-якому іншому температурному режимі. Це становиться можливим, якщо температурну криву нагрівання (охолодження) металу розбити на  $N$  інтервалів, в межах яких швидкість зміни температури можна вважати постійною  $\omega_i$ . Визначивши за залежністю  $\Psi - B/T$  для кожного інтервалу температури відповідні значення функції  $\Psi_i$ , величину питомого збільшення маси металу можна вирахувати для всього процесу нагрівання (охолодження) за формулою:

$$q = \sqrt{q_0^2 + k_0 B \sum_{i=1}^N \frac{\Psi_i}{\omega_i}}, \quad (1.51)$$

Автори вважають, що розроблений ними метод більш точний, ніж метод В.Ф. Копитова, так як спосіб ділення температурної кривої на інтервали з постійною швидкістю нагрівання (охолодження) дозволяє краще відтворити реальний режим нагрівання, ніж спосіб ділення на сходинки з постійною температурою. Тим не менш, метод В.І. Губинського є наближеним, що обумовлено рядом припущень при виведенні формул (1.50) та (1.51), наближеним вирахуванням функції  $\psi$  та наближеним уявленням температурного режиму окислення у вигляді інтервалів з постійною швидкістю нагрівання (охолодження). Недоліки цього методу складаються також в необхідності визначення констант металу  $k_0$  та  $B$  і в значній трудомісткості розрахунків.

В.М. Зусман, А.І. Ритвінський та П.А. Антикайн запропонували метод розрахунку жаростійкості металів при змінній температурі, який заснований на введенні поняття еквівалентного часу. Цей метод, як і метод В.Ф. Копитова, передбачає приведення реального режиму зміни температури металу, що окислюється, до ступінчатого з витримками тривалістю  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  при температурах  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ , які відповідають середній температурі для кожного інтервалу, на які розділений весь діапазон зміни температури.

Далі, одна із цих температур, наприклад  $T_1$ , обирається у якості еквівалентної (обрано може бути будь-яке значення температури  $T_i$ ). Це означає, що весь процес окислення розглядається як такий, що проходить при постійній температурі  $T_1$ , щоб можна було визначити питому втрату маси металу при еквівалентній температурі, необхідно реальні інтервали часу  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  перетворити в еквівалентні їм значення, які викликають при температурі  $T_1$  таке ж окислення металу, як і при температурах  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ .

Еквівалентний час можна розрахувати наступним чином. Прирівняємо значення питомої втрати маси металу при температурі  $T_1$  за час  $t_1$  та при будь-якій іншій температурі  $T_i$  за час  $t_i$ , вважаючи, що окислення підкорюється параболічній кінетичній закономірності

$$q_1^n = q_i^n, \quad (1.52)$$

або

$$k_1 t_1 = k_2 t_2, \quad (1.53)$$

Звідси

$$t_2 = t_1 \frac{k_1}{k_2}. \quad (1.54)$$

Визначимо відношення констант окислення в формулі (1.54), використовуючи температурні залежності цих величин:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{k_{02} \exp(-Q/RT_2)}{k_{01} \exp(-Q/RT_1)}. \quad (1.55)$$

Логарифмуючи (19) та вважаючи  $k_1 = 1$ , отримаємо

$$\lg k_2 = \frac{Q}{2.3R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}. \quad (1.56)$$

Формула (1.56) уявляє з себе вираз для визначення коефіцієнту  $k_2$  перерахунку значень реального часу  $t_2$  в еквівалентне йому значення часу  $t_1$  при температурі  $T_1$ . Насправді, враховуючи рівнство  $k_1 = 1$ , із формули (1.54) бачимо, що для перетворення часу  $t_2$  в  $t_1$  потрібно лише помножити першу величину на коефіцієнт перерахунку  $k_1'$ , який визначається із співвідношення (1.56). Здійснюючи такі операції зі всіма інтервалами часу, величину сумарного еквівалентного часу окислення металу визначають у вигляді суми

$$t_{\text{екв}} = k_1' t_1 + k_2' t_2 + \dots + k_n' t_n = \sum_{i=1}^n k_i' t_i. \quad (1.57)$$

За знайденим сумарним еквівалентом часу та експериментально визначеній кінетичній залежності  $\lg q - \lg t$  при температурі  $T_1$  знаходять шукану величину втрати маси металу за весь період окислення при змінній температурі.

Метод еквівалентного часу має суттєві переваги перед двома іншими вищерозглянутими методами: для користування ним необхідне визначення лише однієї константи  $Q$  та потребується менша кількість розрахунків. Але цей метод, як і будь-який аналітичний, трудомісткий. Недоліком його є також не розробленість способів точного визначення величини  $Q$  та відсутність умов, які визначають вибір того чи іншого значення температури в якості еквівалентної, хоча від цього також залежить точність розрахунку корозійного пошкодження металу.

Таким чином, існуючі методи розрахунку характеристик жаростійкості при змінній температурі мають недоліки, іноді досить суттєві.

Оцінюючи в цілому усі запропоновані методи розрахунку жаростійкості металів при постійній та змінній температурі, слід зробити висновки, що вони доки ще недостатньо розроблені. Наряду з тим що ці методи в багатьох випадках трудомісткі, слід відмітити відсутність вказівок у авторів методів на їх точність та границі використання. Галузь використання методів зазвичай дуже вузька, вони дозволяють визначити лише одну характеристику жаростійкості: втрату (збільшення) маси або глибину корозії металу. Складність розрахунків жаростійкості існуючими методами є причиною їх недосяжності для широкого кола інженерів, які не є спеціалістами в області корозії, але які цікавляться жаростійкістю металів [4].

Отже, одним із найбільш ефективних способів захисту сталей та сплавів від газової та атмосферної корозії є їх легування елементами, які утворюють на поверхні металів щільні захисні оксидні плівки, при високотемпературному окисленні, та пасивні плівки в умовах атмосферної корозії.

Основним легуючим елементом, який підвищує жаростійкість та корозійну стійкість сплавів на основі заліза є хром. Цей елемент утворює при

високотемпературному окисленні металу тугоплавкий оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та підвищує пасивність металу в атмосферних умовах.

До перспективних матеріалів відносять феритні хромисті та хромоалюмінієві сталі (13 – 28 % Cr). Але ці сталі мають великий недолік: вони можуть окрихчуватися в процесі технологічних нагрівань та тривалих витримках при підвищених температурах під час експлуатації. Аустенітні жаростійкі сталі. В якості жаростійких сталей аустенітного класу головним чином використовують сталі на хромонікелевій основі. Ці сталі не мають великих переваг за жаростійкістю перед високохромистими сталями феритного класу, але вигідно відрізняються від них за рівнем механічних властивостей, в тому числі жароміцних, технологічності (здатності до глибокої витяжки, штампування, зварювання), вони також менш схильні до окрихчування після тривалих витримок при високих температурах. Недоліком сталей цього класу є їх порівняно висока вартість, використання в великих кількостях дефіцитного нікелю, низькі теплопровідність та опір газовій корозії в середовищах, які містять сірку. В якості жаростійких сплавів підвищеної жароміцності, більш надійних та майже не схильних до окрихчування, які мають високі технологічні властивості, в авіаційній промисловості (камери згорання, жарові труби) використовують залізонікелеві сплави з добавками молібдену (до 3 %), вольфраму (до 3,5 %), титану (до 1,2 %), наприклад сплав ХН38ВТ та сплав ХН28ВМАБ. Жаростійкі стопи на нікельхромовій основі (ніхроми) отримали значне поширення в якості матеріалів для роботи при 800 – 1100 °С, а при короткочасній роботі до 1200 °С.

Додаткове легування залізохромистих сплавів алюмінієм та кремнієм суттєво підвищує їх жаростійкість. Ефект досягається за рахунок утворення оксидів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$ , які разом з оксидом хрому формують на поверхні металу захисні плівки шпінельного типу.

Задачею розрахунку жаростійкості металів є визначення кількісних характеристик їх жаростійкості. При цьому дослідників цікавить перш за все характеристики рівномірної корозії; серед них найбільшу цікавість для техніки

представляє питома втрата маси, або глибина корозії металу за заданий час – ресурс експлуатації машини або агрегату. Іноді важливо також знати швидкість корозії металу (зазвичай на стадії порівняння властивостей конструкційних матеріалів для вибору найбільш придатного з них). Видно, що від точності методів розрахунку жаростійкості матеріалів в значній мірі залежить працездатність промислових установок.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖАРОСТІЙКОСТІ

### 2.1 Матеріали для порівняльних досліджень

На підставі літературних даних [36 – 39, 2, 3], серед багатьох марок сталей, які випускають вітчизняні та закордонні промисловості, визначили номенклатуру легованих сталей, які в тих чи інших випадках використовують для виготовлення деталей, які працюють в умовах високотемпературного окислення. Тому експлуатаційні характеристики сталі 08Х8СЮТч оцінювали в порівнянні з характеристиками хромистих сталей 08Х18Т1, YUS 409D, також сталь 12Х18Н10Т, яка широко використовується для таких же цілей та ХН45Ю.

Хімічний склад цих сталей наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Т1, YUS 409D, ХН45Ю, 08Х8СЮТч

| Марка сталі | Вміст елементів (% мас.) |       |         |        |        |           |        |         |
|-------------|--------------------------|-------|---------|--------|--------|-----------|--------|---------|
|             | C                        | Mn    | Si      | P      | S      | Cr        | Ni     | Ti      |
| 12Х18Н10Т   | ≤0,11                    | ≤0,43 | ≤0,56   | ≤0,03  | ≤0,009 | 18 – 20   | 9 – 11 | ≤0,81   |
| 08Х18Т1     | ≤0,08                    | ≤0,33 | ≤0,54   | ≤0,03  | ≤0,009 | 17 – 19   | ≤0,35  | ≤0,60   |
| YUS 409D    | ≤0,03                    | ≤1,00 | ≤1,00   | ≤0,04  | ≤0,030 | 10 – 12   | ≤0,50  | ≤0,30   |
| ХН45Ю       | ≤0,08                    | ≤0,80 | ≤0,80   | ≤0,03  | ≤0,020 | 18 – 20   | 44–46  | –       |
| 08Х8СЮТч    | ≤0,08                    | ≤0,60 | 1,3–1,0 | ≤0,035 | ≤0,020 | 7,0 – 8,5 | ≤0,60  | 0,3–0,6 |

## 2.2 Дослідження жаростійкості в інтервалі температур 700 – 850 °С та 1100 – 1300 °С

Жаростійкість випробовували на різних матеріалах:

- металі лабораторних плавок змінного хімічного складу при реалізації повнофакторного експерименту 2<sup>3</sup>;
- металі промислової плавки сталі 08Х8СЮТч для випробування її жаростійкості як в повітряному середовищі, так і в продуктах горіння палива;
- в порівняльних випробуваннях жаростійкості використовували зразки із промислових плавок сталей 08Х8СЮТч, 12Х18Н10Т, 08Х18Т1, YUS 409D.

Виготовлення зразків, їх підготовку та обробку результатів проводили згідно з ГОСТ 6130 – 71.

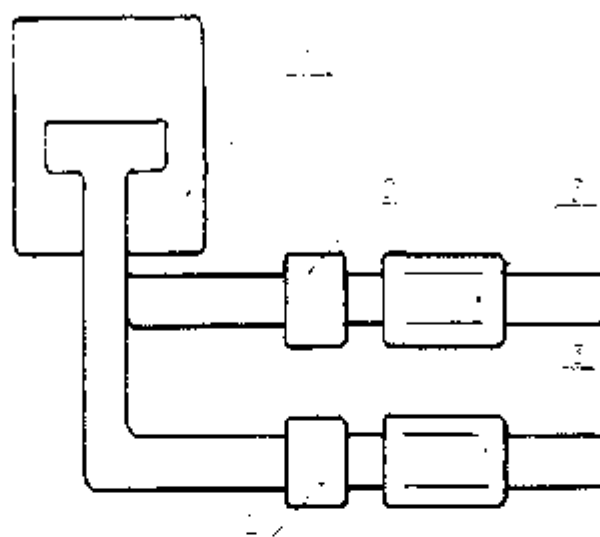
Для випробування жаростійкості матеріалу лабораторних плавок змінного хімічного складу були виготовлені по п'ять зразків розміром 50×25×3 мм. Зразки вкладали на спеціальне пристосування у вигляді етажерки, яке виключало їх доторкання. Пристосування завантажували в прогріту до 700 °С електроніч з повітряною атмосферою і витримували продовж 2000 годин.

Порівняльні випробування жаростійкості вказаних марок сталей в повітряному середовищі проводили при температурі 700 °С та витримці 2000 годин. Для кожного виду випробування готували по 5 зразків розміром 50×25×1,4 мм.

Порівняльні випробування жаростійкості в середовищі відпрацьованих газів автомобілю виконували на спеціальній установці, яка уявляє з себе стенд на базі карбюраторного двигуна автомобіля ЗІІ – 130 з підключеною до нього контролюючою апаратурою (рис. 2.1).

Зразки встановлювали в спеціальне пристосування касетного типу, яке розташовувалось в випускний колектор двигуна. Режим випробування – періодичний з загальною тривалістю 200 годин.

Для прогнозування жаростійких властивостей сталі 08Х8СЮТч за параметричним методом проводили випробування жаростійкості при температурах 550, 700, 850 °С та постійному часі витримки – 100 годин, а також при постійній температурі – 700 °С та витримках 100, 500, 1000, 2000 годин в повітряному середовищі.



1 – двигун; 2 – місце установки пристосувань зі зразками; 3 – нейтралізатори

Рисунок 2.1 – Схема установки для випробувань зразків на жаростійкість в продуктах горіння автомобільного палива

Після випробувань зразки очищали від забруднень та аналізували їх стан. Оскільки оксидні плівки виявились достатньо щільними і видалення їх з поверхні зразків було ускладнене, використовували метод розрахунку результатів за величиною привісу з визначенням глибини проникнення корозійних пошкоджень за наступними формулами:

$$q = \frac{m_1 - m_0}{S}, \quad (2.1)$$

де  $q$  – приріст маси на одиницю площі, г/см<sup>2</sup>;

$m_1, m_0$  – маси зразків до та після випробувань, г;

$S$  – площа зразка,  $\text{см}^2$ .

$$h_{\text{жв}} = \frac{10q}{\rho}, \quad (2.2)$$

де  $h_{\text{жв}}$  – кількісний показник жаростійкості – глибина проникнення корозійних пошкоджень за заданий час, мм;

$\rho$  – густина металу,  $\text{г/см}^3$ .

Розрахунки за привісом використовуються і при дослідженні жаростійкості в інтервалі температур 1100 – 1300 °С. Випробували матеріали 12Х18Н10Т, 08Х8СЮТ4 та ХН45Ю. Тиглі просушували на електричній плитці протягом 1,5 годин. Потім зважували. Після цього в них розташовували зразки із зазначених матеріалів і нагрівали до температур 1100, 1200 та 1300 °С з різною витримкою. Тиглі використовуються для того, щоб не втрачати окалину. Жаростійкість оцінюється за привісом, тому що при випробуваннях деякі зразки були зруйновані і оцінка за втратою маси була б не доцільною.

### 2.3 Металографічний аналіз

Для металографічних досліджень структури матеріалів вирізали зразки розмірами 25×10×3 мм. Мікрошліфи виготовляли із зразків, які були вирізані паралельно напрямку прокатки. Після шліфовки їх механічно полірували та щавили в реактиві Віделла. Дослідження мікроструктури проводили на микроскопі ММ – 8М при збільшеннях ×200.

## 2.4 Мікрорентгеноспектральний аналіз

В процесі високотемпературного окислення жаростійких матеріалів відбувається інтенсивна зустрічна дифузія легуючих елементів та корозійних агентів з утворенням оксидних плівок. Склад та властивості цих плівок визначають жаростійкі властивості цих матеріалів.

В виду малих товщин, оксидних плівок, які утворилися на зразках із сталі 08X8CЮТч, для їх вивчення використовували метод точкового мікрорентгеноспектрального аналізу. В роботі використовували спеціально підготовленні зразки, які пройшли термічну обробку при температурах 550 – 850 °С та витримках від 100 до 1000 годин. Випробування проводили на микрoаналізаторі MS-46 фірми „Сатеса” при пришвидшених напруженнях 13, 20, 23 кВ та струмі 10, 20, 30 мкА.

## 2.5 Випробування корозійної стійкості

В роботі проводили польові випробування та випробування пришвидшеним методом в камері сольового туману.

Для проведення польових випробувань, згідно ГОСТ 9.905 – 82 із листа сталей 08X8CЮТч, 12X18H10T, 08X18T1, YUS 409D готували зварні зразки розмірами 150×100×1,5, які отримані дуговим електрозварюванням в середовищі вуглекислого газу без присадочного матеріалу. У випробуванні приймали участь по 5 зразків кожного виду.

Підготовлені зразки підвішували на спеціальні рами, які виключали їх безпосередній контакт та експанували протягом 5 років. Кожні 6 місяців розташування рам зі зразками довільно змінювали відносно напрямків (південь, північ, захід, схід). Зміну розташування рам проводили з метою виключення

впливу вітру. Для обліку зміни зовнішнього вигляду зразків під час випробувань вели журнал спостережень, де кожні 3 місяці фіксували зміни зовнішнього вигляду кожного зразка. Випробування проводились в м. Запоріжжя, атмосфера якого згідно з ГОСТ 0.096 – 84 визначається як міська промислова.

За результатами випробувань проводили якісну оцінку корозійної стійкості.

З метою отримання оцінки корозійної стійкості в більш агресивних умовах проводили пришвидшені випробування в камері соляного туману (КСТ). Камера уявляє з себе герметичний резервуар об'ємом  $0,25 \text{ м}^3$ , який має пристрій для закачування та розпилення робочого розчину, підігрівачі, витяжний пристрій та контрольно-вимірювальну апаратуру. В якості робочого розчину використовували 5-ти % розчин NaCl з добавкою  $0,25 \text{ г/дм}^3$  оцету як катодного деполяризатора, який підтримує постійне значення  $\text{pH} = 3,1\text{--}3,3$ . температуру в КСТ під час випробувань підтримували на рівні  $35^\circ\text{C}$ , вологість – 100 %, час випробувань – 300 годин.

Випробовували ті ж матеріали, із листа яких готували зразки розмірами  $50 \times 50 \times 1,5$ . Зразки рівномірно розподіляли за об'ємом КСТ, виключаючи торкання один одного. Через кожні 30 годин, для усереднення результатів, зразки довільно розташовували за об'ємом камери. Середовище, яке створене в КСТ, згідно ГОСТ 9.906 – 84 визначається як приморська атмосфера тропічного району і відноситься до найбільш агресивному типу атмосфер.

По закінченню випробувань також проводили якісну оцінку корозійної стійкості матеріалів.

При дослідженні експлуатаційних властивостей матеріалу як лабораторних, так і промислових плавок використовувались стандартні методики, що забезпечило порівняння отриманих результатів з результатами, які були отримані в інших роботах.

Порівняльні методи випробувань жаростійкості, корозійної стійкості сталей дозволило визначити їх переваги та недоліки.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Прогнозування стійкості сталі 08Х8СЮТч в умовах газової корозії

Найбільша тривалість випробувань матеріалу на жаростійкість, протягом випробувань склала 2000 годин. В реальності заплановані терміни експлуатації виробів можуть бути набагато більшими. Спрогнозувати граничні терміни експлуатації виробів із листового металопрокату сталі 08Х8СЮТч можливо використовуючи екстраполяцію за параметричним методом. Для цього необхідно розрахувати та побудувати параметричну діаграму жаростійкості.

Для будування параметричної діаграми, на підставі отриманих при різних температурах та експозиціях в повітряному середовищі значень жаростійкості сталі 08Х8СЮТч, визначався параметр жаростійкості. Отримані данні наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики жаростійкості сталі 08Х8СЮТч

| Температура<br>випробувань, °С | Час випробувань,<br>год. | $q$ , г/см <sup>2</sup> | $h$ , мм             | $p$  |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|------|
| 550                            | 100                      | $3,10 \cdot 10^{-5}$    | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | 13,6 |
|                                | 500                      | $8,20 \cdot 10^{-5}$    | $1,05 \cdot 10^{-5}$ | 12,8 |
|                                | 1000                     | $3,80 \cdot 10^{-4}$    | $4,87 \cdot 10^{-4}$ | 12,5 |
|                                | 2000                     | $5,90 \cdot 10^{-4}$    | $7,56 \cdot 10^{-4}$ | 12,3 |
| 700                            | 100                      | $8,21 \cdot 10^{-4}$    | $1,05 \cdot 10^{-3}$ | 11,2 |
|                                | 500                      | $2,25 \cdot 10^{-3}$    | $2,88 \cdot 10^{-3}$ | 10,5 |
|                                | 1000                     | $4,20 \cdot 10^{-3}$    | $5,38 \cdot 10^{-3}$ | 10,2 |
|                                | 2000                     | $6,10 \cdot 10^{-3}$    | $7,89 \cdot 10^{-3}$ | 9,9  |
| 850                            | 100                      | $1,11 \cdot 10^{-2}$    | $1,42 \cdot 10^{-2}$ | 9,4  |
|                                | 500                      | $2,90 \cdot 10^{-2}$    | $3,71 \cdot 10^{-2}$ | 8,7  |
|                                | 1000                     | $3,60 \cdot 10^{-2}$    | $4,60 \cdot 10^{-2}$ | 8,4  |
|                                | 2000                     | $4,80 \cdot 10^{-2}$    | $6,15 \cdot 10^{-2}$ | 8,1  |

Використовуючи параметричну діаграму, можна визначити глибину проникнення корозійних пошкоджень при різних температурах та достатньо тривалих експозиціях, і тим самим спрогнозувати можливі гарантовані терміни експлуатації виробів (рис. 3.1).

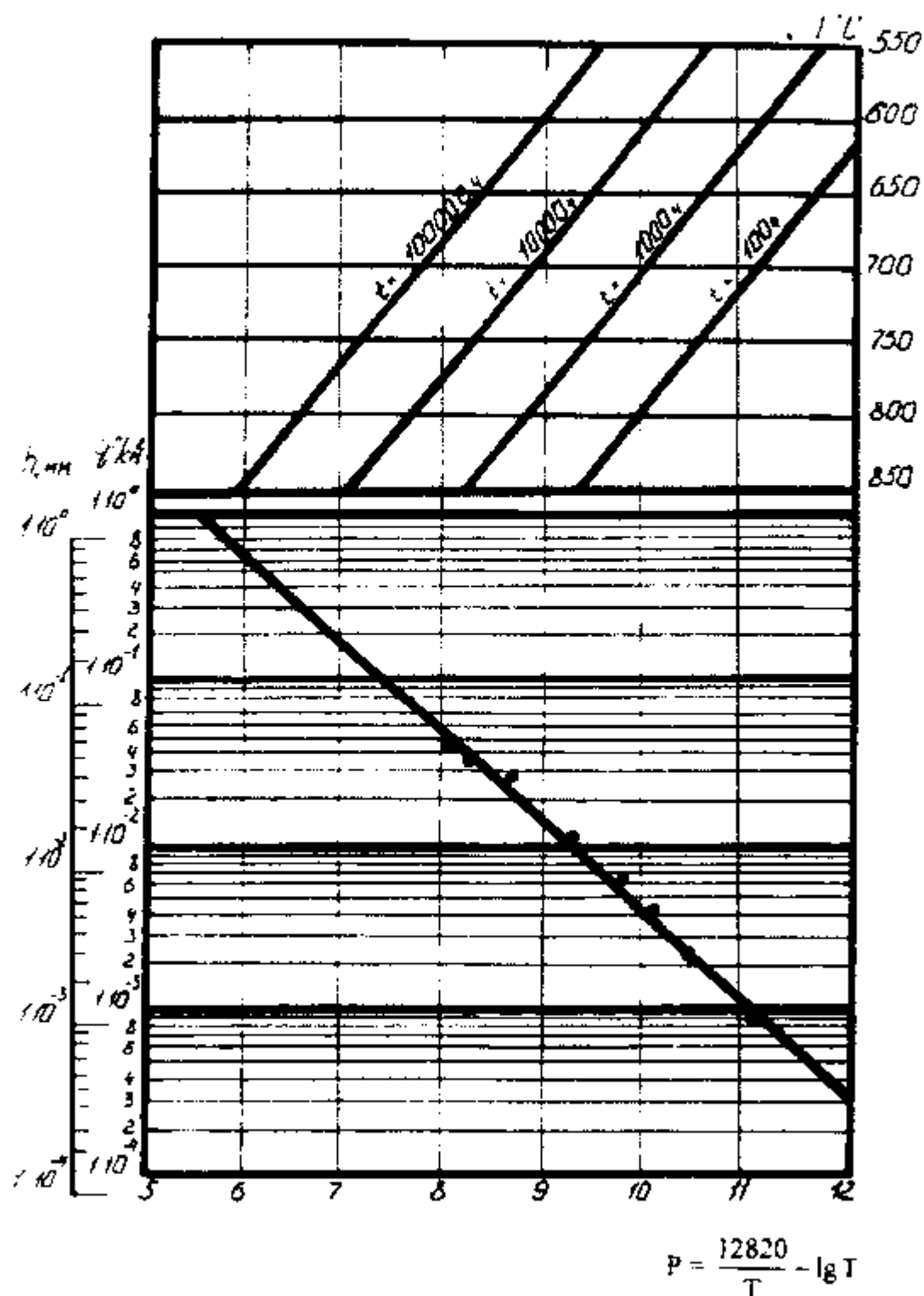


Рисунок 3.1 – Параметрична діаграма жаростійкості сталі 08X8SiUT4. Тривалість випробувань до 2000 год. при 550, 700, 850 °С на повітрі

Вважають, що конструктивна міцність виробів, які виготовлені із листового металопрокату та які працюють в умовах ВТК зберігається при зменшенні товщини листа на величину не більше половини від вихідної [1, 6]. Згідно побудованої параметричної діаграми, при температурах 800 – 850 °С, які характерні для нейтралізаторів відпрацьованих газів, зменшення товщини листа на 50 %, внаслідок корозійних руйнувань, відбудеться при експлуатації виробів протягом приблизно 100000 годин, що відповідає 10 – 12 рокам.

### 3.2 Дослідження стійкості до атмосферної корозії

Найбільш вірогідні данні про корозійну стійкість матеріалів дають результати польових випробувань при тривалих експозиціях. Враховуючи тривалість випробувань, неможливо попередньо визначити методи оцінки їх результатів. У зв'язку з цим, в роботі представлені результати порівняльних випробувань корозійної стійкості сталі 08X8CЮТч та сталей, корозійна стійкість яких відома – 12X18H10Г та 08X18T1 [43]. Також проводились дослідження сталі YUS 409D. Загальний час випробувань склав 5 годин.

Зовнішній вигляд зразків після польових випробувань представлено на рис. 3.2.

Враховуючи те, що вироби із цих сталей можуть експлуатуватися і в більш агресивних умовах, проведені пришвидшені випробування корозійної стійкості цих сталей в камері сольового туману, яка імітує морську вологу атмосферу.

Результати цих випробувань збігаються з результатами довготривалих польових випробувань і представлені на рис. 3.3.

Як видно із наведених на рис. 3.2 та 3.3 фотокарток, на зразках із сталі 08X8CЮТч, корозійні пошкодження займають менше 100 % площі їх поверхні. Отже при оцінці її схильності до пітінгової корозії необхідно використовувати,

згідно ГОСТ 13819 – 68, якісний метод оцінки за шкалою бальності. При цьому визначались середня глибина корозійних пошкоджень із розрахунку на рік та інтенсивність їх розподілення за площею зразка.



а



б



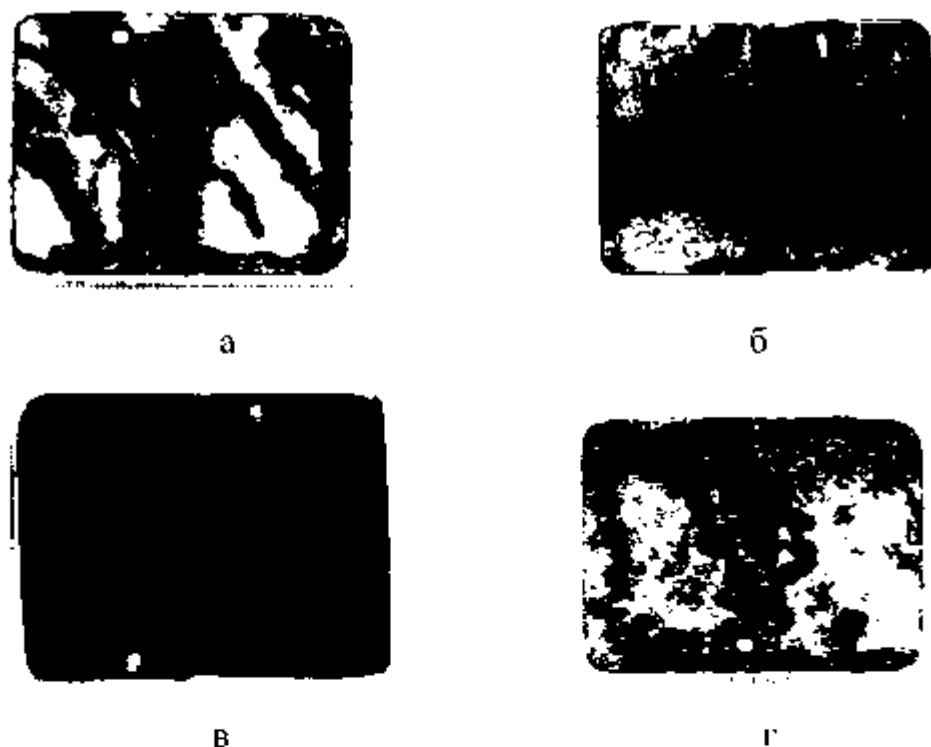
в



г

а – сталь 08Х8СЮТч; б – сталь 12Х18Н10Т; в – сталь 08Х18Т1; г – сталь YUS 409D

Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд зразків після польових випробувань на стійкість до атмосферної корозії



а – сталь 08Х8СЮТч; б – сталь 12Х18Н10Т; в – сталь 08Х18Т1; г – сталь YUS 409D

Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд зразків після прищвиджених випробувань на корозійну стійкість в атмосферних умовах

Оскільки середня глибина корозійних пошкоджень на зразках із сталі марки 08Х8СЮТч склала 0,05 мм/рік, а загальна площа, яку вони займають, менше 50 %, корозійна стійкість цієї сталі, при такому виді випробувань, визначається восьмим балом. Зразки із неіржавіючої сталей 12Х18Н10Т та 08Х18Т1 практично не піддаються корозійним пошкодженням та їх корозійна стійкість визначається десятим балом. Середня глибина корозійних пошкоджень на зразках зі сталі YUS 409D склала 0,05 мм/рік при загальній їх площі 70 %. Тому корозійна стійкість цієї сталі визначається 7 балом.

Отримані результати свідчать про те, що корозійна стійкість сталі 08Х8СЮТч може порівнюватись з цим показником для неіржавіючих сталей та узгоджується з загальноприйнятими уявленнями про вплив легування на корозійну стійкість сталей та сплавів. Так, висока корозійна стійкість сталей 12Х18Н10Т та 08Х18Т1 визначається, головним чином, високим вмістом хрому,

що збільшує їх схильність до пасивації та забезпечує стабільність пасивного стану. Необхідно відмітити, що за швидкістю розчинення в пасивному стані, в атмосферних умовах, легуючі елементи, які розглядаються, розташовуються в наступному порядку:  $Fe < Si < Al < Ti < Cr$  [44]. Хром в цьому стані розчиняється приблизно в 140 разів повільніше, ніж залізо, і в 20 разів повільніше, чим титан. Легування заліза хромом, при його вмісті більше 12 %, знижує швидкість розчинення матеріалу в пасивному стані на 3 – 4 порядки величини та наближається до відповідним характеристикам для чистого хрому [45].

Вміст хрому в сталі 08X8CЮТч менше 12 %, але добавки алюмінію добре впливають на збереження пасивного стану металу. При цьому, за даними Розенфельда [31], алюміній найбільш сильно проявляє свої захисні властивості саме в сталях, які містять хром. Крім того, неможливо не враховувати й структурний фактор. Структура сталі 08X8CЮТч – однофазний твердий розчин, який дозволяє досягнути рівномірного розподілу первинних та вторинних фаз за всім об'ємом металу та виключити виникнення мікрогальванічних пар. Однорідність фазового складу в сталі щільно пов'язана з термічною обробкою в процесі виготовлення металу [46]. Розроблені режими рекристалізації листового металопрокату дозволяють отримати рівновісну зернисту структуру з мінімальною кількістю карбідних включень по границям зерен – фактор, який стримує розвиток міжкристалітної корозії. В той же час, по об'єму зерен відбувається коагуляція карбідної фази, що сприяє вирівнюванню концентрації хрому в твердому розчині та, як наслідок, підвищення корозійної стійкості сталі.

В зоні зварного з'єднання корозійні пошкодження мають більш розвинутий характер. Високотемпературне нагрівання та швидке охолодження при зварюванні приводє до зниження корозійних властивостей, як у неіржавіючих сталей, так і в сталях 08X8CЮТч та YUS 409D. Це пов'язано, в основному, зі зниженням концентрації хрому в зоні зварного шва та в зоні термічного впливу внаслідок його вигорання, а також виведення хрому із твердого розчину в карбіди. Крім того, в зоні зварного шва можливе утворення вторинних фаз та виникнення напружень, які приводять до погіршення

пластичних властивостей пасивуючої плівки. Але, розвиток корозійних процесів в цій зоні при тривалих випробуваннях не привів до катастрофічного руйнування металу.

### 3.3 Порівняльні випробування жаростійкості в різних газових середовищах до 800 °С

Кількісні результати випробувань жаростійкості, як в повітряному середовищі, так і в середовищі відпрацьованих газів автомобіля показані на рис. 3.4, 3.5, а також зовнішній вигляд зразків, який представлено на рис.3.6 та 3.7, які свідчать про те, що за жаростійкістю сталь 08X8CrOTч та сталі 12X18H10T, 08X18T1 близькі між собою, тоді як сталь YUS 409D більш схильна до окислення. Такі показники жаростійкості сталі 08X8CrOTч, яка має в складі суттєво меншу кількість хрому, мають своє пояснення. При окисленні цієї сталі, в склад плівок, що утворюються, надходять оксиди  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , а також більш складні з'єднання  $FeO \cdot Al_2O_3$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ , які в поєднанні  $Cr_2O_3$  та  $FeO \cdot Cr_2O_3$  дозволяють суттєво покращити захисні властивості цих оксидних плівок та підвищити жаростійкість сталі. Жаростійкість же сталі YUS 409D помітно нижча, оскільки в її складі вміст хрому недостатній для утворення високоефективних окисних плівок, таких як в сталі 12X18H10T або 08X18T1, а інших легуючих елементів, крім невеликої кількості кремнія, вона не має.

Відносно гірші показники жаростійкості у всіх сталей після випробувань в середовищі відпрацьованих газів автомобіля пов'язані з більш високою її агресивністю.

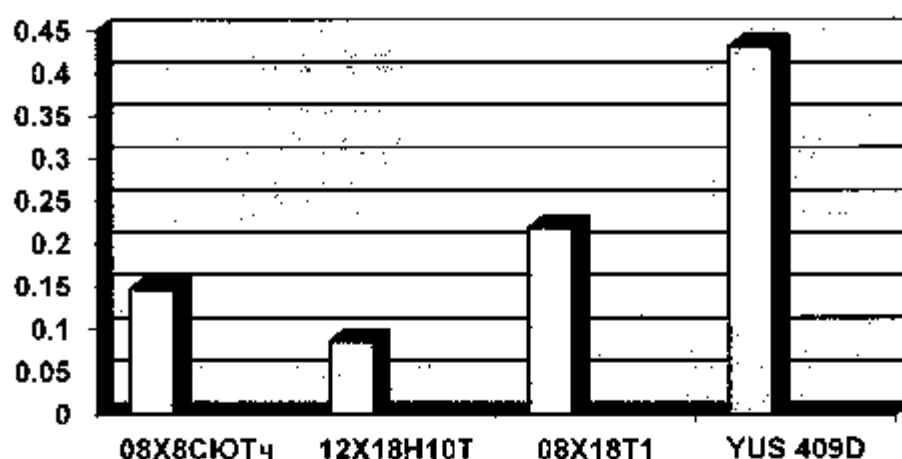


Рисунок 3.4 – Жаростійкість сталей, що досліджуються, в повітряній атмосфері при 700 °С, 2000 годин

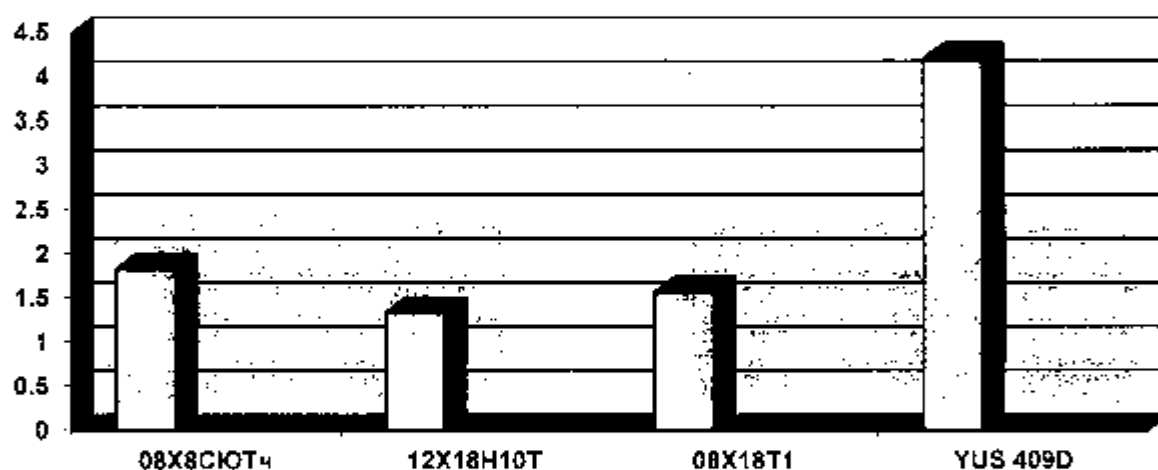


Рисунок 3.5 – Жаростійкість сталей, що досліджуються, в атмосфері відпрацьованих газів автомобіля в інтервалі температур 650 – 800 °С, 200 годин

Отриманні дані дають підставу припускати те, що сталь 08X8CЮТч, за своїми жаростійкими властивостями, придатна для експлуатації в середовищі відпрацьованих газів автомобілів з гарантованим запасом експлуатаційної надійності.



а



б



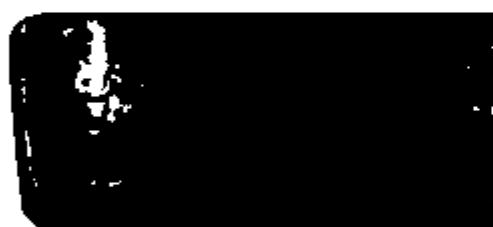
в



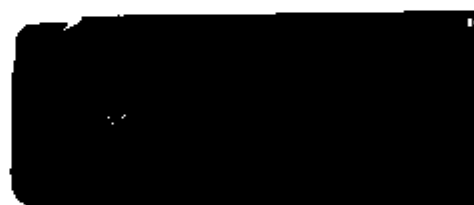
г

а – 08X8CЮТч, б – 12X18H10T, в – 08X18T1, г – YUS-409D

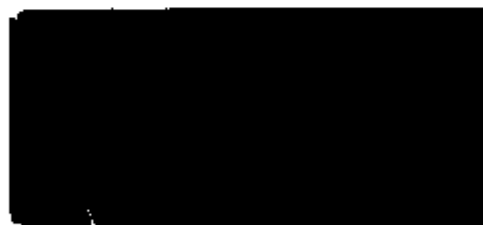
Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд зразків після випробування на жаростійкість в повітряній атмосфері, 700 °С, 2000 годин



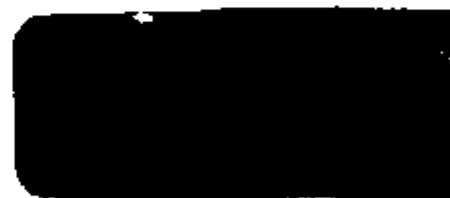
а



б



в



г

а – 08X8CЮТч, б – 12X18H10T, в – 08X18T1, г – YUS-409D

Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд зразків після випробування на жаростійкість в продуктах горіння автомобільного палива, 650 – 850 °С, 200 годин

Нижче наведені (табл. 3.2) результати випробувань жаростійкості в продуктах горіння палива жаростійкої феритної сталі 08X8CrTi, закордонних сталей, які використовують для деталей системи газовихлопу, в порівнянні зі сталями 12X18H10T та 08пс.

Таблиця 3.2 – Жаростійкість сталей ( $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1500\text{ год.}$ )

| Марка сталі | Маса до випробування<br>, г | Маса після випробування<br>, г | Площа,<br>$\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$ | Середня швидкість корозії, $\text{г}/(\text{м}^2\text{год})$ |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 08X8CrTi    | 1,7592                      | 1,6934                         | 5,460                                | 1,8270                                                       |
| 12X18H10T   | 3,7763                      | 3,6870                         | 6,290                                | 1,3310                                                       |
| 08X18T1     | 1,9854                      | 1,8601                         | 5,410                                | 1,5620                                                       |
| YUS 409D    | 1,7884                      | 1,6188                         | 5,440                                | 4,1970                                                       |

Візуальний огляд поверхні зразків показав, що окалина на зразках жаростійкої сталі марки 08X8CrTi отримана рівною та щільною, як і на класичній аустенітній сталі 12X18H10T. В той же час на зразках японських сталей типу YUS409 вона частково осипалась і поверхня вийшла плямистою, незважаючи на більш високий вміст в ній хрому. Поверхня зразків із алюмованої сталі отримана розпухшею та лобитою ослинами у вигляді надколів незважаючи на те, що вони випробовувались лише протягом 19,5 годин. Зразки із сталі 08пс не показали значної стійкості та взагалі зруйнувались під час проведення випробувань.

На стовпчастій діаграмі (рис. 3.4), яка побудована за результатами таблиці 3.2, показано, що, виходячи з втрати ваги, жаростійкість сталі з присадками кремнію та алюмінію перевершують традиційно використовуємі закордонні хромисті сталі та алюмований лист, не зважаючи на те, що в сталях типу YUS409 міститься на 2 – 3 % більше хрому, ніж в сталі 08X8CrTi.

В той же час втрата ваги в сталі 08X8CrTi знаходиться на рівні класичної марки 12X18H10T. При цьому найкраща жаростійкість у виплавці, яка містить

Si = 1,23 %; Al = 0,96 %. Зменшення кремнію на величину порядку 0,2 % та алюмінію на 0,1 % вже збільшує втрату ваги. У випадку збільшення кремнію вище 1,23 % на 0,3 % і подальшого зменшення алюмінію на 0,4 % проти 0,96 % втрата маси хоча і декілька зменшиться, але не досягне такого рівня. Таким чином, оптимальним є вміст кремнію біля 1,2 % та алюмінію біля 1,0 %.

Зразки обмірювали та зважували на аналітичних вагах до та після випробувань. Швидкість корозії визначалася за виразом

$$v = \frac{P_1 - P_2}{S \tau}, \quad (3.1)$$

де  $P_1, P_2$  – маса зразків до та після випробування, г;

$S$  – площа поверхні зразка,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  – тривалість випробування, год.

Результати випробування після механічного видалення, шляхом зіскоблювання, окалини з наступним щавленням в 50 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльна окалиностійкість зразків

| Марка сталі   | Маса до випробування, г | Маса після випробування, г | Площа, $10^3 \cdot \text{м}^2$ | Окалиностійкість, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$ | Стан поверхні  |
|---------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------|
| 08X8CЮ<br>Тч  | 13,3060                 | 13,2735                    | 2,215                          | 0,147                                                    | Щільна окалина |
| 12X18Н1<br>0Т | 14,7495                 | 14,7274                    | 2,574                          | 0,086                                                    | Щільна окалина |
| 08X18Т1       | 12,3940                 | 12,3368                    | 2,613                          | 0,219                                                    | Щільна окалина |
| 08пс          | 11,6002                 | 11,5048                    | 2,210                          | 0,432                                                    | Окалина силуча |

Із наведеної таблиці видно, що, як слід було чекати, мінімальна втрата маси спостерігається в сталі 12X18H10T, а на другому місці знаходиться жаростійка феритна сталь марки 08X8CЮTч, більш стійка, ніж неіржавіюча сталь 08X18T1. Це, напевно, пов'язано з тим, що при одній і тій же феритній структурі в складі окалини сталі 08X8CЮTч знаходяться з'єднання, в склад яких входять атоми Al та Si, а також PЗМ, які кардинально підвищують жаростійкість сталі.

Таким чином, не зважаючи на більш низький вміст хрому в зв'язку з легуванням сталі недефіцитним алюмінієм та кремнієм, а також мікролегуванням PЗМ та ЛЗМ, вдається різко підвищити окалинотійкість сталі навіть при 7 – 8 % хрому.

Задовільні показники стійкості сталі 08X8CЮTч практично для всіх зазначених вище умов випробувань дозволило припустити, що даний матеріал можливо використовувати і при виготовленні виробів, що експлуатуються при більш високих температурах (1000 – 1300) °C.

### 3.4 Дослідження складу оксидних плівок

В ході досліджень виявилось, що на поверхні сталі 08X8CЮTч утворюються дуже тонкі, щільні оксидні плівки, якісне відокремлення яких від матриці виявилось неможливим. Дослідження їх складу проводилось за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу. Робота проводилась на аналізаторі MS-46 фірми „Сатеса”, який дозволяє визначити послієментний склад поверхневих шарів матеріалу в локальних об'ємах. Товщини поверхневих оксидних шарів визначали варьованням пришвиджувального напруження, при збільшенні якого скануючий електронний струмінь проникає на все більшу глибину. При цьому визначали склад зони сканування за основними хімічними елементами та порівнювали з хімічним складом матеріалу. Склад оксидних плівок за основними легуючими елементами, представлений в табл. 3.4,

отримано при дослідженні поверхні зразків із сталі 08Х8СЮТч, які були випробувані на жаростійкість в повітряному середовищі при різних температурах та тривалості експозиції.

Таблиця 3.4 – Склад оксидних плівок за основними легуючими елементами

| Температура<br>випробувань, °С | Час експозиції,<br>год. | Вміст легуючих елементів в плівці, % |      |      |      |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------|------|------|
|                                |                         | Cr                                   | Al   | Si   | Fe   |
| 550                            | 100                     | 9,37                                 | 1,44 | –    | осн. |
|                                | 1000                    | 10,47                                | 1,80 | 0,92 | осн. |
| 700                            | 100                     | 11,47                                | 1,85 | 0,32 | осн. |
|                                | 1000                    | 16,25                                | 2,10 | 1,27 | осн. |
| 850                            | 100                     | 11,57                                | 1,60 | 0,65 | осн. |
|                                | 1000                    | 18,64                                | 2,74 | 1,85 | осн. |

Отримані результати дозволяють припустити, що плівки, які утворюються, мали дуже малу товщину. Варьовання пришвидшеного напруження при виборі робочих режимів показало, що при 23 – 25 кВ склад шару, що аналізується, повністю відповідав хімічному складу сталі.

Перші зміни в складі шару, що аналізується, з'явилися при зменшенні пришвидшуючого напруження до 15 – 20 кВ, що відповідає товщинам оксидних плівок 2 – 4 мкм. У зв'язку з їх малою товщиною аналізувався усереднений склад.

Процес окислення має температурно-часовий характер. Зі збільшенням температури та часу експозиції зразків, вміст легуючих елементів в складі оксидних плівок збільшується. Це характерно для окислення, яке протікає за параболічним законом. Збільшення вмісту легувальних елементів, які входять до складу оксидної плівки обумовлює уповільнення процесу окислення.

Зміна кількості легуючих елементів в складі оксидних плівок відбувалося наступним чином (табл. 3.4). При невисокій температурі та невеликому часі експозиції (550 °С, 100 годин) кількість хрому та алюмінію в складі плівок незначно відрізнялося у бік збільшення від хімічного складу самої сталі, а

кількість кремнію не перевищувало фонових значень характеристичного випромінювання. Зі збільшенням часу експозиції до 1000 годин при цій же температурі в складі плівок з'являвся кремній, вміст хрому та алюмінію помітно збільшувався. При підвищенні температури випробування до 700 °С, навіть при часі експозиції в 100 годин, кількість хрому та алюмінію ще більш зростає, а при експозиції в 1000 годин вміст алюмінію в складі оксидної плівки перевищує фонові значення характеристичного випромінювання в два рази. Така ж тенденція зберігається при температурі випробувань 850 °С. При цій температурі та 1000 годин витримки двократне перевищення фонових значень досягається і за кремнієм.

Враховуючи, що ці елементи за зменшенням величини термодинамічного потенціалу утворення їх оксидів розташовуються в наступному ряду:  $\text{FeO} > \text{SiO}_2 > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3$  [42] можна зробити висновок, що має місце селективний характер окислення. Найбільший вплив на процес утворення жаростійких захисних плівок мають хром та алюміній, при цьому вплив алюмінію найбільш ефективний.

Оксиди кремнію, що утворюються, «ущільнюють» захисну плівку та дозволяють суттєво знизити швидкість реакції окислення сталі при тривалих термінах експлуатації.

Отримані результати свідчать про те, що введення в склад залізохромового сплаву алюмінію та кремнію, з точки зору отримання високих жаростійких властивостей та збереження їх протягом тривалого часу, є дуже корисним.

### 3.5 Порівняння жаростійкості при температурах до 1300 °С

Отримання доволі оптимістичних результатів щодо показників жаростійкості сталі 08Х8СЮТч дозволило зробити припущення про можливість використання даного матеріалу і при більш високих температурах (1000 – 1300 °С). На сьогодні такі вироби як насадки реактивних двигунів літальних апаратів виготовляються із комбінованих багатошарових матеріалів. Роль наповнювача в

них виконує сітка з вольфрамового дроту, а захисні оболонки виготовляються з листового матеріалу марки ХН45Ю. Залізо-нікелевий сплав ХН45Ю є гостродефіцитним, через значний вміст нікелю, тому заміна цього матеріалу на економлеговану марку 08Х8СЮТч є дуже актуальним, практично вагомим питанням.

Порівняльний аналіз здійснювався з використанням методики, яку розглянуто в 2 розділі. З метою запобігання втрати окалини, зразки піддавали температурному впливу в спеціальних алунових тиглях, які з метою зменшення похибки спочатку прогрівали і потім ретельно зважували.

#### Зважування тиглів після першого прогрівання

|               |               |
|---------------|---------------|
| № 1 – 82,2451 | № 4 – 82,3141 |
| № 2 – 81,7039 | № 5 – 73,5733 |
| № 3 – 73,0054 | № 6 – 85,5926 |

#### Після другого прогрівання

|               |               |
|---------------|---------------|
| № 1 – 82,1940 | № 4 – 82,3033 |
| № 2 – 81,3835 | № 5 – 73,5733 |
| № 3 – 73,0055 | № 6 – 85,5945 |

#### Після третього прогрівання

|               |               |
|---------------|---------------|
| № 1 – 81,5105 | № 4 – 82,3038 |
| № 2 – 82,5953 | № 5 – 73,5705 |
| № 3 – 73,0067 | № 6 – 85,5909 |

#### Після четвертого прогрівання

|               |               |
|---------------|---------------|
| № 1 – 81,5135 | № 4 – 82,3117 |
| № 2 – 82,6023 | № 5 – 73,5947 |
| № 3 – 73,0123 | № 6 – 85,6002 |

Тиглі були прогріті на електричній плитці 1,5 годин.

Таблиця 3.5 – Маса тиглів при випробуванні

| № | Маса тигля, г | Після сушіння, г | Після очищування, г | $\Delta$ |
|---|---------------|------------------|---------------------|----------|
| 1 | 81,5150       | - 0,0010         | 81,5264             | + 0,0114 |
| 2 | 82,5913       | - 0,0039         | 82,6032             | + 0,0119 |
| 3 | 73,0080       | - 0,0104         | 73,0185             | + 0,0105 |
| 4 | 82,3030       | - 0,0134         | 82,3149             | + 0,0119 |
| 5 | 73,5694       | - 0,009          | 73,5825             | + 0,0131 |
| 6 | 85,5892       | - 0,0061         | 85,6029             | + 0,0137 |

Маса до випробування: 41,64575 – двох зразків.

$T_{\text{випр}} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2,5$  год. Охолодження з піччю до температури  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Маса зразка = 45,12120;  $\Delta + 3,47545$

Друге випробування двох зразків:  $T_{\text{випр}} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2,5$  год. Маса = 49,9053;  $\Delta + 4,7841$ .

Приріст маси = 8,25955 гр.

Таблиця 3.6 – Розміри зразків до корозії;  $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Марка     | № зразка | Розміри, мм    |                |          |        | $S, \text{ мм}^2$ |
|-----------|----------|----------------|----------------|----------|--------|-------------------|
|           |          | $\bar{a}_{cp}$ | $\bar{b}_{cp}$ | $\delta$ | $P$    |                   |
| 12X18H10T | 1        | 20,25          | 53,65          | 0,5      | 147,8  | 2273,55           |
|           | 11       | 20,73          | 54,28          | 0,5      | 150,0  | 2325,45           |
| 08X8CЮТч  | 2        | 20,28          | 50,00          | 0,5      | 141,55 | 2098,78           |
|           | 22       | 20,48          | 49,58          | 0,5      | 140,10 | 2100,85           |
| ХН45Ю     | 3        | 20,70          | 50,83          | 0,5      | 143,05 | 2175,89           |
|           | 33       | 20,53          | 50,75          | 0,5      | 142,55 | 2155,07           |

Таблиця 3.7 – Розміри зразків після зварювання до корозії

| Марка     | № зразка | Розміри, мм |                |          |        | S, мм <sup>2</sup> |
|-----------|----------|-------------|----------------|----------|--------|--------------------|
|           |          | $a_{cp}$    | $\bar{b}_{cp}$ | $\delta$ | P      |                    |
| 08X8CrOTч | 4        | 20,63       | 50,58          | 1,0      | 142,40 | 2229,33            |
|           | 44       | 20,48       | 50,53          | 1,1      | 142,00 | 2225,91            |
| 12X18H10T | 5        | 19,80       | 51,63          | 1,0      | 142,85 | 2187,40            |
|           | 55       | 20,5        | 51,15          | 1,0      | 143,30 | 2240,45            |

Таблиця 3.8 – Розміри зразків до корозії.  $T_{випр} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1\text{ год.}(1); 1,5\text{ (11); }2,5\text{ (111)}$ 

| Марка                         | № зразка | Розміри, мм |                |          |        | S, мм <sup>2</sup> |
|-------------------------------|----------|-------------|----------------|----------|--------|--------------------|
|                               |          | $a_{cp}$    | $\bar{b}_{cp}$ | $\delta$ | P      |                    |
| 12X18H10T                     | 111      | 20,20       | 53,80          | 0,5      | 148,00 | 2247,52            |
| 08X8CrOTч                     | 222      | 20,00       | 49,70          | 0,5      | 139,40 | 2057,70            |
| ХН45Ю                         | 333      | 19,83       | 51,00          | 0,5      | 141,65 | 2093,48            |
| 08X8CrOTч<br>(після<br>звар.) | 444      | 21,28       | 50,25          | 1,15     | 143,05 | 2303,15            |
| 12X18H10T<br>(після<br>звар.) | 555      | 20,00       | 51,53          | 1,1      | 143,05 | 2218,56            |

Таблиця 3.9 – Результати зважування зразків до випробування та після випробування при температурі 1100 °С.

| Сплав                            | № зразка | Маса до випробувань, г | Маса після випробувань, г | Приріст маси $\Delta m$ , г | Приріст маси $\Delta m$ , % |
|----------------------------------|----------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                                | 2        | 3                      | 4                         | 5                           | 6                           |
| Час нагрівання $\tau$ – 1 год.   |          |                        |                           |                             |                             |
| 12X18H10T                        | 1        | 3,8561                 | 3,8933                    | 0,0372                      | 0,35                        |
| 08X8CЮТч                         | 2        | 4,0427                 | 4,0540                    | 0,0113                      | 0,28                        |
| ХН45Ю                            | 3        | 3,5972                 | 3,6051                    | 0,0079                      | 0,22                        |
| 08X8CЮТч<br>(після зварювання)   | 4        | 8,4974                 | 8,50,40                   | 0,0066                      | 0,08                        |
| 12X18H10T<br>(після зварювання)  | 5        | 7,1116                 | 7,1153                    | 0,0037                      | 0,05                        |
| Час нагрівання $\tau$ – 1,5 год. |          |                        |                           |                             |                             |
| 12X18H10T                        | 11       | 3,8571                 | 3,8986                    | 0,0415                      | 0,47                        |
| 08X8CЮТч                         | 22       | 3,9510                 | 3,9632                    | 0,0122                      | 0,31                        |
| ХН45Ю                            | 33       | 3,6255                 | 3,6355                    | 0,01                        | 0,28                        |
| 08X8CЮТч<br>(після зварювання)   | 44       | 8,2555                 | 8,2636                    | 0,0081                      | 0,1                         |
| 12X18H10T<br>(після зварювання)  | 55       | 7,2475                 | 7,2552                    | 0,0077                      | 0,11                        |

Продолжение таблицы 3.9

| Час нагрівання $\tau = 2$ год.     |     |        |         |        |      |
|------------------------------------|-----|--------|---------|--------|------|
| 12X18H10T                          | 111 | 3,8559 | 3,9056  | 0,0497 | 0,83 |
| 1                                  | 2   | 3      | 4       | 5      | 6    |
| 08X8СЮТч                           | 222 | 3,8329 | 3,8460  | 0,0131 | 0,34 |
| ХН45Ю                              | 333 | 3,5333 | 3,5457  | 0,0124 | 0,35 |
| 08X8СЮТч<br>(після<br>зварювання)  | 444 | 7,7060 | 7,7152  | 0,0092 | 0,12 |
| 12X18H10T<br>(після<br>зварювання) | 555 | 7,1353 | 7,71469 | 0,0116 | 0,16 |

Таблиця 3.10 – Розміри зразків до корозії.  $T = 1200$  °C;  $\tau = 2,5$  год., 1,5 год., 1 год.

| Марка     | № зразка | Розміри, мм    |                |          |        | S, мм <sup>2</sup> |
|-----------|----------|----------------|----------------|----------|--------|--------------------|
|           |          | $\bar{a}_{cp}$ | $\bar{b}_{cp}$ | $\delta$ | P      |                    |
| 12X18H10T | 1        | 20,25          | 53,78          | 0,5      | 148,05 | 2252,12            |
|           | 11       | 20,00          | 54,15          | 0,5      | 148,30 | 2240,15            |
|           | 111      | 20,00          | 55,42          | 0,5      | 150,85 | 2292,23            |
| 08X8СЮТч  | 2        | 20,98          | 49,98          | 0,5      | 141,90 | 2168,11            |
|           | 22       | 20,93          | 49,65          | 0,5      | 141,25 | 2148,97            |
|           | 222      | 20,13          | 49,28          | 0,5      | 138,80 | 2053,41            |
| ХН45Ю     | 3        | 20,73          | 50,60          | 0,5      | 142,65 | 2169,20            |
|           | 33       | 20,15          | 50,90          | 0,5      | 142,10 | 2122,32            |
|           | 333      | 20,98          | 50,90          | 0,5      | 143,65 | 2207,59            |

Продолжение таблицы 3.10

|               |     |       |       |      |        |         |
|---------------|-----|-------|-------|------|--------|---------|
| 08X8СЮТч      | 4   | 20,28 | 51,42 | 1,20 | 142,40 | 2256,80 |
| (після звар.) | 44  | 21,83 | 51,20 | 1,20 | 146,05 | 2410,65 |
|               |     |       |       |      |        |         |
|               | 444 | 20,50 | 51,88 | 1,25 | 144,75 | 2308,02 |
| 12X18Н10Т     | 5   | 21,23 | 50,88 | 1,0  | 144,20 | 2304,56 |
| (після звар.) | 55  | 20,30 | 52,13 | 1,0  | 144,85 | 2261,83 |
|               | 555 | 19,78 | 51,30 | 1,0  | 141,05 | 2170,48 |

Таблиця 3.11 – Результати зважування зразків до випробування та після випробування при температурі 1200 °С

| Сплав                            | № зразка | Маса до випробувань, г | Маса після випробувань, г | Приріст маси $\Delta m$ , г | Приріст маси $\Delta m$ , % |
|----------------------------------|----------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Час нагрівання $\tau = 1$ год.   |          |                        |                           |                             |                             |
| 12X18Н10Т                        | 1        | 3,7817                 | 3,6866                    | 0,9049                      | 23,93                       |
| 08X8СЮТч                         | 2        | 3,7765                 | 4,7347                    | 0,9582                      | 26,02                       |
| ХН45Ю                            | 3        | 3,4038                 | 3,4223                    | 0,0185                      | 0,54                        |
| 08X8СЮТч<br>(після звар.)        | 4        | 8,4561                 | 9,8925                    | 1,4364                      | 16,99                       |
| 12X18Н10Т<br>(після звар.)       | 5        | 7,4705                 | 7,6040                    | 0,1335                      | 1,79                        |
| Час нагрівання $\tau = 1,5$ год. |          |                        |                           |                             |                             |
| 12X18Н10Т                        | 11       | 3,7139                 | 4,6901                    | 0,9762                      | 39,2                        |
| 08X8СЮТч                         | 22       | 4,1501                 | 5,3654                    | 1,2153                      | 44,0                        |
| ХН45Ю                            | 33       | 3,5529                 | 3,5786                    | 0,0257                      | 0,72                        |
| 08X8СЮТч<br>(після звар.)        | 44       | 7,3816                 | 9,0923                    | 1,7107                      | 23,18                       |

Продолжение таблицы 3.9

|                                |     |        |         |        |       |
|--------------------------------|-----|--------|---------|--------|-------|
| 12X18H10T<br>(після звар.)     | 55  | 7,3842 | 7,9282  | 0,5440 | 7,37  |
| Час нагрівання $\tau = 2$ год. |     |        |         |        |       |
| 12X18H10T                      | 111 | 3,8431 | 4,9732  | 1,1301 | 29,41 |
| XH45Ю                          | 333 | 3,6925 | 3,7200  | 0,0275 | 0,74  |
| 08X8CЮТч                       | 222 | 3,7667 | 5,0138  | 1,2471 | 41,33 |
| 08X8CЮТч<br>(після звар.)      | 444 | 8,5947 | 10,8172 | 2,2225 | 25,86 |
| 12X18H10T<br>(після звар.)     | 555 | 6,9211 | 7,7553  | 0,8342 | 12,05 |

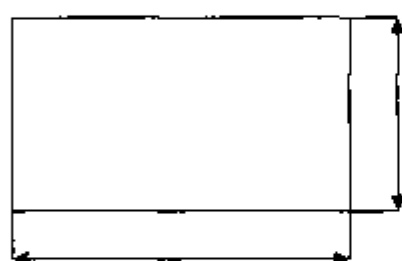


Рисунок 3.8 – Схема зразка

Таблиця 3.12 – Розміри зразків до корозії

| Марка     | № зразка | Розміри, мм |                |          |        | S, мм <sup>2</sup> |
|-----------|----------|-------------|----------------|----------|--------|--------------------|
|           |          | $\bar{a}_p$ | $\bar{b}_{cp}$ | $\delta$ | P      |                    |
| 12X18H10T | 1        | 19,90       | 55,05          | 0,5      | 149,9  | 2265,94            |
|           | 11       | 20,25       | 53,60          | 0,5      | 147,70 | 2244,65            |
| 08X8CЮТч  | 2        | 20,43       | 49,75          | 0,5      | 140,35 | 2102,96            |
|           | 22       | 20,48       | 49,55          | 0,5      | 140,05 | 2099,59            |
| XH45Ю     | 3        | 20,25       | 50,88          | 0,5      | 142,25 | 2131,77            |
|           | 33       | 20,50       | 50,68          | 0,5      | 142,35 | 2149,06            |

$$S = (a \cdot b)2 + P \cdot \delta.$$

Таблиця 3.13 – Розміри зразків після зварювання до корозії

| Марка     | № зразка | Розміри, мм    |          |          |        | S, мм <sup>2</sup> |
|-----------|----------|----------------|----------|----------|--------|--------------------|
|           |          | $\bar{a}_{cp}$ | $b_{cp}$ | $\delta$ | P      |                    |
| 08X8CЮТч  | 4        | 20,23          | 50,00    | 1,0      | 140,45 | 2163,45            |
|           | 44       | 20,28          | 51,50    | 1,0      | 143,55 | 2191,83            |
| 12X18H10T | 5        | 20,28          | 52,35    | 1,0      | 145,25 | 2268,57            |
|           | 55       | 20,00          | 52,10    | 1,0      | 144,20 | 2228,20            |

Таблиця 3.14 – Зразки після корозії;  $T_{\text{випр}} = 1300^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 1$  год.

| Сплав                            | № зразка | Маса до випробувань, г | Маса після випробувань, г | Приріст маси $\Delta m$ , г | Приріст маси $\Delta m$ , % |
|----------------------------------|----------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 12X18H10T                        | 1        | 3,7409                 | 5,3217                    | 1,5808                      | 42,25                       |
| 08X8CЮТч                         | 2        | 3,9827                 | 5,6618                    | 1,6791                      | 42,16                       |
| ХН45Ю                            | 3        | 3,5146                 | 3,5400                    | 0,0254                      | 0,72                        |
| 08X8CЮТч<br>(після звар.)        | 4        | 8,0338                 | 10,0903                   | 2,0565                      | 25,60                       |
| 12X18H10T<br>(після звар.)       | 5        | 7,5172                 | 8,0064                    | 0,4892                      | 6,51                        |
| Час нагрівання $\tau = 1,5$ год. |          |                        |                           |                             |                             |
| 12X18H10T                        | 11       | 3,6937                 | 5,2639                    | 1,5702                      | 42,51                       |
| 08X8CЮТч                         | 22       | 3,8723                 | 6,9433                    | 3,0710                      | 79,31                       |
| ХН45Ю                            | 33       | 3,6043                 | 3,8201                    | 0,2152                      | 5,99                        |
| 08X8CЮТч<br>(після звар.)        | 44       | 8,4622                 | 11,6449                   | 3,1887                      | 37,61                       |
| 12X18H10T<br>(після звар.)       | 55       | 7,3167                 | 8,9967                    | 1,6800                      | 22,96                       |

Таблиця 3.15 – Маса зразків після корозії:  $T_{\text{випр}} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2,5\text{ год.}$ 

| №  | Маса до корозії | Маса після корозії | Приріст маси $\Delta m$ , % | Приріст маси $\Delta m$ , г |
|----|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1  | 5,4232          | 7,1442             | 42,24                       | 1,7210                      |
| 11 | 5,4217          | 7,2159             | 42,26                       | 1,7942                      |
| 2  | 5,9517          | 7,8988             | 44,40                       | 1,9471                      |
| 22 | 6,0407          | 7,9643             | 44,30                       | 1,9236                      |
| 3  | 5,5121          | 5,7915             | 1,51                        | 0,2794                      |
| 33 | 5,5072          | 5,7757             | 1,25                        | 0,2685                      |

За результатами таблиць можна побудувати графіки.

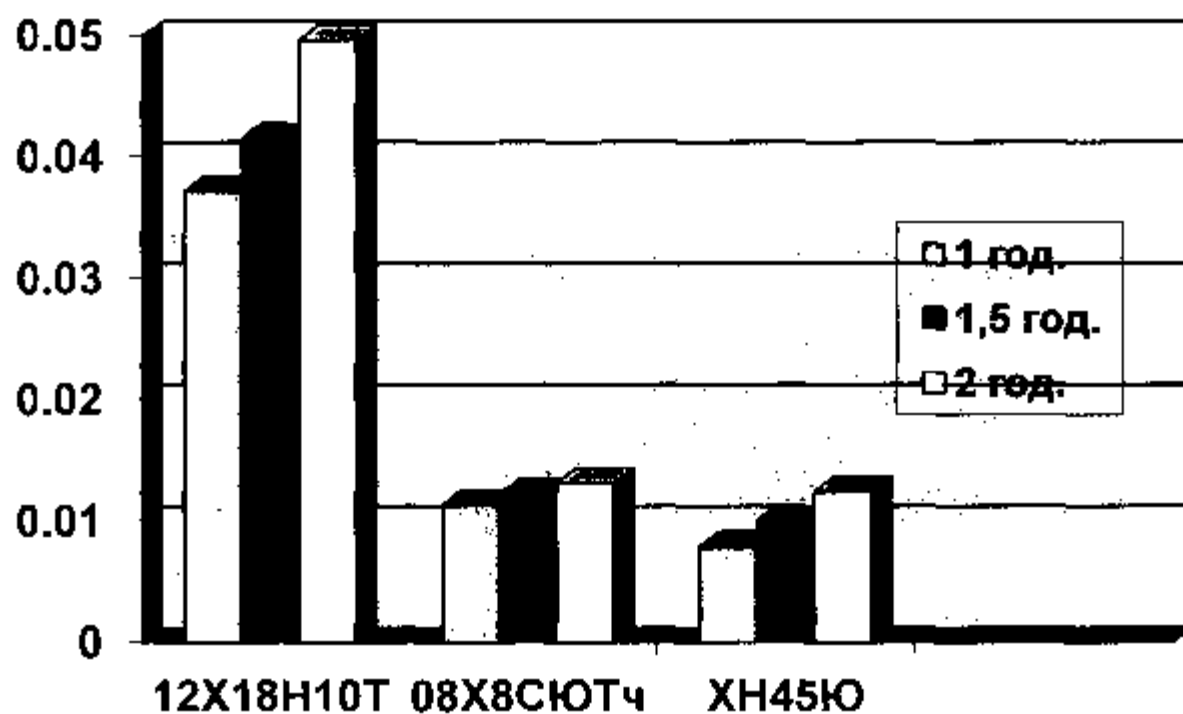


Рисунок 3.9 – Приріст маси після випробувань при температурі 1100 °C

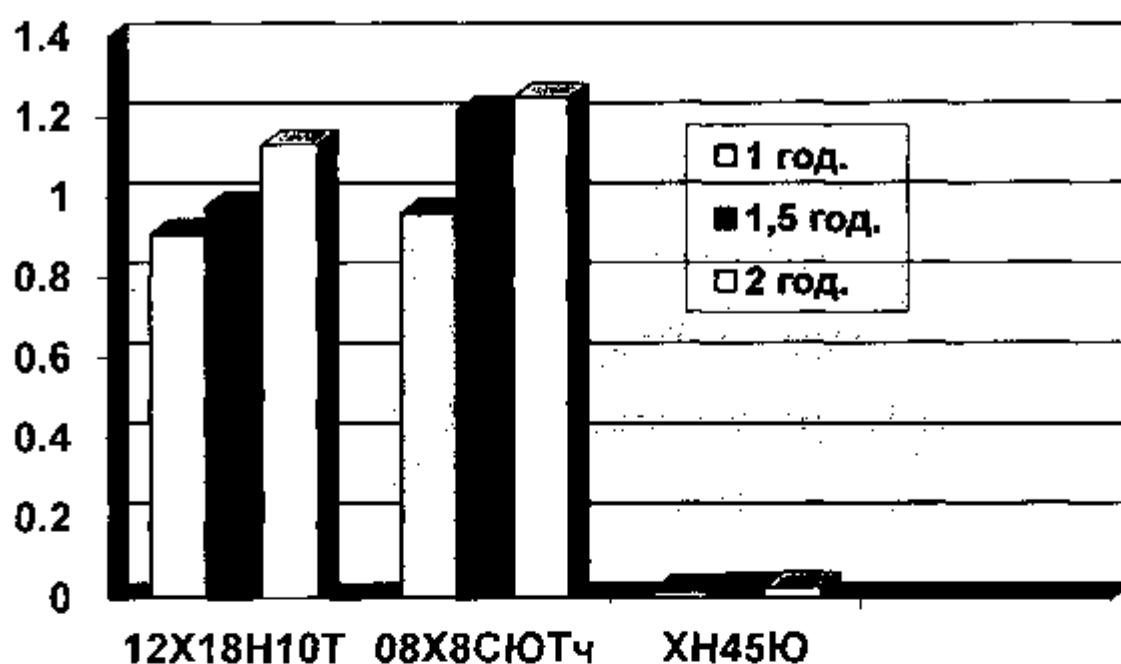


Рисунок 3.10 – Приріст маси після випробувань при температурі 1200 °C

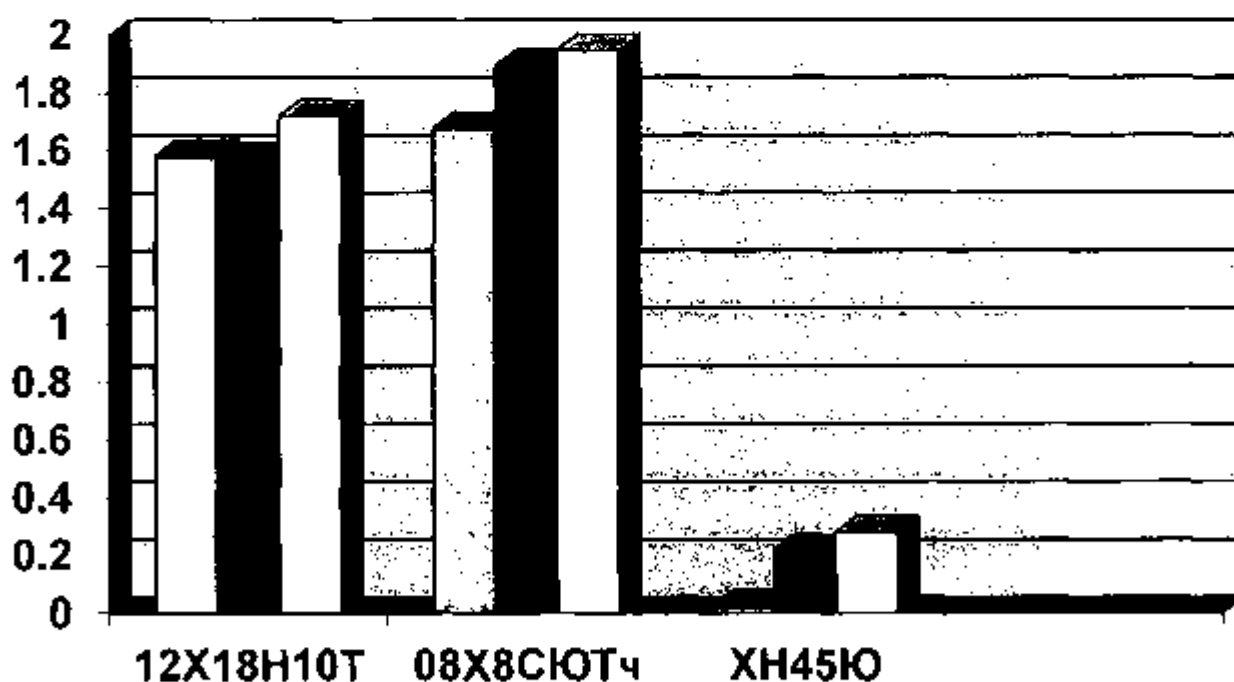
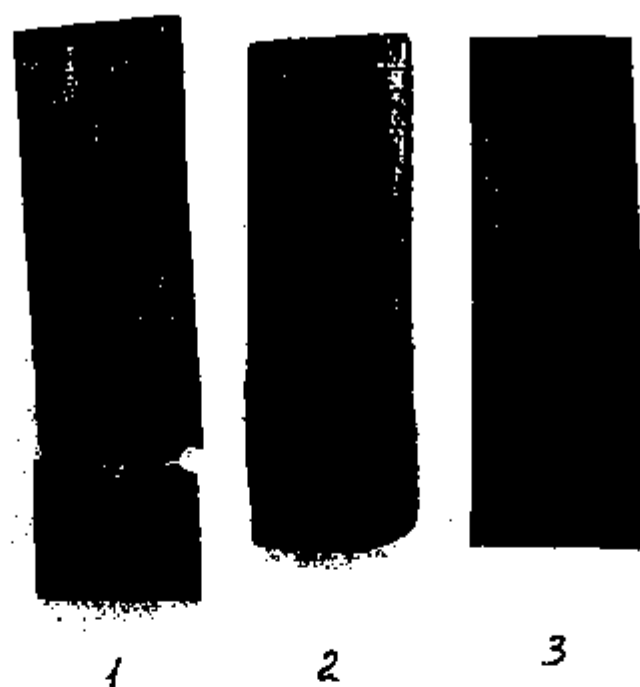
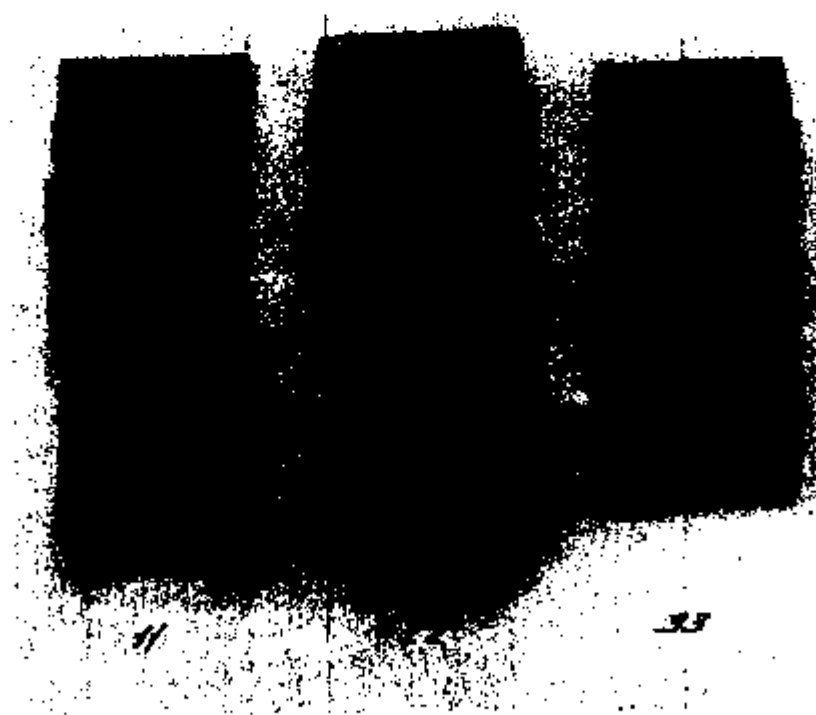


Рисунок 3.11 – Приріст маси після випробувань при температурі 1300 °C



1 – 12X18Н10Т; 2 – 08Х8СЮТч; 3 – ХН45Ю;

Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд зразків після термічного впливу.  $T = 1300$   
 $^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1$  год.



11 – 12X18Н10Т; 22 – 08Х8СЮТч; 33 – ХН45Ю;

Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд зразків після термічного впливу.  $T = 1300$   
 $^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1,5$  год.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що економно легована сталь 08X8CЮТч зберігає жаростійкість і не поступається за нею сталі 12X18H10T до температур 1200 °С, а сплав ХН45Ю до температур 1100 °С. Подальше вдосконалення системи легування може надати можливість використовувати сталі феритного класу і при більш високих температурах. Оптимістичні прогнози можна вважати цілком коректними, оскільки відомо про величезний практичний досвід використання фехралів (типу Х25Ю5) до температур порядку 1350 °С.

### 3.6 Практичне використання результатів

Аналіз світового досвіду в автобудуванні показує, що постійне підвищення норм експлуатації автомобілів потребує прийняття заходів по зниженню токсичності відпрацьованих газів. Одним із ефективних методів вирішення цієї задачі є установка в системі вихлопного тракту нейтралізатора відпрацьованих газів. Особливості експлуатації цього виробу (дія гарячих газів, атмосферних та дорожніх умов) обумовлюють використання для їх виготовлення високолегованих корозійностійких сталей. Сталі такого класу, які виготовляє вітчизняна металургійна промисловість не зовсім відповідають вимогам до матеріалів для виготовлення нейтралізаторів відпрацьованих газів (структурний фактор, рівень фізико-механічних властивостей та висока вартість). В той же час провідні автобудівельні фірми використовують для цих цілей економлеговані хромисті жаростійкі сталі. Тому і були проведені випробування на жаростійкість при температурах до 850 °С.

Випробування на жаростійкість при температурах до 1300 °С має велике значення для ракетобудування. Так у виготовленні насадки реактивного двигуна з композиційного матеріалу, в якому наповнювачем є вольфрам, в якості захисного шару використовується жаростійкий сплав типу ХН45Ю або сталі типу 12X18H10T. Ці випробування показали, що сталь 08X8CЮТч може

порівнюватись за жаростійкістю з сталлю 12Х18Н10Т. З цього можна зробити висновки про доцільність заміни цієї сталі, адже феритна сталь має меншу вартість.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Тенденції розвитку світового ринку феритних корозійностійких сталей

Феритні жаростійкі сталі, які містять 6–25% хрому, є досить перспективними в плані заміни ними сталей аустенітного класу, що містять нікель. Широке використання безнікельових матеріалів в наш час обмежено через цілий ряд факторів, найбільш суттєвими з яких є наступні.

При зварюванні вони менш технологічні, ніж аустенітні, що виражається в основному в окрихченні біляшовної зони в результаті високотемпературного впливу зварного циклу, що супроводжується інтенсивним ростом зерна та виділенням надлишкових фаз, що окрихчують, або сегрегаціями домішок на границях феритних зерен.

Феритні жаростійкі сталі, як і всі метали з ОЦК-ґраткою, мають підвищений поріг хладноламкості. Це пояснюється тим, що вони володіють недосконалою електронною структурою.

Зведення до мінімуму впливу цих недоліків на властивості матеріалу – задача достатньо складна, рішення якої залежить від здійснення широкого комплексу наукових та технологічних заходів.

Одним із перспективних заходів по зниженню крихкості таких феритних сталей та їх зварних з'єднань є легування основного металу енергійними карбідоутворюючими елементами та розробка методів управління виділенням та розподілом надлишкових фаз при звичайному вмісті елементів втілення.

Необхідність проведення досліджень, спрямованих на покращення жаростійкості феритних сталей і можливості їх використання в окремих випадках замість аустенітних сталей з хромонікельовою композицією обумовлено, перш за все, міркуваннями економічної доцільності.



Рисунок 4.2 - Карта стейкхолдерів

Отже, стан ринку корозійностійких сталей буде залежати від попиту з боку промислових галузей - споживачів даного матеріалу. У минулому році обсяги виробництва в харчовій промисловості, хімічній промисловості і автомобілебудуванні пішли на спад, що не дає учасникам ринку привід для оптимізму. Невживаним резервом нарощування виробництва корозійностійкої сталі українського походження є пошук і опанування зовнішніх ринків.

#### 4.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення науково-дослідницької роботи

В даному розділі розраховується економічна ефективність від робіт на впровадження впровадження сталі феритного класу 08X8CЮТч замість сталі аустенітного класу 12X18H10T для ракетобудівництва.

До складу витрат на виконання науково-дослідницької роботи включається вартість всіх ресурсів, необхідних для реалізації комплексу робіт.

Оскільки сталь виготовляється на підприємстві «Дніпрспецсталь», розрахуємо фонд заробітної плати виробничих працівників, тобто витрати на виплавлення сталі.

Таблиця 4.4 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

| Категорії працівників               | Наявна чисельність, осіб |         | Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн / годину | Ефективний фонд робочого часу, годин | Тарифний заробіток, грн. | Преміальний відсоток до тарифного заробітку | Розмір премії, грн. | Річний фонд заробітної плати, грн. | ЄСВ, грн |
|-------------------------------------|--------------------------|---------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|----------|
|                                     | за зміну                 | на добу |                                                            |                                      |                          |                                             |                     |                                    |          |
| 1                                   | 2                        | 3       | 4                                                          | 5                                    | 6                        | 7                                           | 8                   | 9                                  | 1        |
| Виробничі працівники, в тому числі: |                          |         |                                                            |                                      |                          |                                             |                     |                                    |          |
| <u>1.Основні працівники</u>         |                          |         |                                                            |                                      |                          |                                             |                     |                                    |          |
| Металург                            | 1                        | 3       | 90                                                         | 8                                    | 10800                    | 15                                          | 1600                | 129600                             | 28512    |

|                                          |   |    |     |   |       |    |      |        |       |
|------------------------------------------|---|----|-----|---|-------|----|------|--------|-------|
| Інженер-технолог (металург)              | 1 | 1  | 100 | 8 | 17600 | 20 | 3500 | 198400 | 59520 |
| Майстер                                  | 1 | 3  | 80  | 8 | 12800 | 10 | 1280 | 153600 | 33792 |
| <u>2. Допоміжні працівники</u>           |   |    |     |   |       |    |      |        |       |
| Контролер ВТК                            | 1 | 3  | 50  | 8 | 8800  | 10 | 880  | 105600 | 23232 |
| <u>3. Черговий та ремонтний персонал</u> |   |    |     |   |       |    |      |        |       |
| Електрик                                 | 1 | 3  | 80  | 8 | 12800 | 10 | 1280 | 153600 | 33792 |
| Механік                                  | 1 | 3  | 80  | 8 | 12800 | 10 | 1280 | 153600 | 33792 |
| Разом виробничих працівників             |   | 16 |     |   |       |    |      |        |       |

Для проведення дослідницької були залучені науковці. Розрахунок заробітної плати науково персоналу наведено в табл. 4.5. Ці витрати вважаються основними для даного дослідження

Таблиця 4.5 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу (наукового персоналу)

| № | Посада виконавця               | Кіл-ть людей | Місячний оклад, грн | Середньоденна зарплата, грн | Зайнятість НДР, днів | Загальна сума, грн |
|---|--------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 2                              | 3            | 4                   | 5                           | 6                    | 7                  |
| 1 | Головний науковий співробітник | 1            | 5400                | 270                         | 35                   | 9450               |
| 2 | Молодший науковий співробітник | 1            | 3500                | 175                         | 76                   | 13300              |
| 3 | Лаборант                       | 1            | 3200                | 160                         | 14                   | 2240               |
| 4 | Разом                          |              |                     |                             |                      | 24 990             |

#### Відрахування на соціальне страхування ССВ

Ці витрати визначаються в розмірі 22% основної та додаткової зарплати. Ці дані заносяться до табл. 4.3.

$$C_{\text{соц.стр.}} = (3П_{\text{осн}} + 3П_{\text{доп}}) \cdot 0,22 = (24\,990 + 2249) \cdot 0,22 = 5992 \text{ грн.} \quad (4.1)$$

Накладні витрати по проведенню науково-дослідницької роботи визначаються у відсотках від основної заробітної плати її виконавців ( у межах 80-100%). До них відносяться витрати, пов'язані з управлінням, утриманням і експлуатацією устаткування й приміщень, створенням необхідних санітарно-гігієнічних умов.

$$C_{\text{в}} = 3П_{\text{осн}} \cdot 0,9 = 24\,990 \cdot 0,9 = 22\,491 \text{ грн.} \quad (4.2)$$

Стаття "Інші витрати" складас 2-3 % суми усіх попередніх статей витрат на утримання і експлуатацію устаткування.

$$C_i = (C_{\text{сод.стр}} + C_{\text{в}}) \cdot 0,02 = (5992 + 22\,491) \cdot 0,02 = 569,66 \text{ грн.} \quad (4.3)$$

Таблиця 4.6- Розрахунок вартості матеріалів для дослідження

| Матеріал                              | Витрати матеріалу, кг | Ціна за одиницю, т | Сума витрат |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| Сталь 08Х8СЮТч                        | 20                    | 13100              | 262         |
| Реактиви                              | -                     | -                  | 512         |
| Фотонапір                             |                       |                    | 69          |
| Усього                                |                       |                    | 843         |
| Транспортно-заготівельні витрати (5%) |                       |                    | 43          |
| Всього                                |                       |                    | 886         |

## 2) Спеціальне обладнання для наукової (експериментальної) роботи

В цій статті враховуються витрати на купівлю, доставку та монтаж лабораторних установок, вимірювальних та регулюючих приладів, пристроїв, випробувальної апаратури та тощо.

Таблиця 4.7 – Витрати на спеціальне устаткування

| Перелік устаткування                     | Ціна за один., грн | Срок експлуатації | Амортизація | Кіл-ть днів | Вартість експлуатації |
|------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 1                                        | 2                  | 3                 | 4           | 5           | 6                     |
| Оптичний мікроскоп                       | 23500              | 25                | 940         | 2           | 705                   |
| Растровий електронний мікроскоп РЕМ 1061 | 2077092            | 15                | 138472,8    | 6           | 62312                 |
| Разом                                    |                    |                   |             |             | 63017                 |

Таблиця 4.8 – Кошторис витрат на виконання науково-дослідницької роботи

| Стаття витрат                      | Сума   |
|------------------------------------|--------|
| Матеріали                          | 716    |
| Витрати на спеціальне устаткування | 63017  |
| Основна заробітна плата            | 24990  |
| Додаткова заробітна плата          | 2240   |
| Єдиний соціальний внесок           | 5992   |
| Накладні витрати                   | 22491  |
| Інші витрати                       | 569.66 |
| Разом                              | 120025 |

Факторами, що забезпечують економічний ефект є здешевлення сировини, що використовується, оскільки тут не використовується нікель.

Таблиця 4.9 - Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту від впровадження результатів роботи

| Найменування показників                         | Поковка зі сталі 08Х8СЮТч |
|-------------------------------------------------|---------------------------|
| Коефіцієнт стійкості                            | 3,8                       |
| Вартість виготовлення одиниці виробу, грн.      | 90                        |
| Оптова ціна вихідного матеріалу, грн/т          | 11700                     |
| Середній коефіцієнт використання                | 0,4                       |
| Коефіцієнт, що враховує кількість               | 0,6                       |
| Кількість виготовленого виробу з 1 т сталі, шт. | 12                        |
| Ціна кускових відходів, грн/т                   | 5000                      |

Економічний ефект від зниження витрат на переплавку виробу визначається згідно з формулою:

$$\mathcal{E}_и = (K_c \cdot C - C^1) \cdot B$$

де  $C$  та  $C^1$  - вартість виготовлення виробу

$B$  – кількість виробів, виготовленого з 1 т сталі.

Повний економічний ефект  $\mathcal{E}_п$

$$\mathcal{E}_п = \mathcal{E}_м + \mathcal{E}_и$$

Розрахунок економічного ефекту:

$$\mathcal{E}_m = 3,8 \cdot [56000 - 0,9 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 2500 + 0,6 \cdot 1000)] - [11700 - 0,9 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 5000 + 0,6 \cdot 1500)] = 209380 - 11320 = 197060 \text{ грн/т}$$

$$\mathcal{E}_n = (3,8 \cdot 120 - 120) \cdot 12 = 4032 \text{ грн/т}$$

Повний економічний ефект рівний:  $\mathcal{E}_{\Pi} = 197060 - 40320 = 201380 \text{ грн/т}$

Отже, застосування результатів даної науково-дослідницької роботи на практиці має економічне обґрунтування. Попередження руйнування поковок зі сталі 08Х8СЮТч значно знизить витрати виробництва на переплав, розлив та обробку матеріалу. Доцільність впровадження даної розробки підтверджується проведеними вище розрахунками та допоможе попереджувати подальші відхилення від норми. Тобто встановлення причини руйнування попередить виникнення дефектів в майбутньому. Очікуваний економічний ефект від впровадження науково-дослідницької роботи становить 201380 грн/т при витратах на дослідження 120025 грн.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

В термічній лабораторії проводяться випробування на жаростійкість сталей аустенітного (12X18H10T) та феритного (08X8CЮТ4) класів. Обладнання лабораторії складається з електричної печі з окисною атмосферою.

Розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці в лабораторії для випробування жаростійкості.

### 5.1 Аналіз потенційних небезпек

В лабораторії можливі такі шкідливі фактори, як випромінювання від нагрівачів електричної печі, збільшена концентрація парів, запиленість, а також небезпечні фактори: збільшена температура металу і поверхні обладнання, електричний струм, гострі краї деталей.

Робота електричної печі пов'язана з виділенням тепла і наявністю високих температур, що створює небезпеку теплового ураження персоналу. Опіки можуть бути отримані при дотику до нагрітих виробів чи вузлів печі, а також зовнішніх частин (каркасів, заслінки, ручок), які через погану теплоізоляцію перегріті вище допустимої температури. Випромінювання тепла крізь відкриті вікна термічних печей відбувається в період завантаження і вивантаження зразків.

Для електротермічного обладнання характерна наявність струмоведучих частин безпосередньо в робочому просторі, часто без електричної ізоляції або зі слабкою й ненадійною ізоляцією. Це підвищує небезпеку дотику відкритих струмоведучих частин при завантаженні, вивантаженні чи пересуванні зразків, що нагріваються. Контакт людини зі струмоведучою частиною може відбутися також через зразки або за допомогою інструменту.

Внаслідок несправності може виникнути електричний контакт між струмоведучими частинами і іншими металевими вузлами, в результаті чого кожух, заслінка чи інші вузли печі, з якими в процесі експлуатації стикається персонал, опиняться під напругою.

Піч футерована матеріалами, які водночас виконують функції електричної і теплової ізоляції. Однак при відсірюванні (при холодній печі) чи насиченні футеровки електропровідними матеріалами електроопір футеровки різко знижується і вона становиться електропровідною. Це створює небезпеку ураження струмом при дотику до футеровки.

Запилення атмосфери лабораторії частинками твердих матеріалів, присутніх в атмосфері у вигляді аерозолей, відбувається внесенням частинок пилу разом з повітрям, використанням у лабораторії силічних матеріалів, забрудненнями на поверхні деталей. Деякі з цих речовин, присутніх у повітрі у вигляді аерозолей, також є шкідливими.

Робота обладнання пов'язана з підвищеними рівнями шуму та вібрацій. Шум несприятливо впливає на організм людини, викликає психічні, фізіологічні порушення, що знижують працездатність і створюють передумови для загальних і професійних захворювань та виробничого травматизму.

При обслуговуванні обладнання необхідно також враховувати можливість механічного ураження обслуговуючого персоналу [21, 22].

## 5.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Для зменшення тепловіддачі від обладнання та інтенсивності теплового потоку у лабораторії використані різні засоби. Повітряний потік подають знизу вгору паралельно вікну печі. У верхній її частині встановлений витяжний зонтик. Теплоізововані заслінки, які щільно прилягають до завантажувального вікна, переміщують в похилих напрямках, що забезпечує їх щільне прилягання до

рами. Це сприяє зниженню тепловиділення між заслінкою і стінкою печі. Також перед завантажувальним вікном встановлені екрани.

Нагріті зразки розміщуються в місцях, обладнаних ефективною витяжною вентиляцією.

У конструкції термічної печі використана достатня ізоляція в зовнішньому шарі кладки. Різниця температур поверхні печі і повітря в приміщенні не перевищує 30 – 40°C.

Згідно класифікації приміщень за ступенем небезпеки поразки електричним струмом лабораторія для випробування жаростійкості відноситься до категорії приміщення з підвищеною небезпекою (ІІУЕ-86 «Правила устройства электроустановок»).

Відповідно до ГОСТ 121.019-79 "Электробезопасность" електричні печі забезпечені блокуванням для автоматичного відключення струму при відкриванні заслінки. Струмоведучі частини печей ретельно і надійно ізольовані, якість ізоляції регулярно перевіряється.

Для усунення небезпеки поразки струмом у випадку дотику до корпусу установки чи інших неструмоведучих металевих частин, які опинилися під напругою при замиканні на корпус, застосоване заземлення.

В лабораторії заземлені всі металеві неструмоведучі частини електрообладнання, які можуть опинитися під напругою при номінальній напрузі електроустановки вище 42 В змінного і 110 В постійного струму.

Усі струмоведучі частини мають огороження, що також заземлені.

Противага заслінки, а також приводи механізмів на печі огорожені.

На щиті та пульті керування електричної печі встановлені сигнальні лампи, які оповіщують про відключення напруги на нагрівачах печі.

Вікна печі для завантажування і вивантаження зразків зроблені мінімально необхідних розмірів.

У процесі експлуатації печі ведеться безупинне спостереження за цілісністю вогнетривкої кладки печі для того, щоб вчасно усунути всі

прогорання, нещільності, які є початком порушення герметичності, руйнування кладки і виходу з ладу печі.

Будівля відділення, в якому знаходиться лабораторія, відповідає нормам СНиП 2.09.02–85 "Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования". Стіни виготовлені з крупнопанельних і крупноблочних залізобетонних плит. Внутрішня поверхня їх пофарбована вогнетривкою фарбою. Для запобігання напружень і тріщин, які можуть виникнути в стінах споруди під впливом зміни температури зовнішнього повітря, передбачені температурні шви. Підлога відділення має гладку, нековзку поверхню, добре опирається стиранню і іншим механічним діям, водонепроникнена і вогнетривка, легко піддається прибиранню і миттю. Підлога пічного залу виготовлена з клінкеру. Для огороження ділянок ВТК і інших побутових приміщень всередині відділення встановлені вогнетривкі перегородки [21, 22].

### 5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Згідно з "Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий" СНиП 245–71, відділення з лабораторією відноситься до V класу санітарної класифікації підприємств із санітарно-захищеною зоною 50 м.

Для створення у лабораторії нормальних метеорологічних умов, видалення пилу існує належна вентиляція (відповідно до ГОСТ 12.1005–88).

Загальна природна вентиляція здійснюється шляхом провітрювання і аерації. Для аерації влаштовані прорізи в стінах споруди і ліхтарі на даху. Для провітрювання передбачені отвори переплетінь і інші устрої, які відкриваються, у вікнах площиною не менше 20% загальної площі світлових прорізів.

До природної вентиляції у лабораторії встановлено механічну систему вентиляції. Забір повітря для приточної вентиляції проводиться з "чистого" боку відділення, протилежного боку, в який здійснюється викид димових газів. На

відстані 25–30 м від відділення з лабораторією встановлені шахти висотою 3–5 м, з яких чисте повітря по каналах засмоктується вентилятором і подається у відділення крізь систему вихідних отворів. Зимом повітря для приточної вентиляції необхідно підігрівати, для чого використані калорифери.

Регулярне очищення – обов'язкова умова нормальної роботи вентиляційних установок.

З метою визначення вмісту в повітрі пилу і шкідливих газоподібних речовин регулярно у терміни, погоджені з органами санітарного нагляду, проводяться аналізи.

При виникненні аварійної ситуації приточні і витяжні установки негайно виключаються.

Використовуються і засоби індивідуального захисту – респіратори, спеціальний одяг, рукавиці та ін.

Через наявність надлишкового тепла, а також для покращення умов праці у лабораторії створений сприятливий мікроклімат. Оптимальні і допустимі температури, відносна вологість і швидкість руху повітря на постійних робочих місцях та допустима температура повітря поза робочими місцями відповідають нормам (табл.5.1).

Температура нагрітих поверхонь обладнання і огорожень на робочому місці не перевищує 45°C (СН 245–71). Також використане екранування робочого місця. Графік проведення роботи складений з урахуванням розосередження в часі гарячих операцій. Робота у важких температурних умовах вимагає перерву та підмін для відпочинку і зняття перевантаження організму. Відпочинок проводиться у відповідних метеорологічних умовах.

Опалення лабораторії розраховується за балансом тепловиділення від технологічних процесів і нагрітого металу та тепловтрат крізь стіни споруди. При значних тепловиділеннях опалення лабораторії навіть в зимній період діє тільки в неробочий час.

Таблиця 5.1 – Оптимальні норми температури, відносної вологості і швидкості переміщення повітря в робочій зоні виробничих приміщень (ГОСТ 12.1.005–88)

| Сезон року                        | Категорія робіт         | Температура, °C | Відносна вологість, % | Швидкість переміщення повітря, м/с |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Холодний і перехідний період року | Легка, I                | 20-23           | 60-40                 | 0,2                                |
|                                   | Середньої важкості, Ia  | 18-20           |                       | 0,2                                |
|                                   | Середньої важкості, IIб | 17-19           |                       | 0,3                                |
|                                   | IIб                     | 16-18           |                       | 0,3                                |
|                                   | Важка, III              |                 |                       |                                    |
| Теплий період року                | Легка, I                | 22-25           | 60-40                 | 0,2                                |
|                                   | Середньої важкості, Ia  | 21-23           |                       | 0,3                                |
|                                   | Середньої важкості, IIб | 20-22           |                       | 0,4                                |
|                                   | IIб                     | 18-21           |                       | 0,5                                |
|                                   | Важка, III              |                 |                       |                                    |

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Для створення природного освітлення у лабораторії використані вікна в стінах і ліхтарі на даху. Для штучного освітлення передбачені газорозрядні лампи низького і високого тиску. Для місцевого освітлення передбачені світильники з відбивачами, які не просвічуються і мають захисний кут не менше 30°. Допускаються світильники з відбивачами, які мають захисний кут від 10 до 30° при розташуванні їх нижче рівня очей працюючого. Також у лабораторії передбачено систему освітлення. В таблиці 5.2 приведені норми освітленості згідно зі СНиП 11-4-79.

Таблиця 5.2 – Норми освітленості для ділянок термічних цехів

| Назва ділянки                   | Освітленість при штучному освітленні, лк |          | Значення КІО, %     |                     |
|---------------------------------|------------------------------------------|----------|---------------------|---------------------|
|                                 | Комбіноване                              | Загальне | Загальне освітлення | Суміщене освітлення |
| Пічна зала                      | -                                        | 75       | 1                   | 0,7                 |
| Робочі місця у печей            | 200                                      | 150      | 3                   | 1                   |
| Контрольно-вимірювальні прилади | 300                                      | 200      | 3                   | 1                   |

На випадок раптового припинення подачі електроенергії відділення, в якому знаходиться лабораторія, обладнане аварійним освітленням, що забезпечує освітленість не менш 5% освітленості, нормованої при загальному освітленні, і не менш 2 лк на підлоги основних проходів для виходу людей [21, 22].

Рівень шуму і вібрацій в лабораторії не перевищує значень нормативних вимог.

#### 5.4 Заходи з пожежної безпеки

У відповідності до СНиП 2.09.02–85 лабораторія для випробування жаростійкості за вибухо-пожежонебезпекою належить до категорії Г. Пожежі можуть бути викликані спалахом дротів і інших матеріалів в результаті погіршення правил складування гарячих деталей; іскрою і електричною дугою, які виникли в несправних електроустановках; загорянням ізоляції внаслідок короткого замикання проводів, в яких порушений ізоляційний шар; несправністю обладнання і контрольно-вимірювальних приладів. Використання

легкоспалахуючих рідин для миття підлог і стін в умовах лабораторії також може привести до їх загоряння.

В зв'язку з цим у лабораторії передбачені автоматичні оповісники про пожежу та система пожежної сигналізації.

Пожежні крани протипожежного водопроводу встановлені на висоті 1,35 м над підлогою в коридорах, проходах і інших доступних місцях. Кожен пожежний кран забезпечений рукавом довжиною 10 та 20 м і стволом. Пожежний рукав тримається постійно приєднаним до крану, а ствол – до рукава. Протипожежний водопровід і пожежні крани у відділенні, згідно з ГОСТ 12.4.009–75, через кожні 6 місяців піддаються технічному обслуговуванню і перевіряються на працездатність шляхом пропускання води.

Запобігання поширення пожежі забезпечується:

- пристроями протипожежних перешкод;
- пристроєм аварійного відключення та переключення апаратів і комунікацій;
- застосуванням засобів, що запобігають чи обмежують розлив і розтікання рідин при пожежі;
- застосуванням вогнеперегороджуючих пристроїв (затворів, заслінок і т.п.).

У лабораторії передбачені первинні засоби пожежогасіння. Три вогнегасники ОУ-8 та ОП-10, опломбовані, мають розрахункові номери і бирки, маркувальні написи на корпусі пофарбовані в червоний сигнальний колір і розташовані на висоті 1,5 м від підлоги.

Пожежна сигналізація і зв'язок призначені для швидкої і точної передачі повідомлення про пожежу і місце його виникнення, приведення в дію виробничих автоматичних засобів пожежогасіння й оперативного керівництва гасінням пожежі. У системах пожежної сигналізації автоматичної дії встановлені оповісники теплові датчики.

Для контролю складу повітря в приміщенні з метою запобігання утворення вибухо- і пожежонебезпечних сумішей встановлені стаціонарні автоматичні

газоаналізатори, в них встановлені сигналізуючі пристрої, що спрацьовують при досягненні концентрації 0,5 від вибухонебезпечної.

Для гасіння пожежі застосовані газові (вуглекислий газ, інертні гази) і порошкові установки. Такі установки крім автоматичного включення мають дистанційний і ручний пуск.

У відділенні з лабораторією забезпечена можливість швидкої безпечної евакуації людей у випадку виникнення пожежі. Відділення має два евакуаційні виходи, які розташовані в протилежних боках приміщення. Допустима довжина шляхів евакуації (найбільша відстань від найбільш віддаленого робочого місця і до найближчого евакуаційного виходу) не більше 50 м [21, 22].

Розроблені заходи щодо охорони праці забезпечують безпечні і нешкідливі умови праці працівників у лабораторії.

### 5.5 Заходи з цивільної оборони

Розглянемо загальні положення розташування евакуаційних виходів з будівель та приміщень, зокрема зі відділення, в якому знаходиться лабораторія.

Евакуаційні виходи для людей не проходять через приміщення з виробництвами А, Б, а також через приміщення в будівлях IV і V ступеню вогнестійкості. Ворота для залізничного рухомого складу не враховані при розрахунках евакуаційних виходів.

Дозволяється проектувати один евакуаційний вихід з приміщення, яке розташоване на будь-якому поверсі (за винятком підвального та цокольного), якщо відстань від найбільш віддаленого робочого місця до цього виходу не перевищує 25 м і число працюючих в зміні не більше 50 чоловік – в приміщеннях з виробництвами категорії І, до якої належить відділення з лабораторією.

Із приміщень, розташованих на всіх поверхах, дозволяється передбачати другий (запасний) вихід на зовнішні сходишки. Зовнішні відкриті сталеві

сходини, призначені для евакуації людей, повинні мати нахил не більше 1:1 і ширину не менше 0,7 м.

Ширина маршу сходи повинна бути не менше ширини евакуаційного виходу (дверей) на сходи і не менше 1 м, а ширина зовнішніх дверей сходи – не менше ширини маршу.

Ширина проходу і сходи до окремих робочих місць допускається 0,7, а для евакуації не більш 50 чоловік – 0,9 м.

В будівлях з виробництвами категорій Г передбачаються сходи з природним освітленням через вікна в зовнішніх стінах [23].

## ВИСНОВКИ

Порівняльні випробування показали, що жаростійкість сталі 08X8CrЮТч може порівнюватись з жаростійкістю сталей 12X18H10T, 08X18T1 та помітно перевищує цей показник у сталі YUS 409D.

Високі жаростійкі властивості сталі 08X8CrЮТч зберігаються при температурах порядку 900 °C та тривалих термінах експлуатації за рахунок утворення на її поверхні щільних, добре зчеплених з матрицею оксидних плівок, які уявляють з себе комплексне з'єднання оксидів хрому, алюмінію, кремнію шпінельного типу.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що економнолегована сталь 08X8CrЮТч зберігає жаростійкість і не поступається за нею сталі 12X18H10T до температур 1200 °C, а сплаву ХН45Ю до температур 1100 °C. Подальше вдосконалення системи легування може надати можливість використовувати сталі феритного класу і при більш високих температурах. Оптимістичні прогнози можна вважати цілком коректними, оскільки відомо про величезний практичний досвід використання фехралів (типу Х25Ю5) до температур порядку 1350 °C.

Використання параметричного методу в дослідженні жаростійких властивостей сталі 08X8CrЮТч дозволили спрогнозувати її поведінку в умовах газової корозії при різних температурах та термінах експлуатації. Згідно побудованої параметричної діаграми, гарантований термін експлуатації виробів при температурах 800 – 850 °C склав 100000 годин.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Выбор, исследование работоспособности и изыскание средств повышения жаро- и коррозионной стойкости металлических материалов, используемых в системах снижения токсичности и узлов выхлопного тракта ДВС: Отчет о НИР (заключительный) / ФНИКТИД; № ГР78033628, инв. № 018705. М.: 1980. 60 с.
2. Такаи М. Методы ресурсных испытаний двигателей с каталитическим нейтрализатором: Пер. с яп. М.: Металлургия, 1986. 54 с.
3. Нестеров А.В., Стукало Л.А. Перспективы применения экономнолегированных жаростойких сталей для газовыхлопа автомобилей. *Материалы IV Всесоюзной научн.-техн. конф. «Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий»*. Запорожье, ЗМИ. 1989. 148 с.
4. Никитин В.И. Расчет жаростойкости металлов. М.: Металлургия, 1976. 206 с.
5. Михайловский Ю.Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. М.: Металлургия, 1989. 103 с.
6. Эксплуатационная проверка работоспособности безникелевых сталей в составе конструкций нейтрализующих средств ОГДВС: Отчет о НИР (заключительный) / ЦНИИТД; № ГР 78033628, инв. № Б. 725258. М.: 1978. 24 с.
7. Кофстат П. Высокотемпературное окисление металлов. М.: Мир, 1969. 283 с.
8. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1964. 532 с.
9. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургия, 1967. 650 с.
10. Архаров В.И. Окисление металлов при высоких температурах. Свердловск: Металлургиздат, 1945. 172 с.
11. Белтран А.М., Шорес Д.А. Высокотемпературная коррозия / Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 281 с.

12. Корнилов И.И. Железные сплавы. *Изв. АН СССР*. 1945. т. 1. 189 с.
13. Улиг Г.Г., Реве Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. / Под ред. А.М.Сухотина. Л.: Химия, 1989. 208 с.
14. Фукасе О. и др. Окисление и коррозия при высоких температурах: Пер. с яп. М.: Металлургия, 1977. 94 с.
15. Терехова В.Ф., Савицкий Е.М. Металловедение редкоземельных металлов. М.: Наука, 1969. 158 с.
16. Коваленко В.С., Зац Е.Л. Редкоземельные металлы в сплавах. *Изв. АН УССР. Институт проблем литья*. К.: 1969. № 3. 127 с.
17. Леонов А.И. Высокотемпературная химия кислородных соединений церия. Л.: Наука, 1970. 202 с.
18. Михайличенко А.И., Михлин Е.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987. 288 с.
19. Uhlig H.H.: Corrosion Science, 1967. V.7, P. 325.
20. MacRae., Surface Science, 1964. V.1, P.319.
21. Bloomer R.N. Brit J. Appl. Physics, 1957. V.8, P.321.
22. Wagner I., Lawless K., Gwathmey A. Trans. Metall. Soc., AIME, 1961. V.321, P.257.
23. Mott N.F., Cabrera N. Rept. Progr. Phys, 1948. V.12, P.163.
24. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности, ч.П.: Пер. с нем. М.: Металлургиздат, 1963. 276 с.
25. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.: Издательство АН СССР, 1945. 414 с.
26. Данков П.Д., Игнатов Д.В., Шишаков Н.А. Электронно-графические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах. М.: Издательство АН СССР, 1953. 386 с.
27. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Пассивность и защита металлов от коррозии. М.: Наука, 1965. 65 с.

28. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов: Пер. с англ. / Под ред. И.Л. Розенфельда. М.: Машгиз, 1962. 855 с.
29. Фрумкин А.Н. и др. Кинетика электродных процессов. М.: Издательство МГУ, 1952. 319 с.
30. Кабанов Б.А. Электрохимия металлов и адсорбция. М.: Наука, 1966. 285 с.
31. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1970. 448 с.
32. Фрейман Л.И. Коррозия и защита от коррозии. М.: ВИНТИ, 1985. т.11. 71 с.
33. Бабаков А.А., Преданцев М.В. Коррозионностойкие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1971. 319 с.
34. Маттссон В., Эйнар К. Электрохимическая коррозия: Пер. со швед. / Под ред. Я.М. Колотыркина. М.: Металлургия, 1991. 156 с.
35. Эренрейх Г.И., Шварц Б.Л. Электронная структура сплавов. М.: Мир, 1979. 205 с.
36. Горонкова А.Д., Левин Ф.П., Афанасьева С.С. Новые безникелевые коррозионностойкие стали типа «суперферрит» для химического машиностроения. *«Новые конструкционные стали и сплавы и методы их упрочнения»*. М.: Химия, 1984. 69 с.
37. Голованенко С.А., Фонштейн Н.М. Ферритомартенситные стали повышенной прочности для холодной штамповки и высадки. *Автомобильная промышленность*. 1982. № 8. 29 с.
38. Залкинд Ц.И., Агаронова Н.Н., Колотыркин Я.М. Ферритные нержавеющие стали – перспективный материал для деталей, работающих в агрессивных средах. *Химическая промышленность*. 1983. № 3. 225 с.
39. Миценко В.Г. Принципы легирования коррозионностойких двухфазных мартенситоферритных сталей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 1997. № 1–2. 44 с.

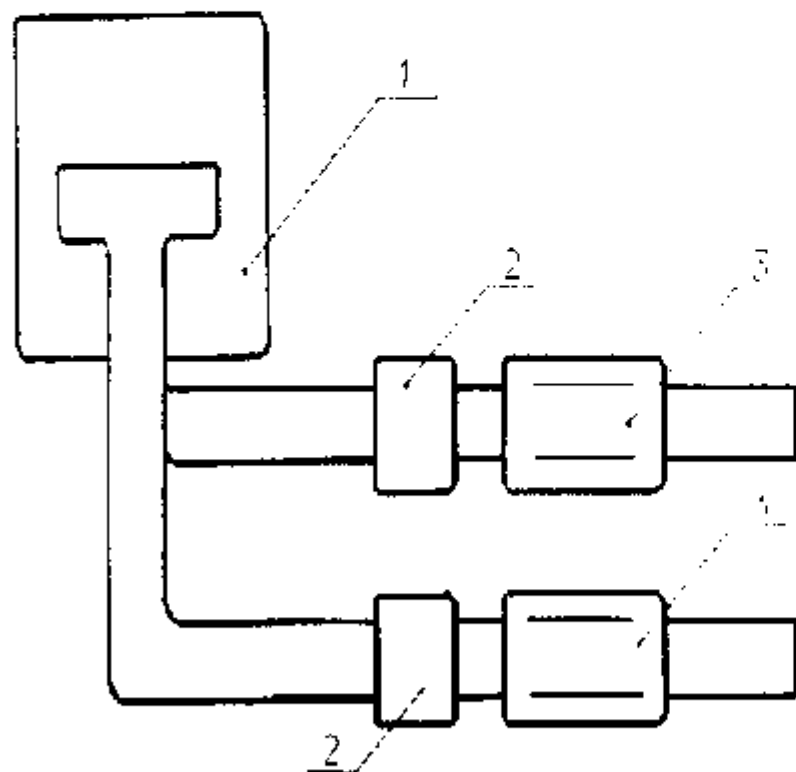
40. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 338 с.
41. Нестеров А.В., Климов А.В., Демешко В.В. Новые конструкционные материалы для изготовления деталей и узлов системы газовыхлопа автомобилей. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів: Сб. наук. праць ЗДТУ.* Запоріжжя, 1998. 204 с.
42. Сухотин А.М., Зотиков В.С. Химическое сопротивление материалов. Л.: Химия, 1975. 408 с.
43. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов / Справочник. М.: Металлургия, 1990. 319 с.
44. Томашев Н.Д., Чернова Г.П. Коррозия и коррозионностойкие сплавы. М.: Металлургия, 1973. 325 с.
45. Новые коррозионностойкие стали и сплавы и защита от коррозии. *Сб. научн. трудов под ред. А.Л. Белинского.* М.: НИИхиммаш, 1986. 103 с.
46. Гольдштейн М.И., Попов В.В. Растворимость фаз внедрения при термической обработке. М.: Металлургия, 1989. 200 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ  
ДОСЯГНЕННЯ ВИСОКИХ ПОКАЗНИКІВ  
КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ПРИ  
ОБМЕЖЕНОМУ ВМІСТІ ХРОМУ

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПОРІВНЯЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

| Марка сталі | Вміст елементів (% мас.) |       |         |        |        |              |        |         |
|-------------|--------------------------|-------|---------|--------|--------|--------------|--------|---------|
|             | C                        | Mn    | Si      | P      | S      | Cr           | Ni     | Ti      |
| 12X18H10T   | ≤0,11                    | ≤0,43 | ≤0,56   | ≤0,03  | ≤0,009 | 18 – 20      | 9 – 11 | ≤0,81   |
| 08X18T1     | ≤0,08                    | ≤0,33 | ≤0,54   | ≤0,03  | ≤0,009 | 17 – 19      | ≤0,35  | ≤0,60   |
| YUS 409D    | ≤0,03                    | ≤1,00 | ≤1,00   | ≤0,04  | ≤0,030 | 10 – 12      | ≤0,50  | ≤0,30   |
| XH45Ю       | ≤0,08                    | ≤0,80 | ≤0,80   | ≤0,03  | ≤0,020 | 18 – 20      | 44–46  | –       |
| 08X8CЮТЧ    | ≤0,08                    | ≤0,60 | 1,3–1,0 | ≤0,035 | ≤0,020 | 7,0 –<br>8,5 | ≤0,60  | 0,3–0,6 |

СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ  
ЗРАЗКІВ НА ЖАРОСТІЙКІСТЬ В ПРОДУКТАХ  
ГОРІННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ПАЛИВА



1 – ДВИГУН;

2 – МІСЦЕ УСТАНОВКИ  
ПРИСТОСУВАНЬ ЗРАЗКАМИ;

3 – НЕЙТРАЛІЗАТОРИ

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОСТІЙКОСТІ СТАЛІ 08Х8СЮТЧ

| Температура<br>випробувань, °С | Час випробувань,<br>год. | q, г/см <sup>2</sup> | h, мм                | p    |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|------|
| 550                            | 100                      | $3,10 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | 13,6 |
|                                | 500                      | $8,20 \cdot 10^{-5}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$ | 12,8 |
|                                | 1000                     | $3,80 \cdot 10^{-4}$ | $4,87 \cdot 10^{-4}$ | 12,5 |
|                                | 2000                     | $5,90 \cdot 10^{-4}$ | $7,56 \cdot 10^{-4}$ | 12,3 |
| 700                            | 100                      | $8,21 \cdot 10^{-4}$ | $1,05 \cdot 10^{-3}$ | 11,2 |
|                                | 500                      | $2,25 \cdot 10^{-3}$ | $2,88 \cdot 10^{-3}$ | 10,5 |
|                                | 1000                     | $4,20 \cdot 10^{-3}$ | $5,38 \cdot 10^{-3}$ | 10,2 |
|                                | 2000                     | $6,10 \cdot 10^{-3}$ | $7,89 \cdot 10^{-3}$ | 9,9  |
| 850                            | 100                      | $1,11 \cdot 10^{-2}$ | $1,42 \cdot 10^{-2}$ | 9,4  |
|                                | 500                      | $2,90 \cdot 10^{-2}$ | $3,71 \cdot 10^{-2}$ | 8,7  |
|                                | 1000                     | $3,60 \cdot 10^{-2}$ | $4,60 \cdot 10^{-2}$ | 8,4  |
|                                | 2000                     | $4,80 \cdot 10^{-2}$ | $6,15 \cdot 10^{-2}$ | 8,1  |

ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ПОЛЬОВИХ  
ВИПРОБУВАНЬ НА СТІЙКІСТЬ ДО  
АТМОСФЕРНОЇ КОРОЗІЇ



сталь 08X8CЮTч;



сталь 12X18П10T

сталь 08X18T1;



сталь YUS 409D



ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ  
ПРИШВИДШЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА КОРОЗІЙНУ  
СТІЙКІСТЬ В АТМОСФЕРНИХ УМОВАХ

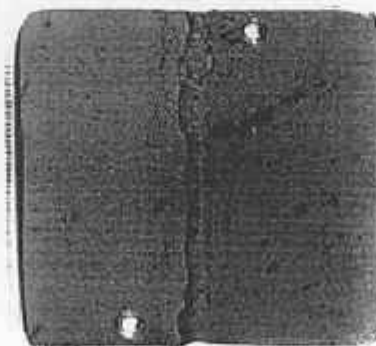


сталь 08X8CЮTч;

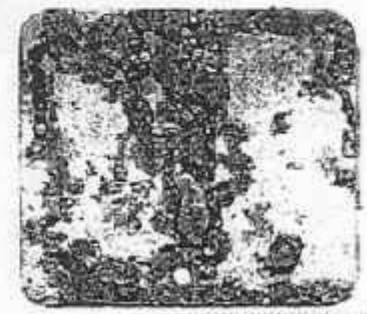


сталь 12X18H10T

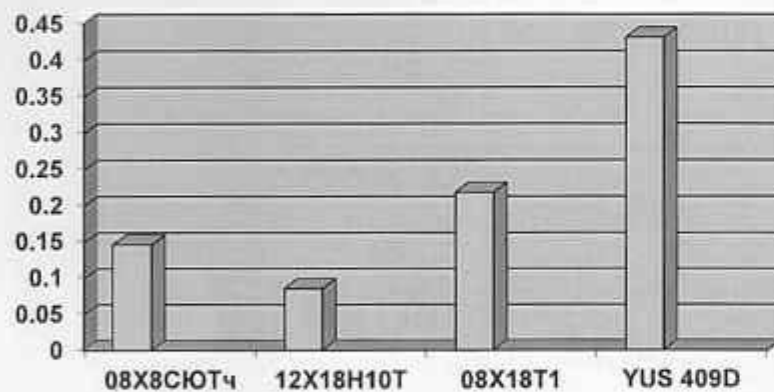
сталь 08X18T1;



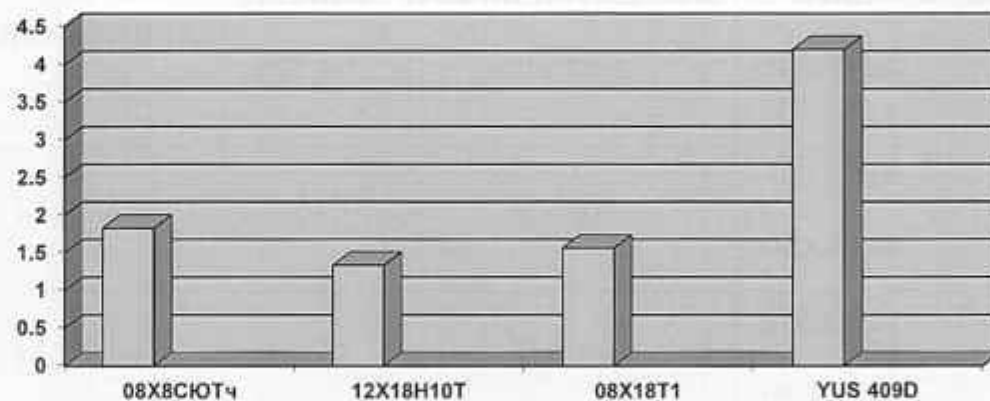
сталь YUS 409D



## ЖАРОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ



що досліджуються, в повітряній атмосфері  
при 700 °C, 2000 годин



в атмосфері відпрацьованих газів автомобіля в інтервалі  
температур 650 – 800 °C, 200 годин

## ПОРІВНЯЛЬНА ОКАЛИНОСТІЙКІСТЬ ЗРАЗКІВ

| Марка сталі   | Маса до випробування, г | Маса після випробування, г | Площа, $10^3 \cdot \text{м}^2$ | Окалиностійкість, г/м <sup>2</sup> год | Стан поверхні     |
|---------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 08X8CЮ<br>Тч  | 13,3060                 | 13,2735                    | 2,215                          | 0,147                                  | Щільна<br>окалина |
| 12X18Н1<br>0Т | 14,7495                 | 14,7274                    | 2,574                          | 0,086                                  | Щільна<br>окалина |
| 08X18Т1       | 12,3940                 | 12,3368                    | 2,613                          | 0,219                                  | Щільна<br>окалина |
| 08пс          | 11,6002                 | 11,5048                    | 2,210                          | 0,432                                  | Окалина<br>сипуча |

# ПРИРІСТ МАСИ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 1300 °C

