

formation of polypropylene microfibers. The performed microscopic studies showed that the predominant type of structure for all compositions is microfibrils. Modified filter materials retain mechanical impurities of 0.5 microns and above with an efficiency of 100%. At the same time, the precision of filtration also increases. A significant improvement in one of the main indicators of filters is due to an increase in the uniformity of the structure of the filter layer due to a decrease in the average diameter of microfibers by almost 2 times and an increase in their uniformity of distribution by diameters. It is shown that the use of the original and modified silicas as nanofillers makes it possible to improve the precision and efficiency of filter materials. At the same time, their productivity increases by 2.6÷3.0 times, which is due to a decrease in the hydraulic resistance of the filter layer. Thus, fine-fiber nanofilled polypropylene filtering materials can be used to purify drinking water, air, and liquid and gaseous process media in various industries.

Keywords: Filter materials, microfibers, polypropylene, mineral nanoadditives, phase boundary, surface phenomena, retention capacity, purification efficiency.

Стаття надійшла 9.12.2025 р.

УДК 669.15-194:620.92

doi.org/10.31498/2522-9990302025347274

Нестеров О.В., Рубан В.Т., Капустян О.Є.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ШЛЯХИ ПІДТРИМАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ АГРЕСІЇ

Дослідження присвячено пошуку альтернативних напрямів заміни високолегованих сталей спеціального призначення шляхом розробки економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів для застосування в енергетичному обладнанні. Досліджувались структура, механічні та експлуатаційні властивості економнолегованих жаростійких сталей 03X8CЮ, 03X8CЮВМБ, у порівнянні з раніше розробленою сталлю 08X8CЮТч. Визначалась можливість отримання додаткових технологічних та експлуатаційних якостей, таких як покращена здатність до штампування та витягування, жароміцність завдяки використанню вольфраму та молібдену як додаткових легувальних елементів. Підтверджено оптимальне співвідношення механічних властивостей та достатній рівень жаростійкості виробів в агресивних середовищах при підвищених температурах і корозійній стійкості в атмосферних умовах, а застосування додаткового легування надає можливість поширити функціональне призначення цих сталей. Теоретично обґрунтовано усунення титану зі складу дослідної сталі з метою поліпшення стану поверхні листового матеріалу при збереженні феритної структури. Необхідний рівень феритизації цього матеріалу пов'язаний із впливом низького вмісту вуглецю разом зі збалансованим (за кількістю) вмістом хрому, алюмінію і кремнію як ефективних феритоутворювачів, а також вольфраму та молібдену, які позитивно впливають на рівень жароміцності. Напрацьовано результати наукових досліджень щодо застосування економнолегованих сталей, хімічний склад яких не потребує використання гостро дефіцитних та кошових легувальних елементів, а отриманий сортамент гарячекатаних та холоднокатаних сталей дозволяє замінити високолеговані сталі спеціального призначення при виготовленні виробів енергетичного обладнання, зокрема облицювальних елементів топочних камер, труб та інших елементів, де застосовуються формозмінювальні операції і зварювання.

Ключові слова: Енергетичне обладнання, економнолеговані сталі, легувальні елементи, феритна структура, жаростійкість, жароміцність.

Постановка проблеми. Сучасні реалії економічного стану України полягають в тому, що через наслідки бойових дій виникає необхідність суттєвих змін в організації виробництва в багатьох галузях промисловості. Зокрема, вітчизняні підприємства металургійної галузі стикаються зі зниженням об'ємів та звуженням номенклатури легованих та високолегованих сталей спеціального призначення для виробів машинобудування та енергетики, отже вимушені прикладати багато зусиль для підтримки виробництва достатньої номенклатури металопродукції подвійного призначення, необхідної для забезпечення обороноздатності країни. Актуальність проблеми, головним чином, пов'язана зі зменшенням виробництва феросплавів, а в деяких випадках унеможливленням їх виробництва у зв'язку з руйнуванням профільних підприємств.

Технічне рішення, яке розглядається в статті, полягає у необхідності розробки та впровадження у виробництво економнолегованих спеціальних сталей як заміників традиційних високолегованих сталей. Розв'язанням цього завдання може бути розробка хімічного складу, технології виробництва необхідного сортаменту листових економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів. В практичній площині вирішувалось завдання по створенню листового металопрокату, призначеного для виготовлення складних елементів камер згорання топочних печей, газоходів, де температура досягає 800 °C в середовищі продуктів згорання твердих, рідких та газоподібних палив, а технології виготовлення їх передбачають застосування формозмінювальних операцій та зварювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При підготовці матеріалів для даної публікації були опрацьовані різні підходи до визначення можливості виробництва металопрокату з економнолегованих спеціальних сталей, які могли б бути заміниками високолегованих марок сталей, призначених для виробів, що працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ.

Слід зауважити, що на підприємствах металургійної галузі питанням створення економнолегованих металевих матеріалів приділялось недостатньо уваги, що було обумовлено доступністю матеріальних ресурсів.

Економічні умови пострадянського періоду, здороження та дефіцитність легувальних елементів, розвиток ресурсозберігаючих технологій визначили потребу створення економнолегованих сталей, листовий прокат з яких був би здатним до формоутворення методами штампування та витягування, мав би достатній рівень жаростійкості і корозійної стійкості, а за структурою був би однофазним.

В той же час в зарубіжній практиці були розроблені сталі з низьким сумарним вмістом вуглецю та азоту (0,025...0,035 %), додатково леговані кремнієм і титаном типу AISI-316, YUS-409D, AISI-409, DIN WNR 4512, що дозволило істотно знизити вміст хрому до 10...12 % за збереження рівня жаростійких та корозійностійких властивостей [1].

Дослідження в цьому напрямку були цікаві науковій спільноті на протязі останніх десятиріч, що було пов'язано з економічною кризою наприкінці двадцятого сторіччя. Суттєві результати були отримані науковцями Національного університету «Запорізька політехніка» (Запорізького національного технічного університету) сумісно з фахівцями металургійних підприємств «Дніпроспецсталь» та «Запоріжсталь». Основні результати були опубліковані в наукових звітах держбюджетних договорів та госпдоговорів з даними підприємствами, а також у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України та дисертаціях співробітників НУ «Запорізька політехніка».

Наукові дослідження на початковому етапі полягали у визначенні впливу кремнію та алюмінію на структуру та властивості залізохромистого сплаву з 7...13 % хрому. Показана принципова можливість стримання $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення при легуванні такого сплаву кремнієм та алюмінієм в межах 1,0...2,25 % та 1,0...1,5 % відповідно. Для зменшення

аустенітоутворюючого впливу вуглецю, вміст якого може бути в межах до 1 %, передбачалося використання титану в межах 1 %. При такому його вмісті частина титану утворює карбонітридні фази, а інша частина, розчиняючись у твердому розчині, збільшує кількість феритоутворюючих елементів [1]. На це технічне рішення було отримано авторське свідоцтво на феритну жаростійку сталь 08X8CЮТч [2].

Практичне апробування результатів розробки здійснено під час виготовлення гарячекатаного та холоднокатаного листового металопрокату та електрозварних труб. На цьому етапі були виготовлені дослідно-промислові партії виробів для систем газовипуску засобів транспорту та їх випробування. Отримані позитивні результати, які підтверджуються відповідними актами впроваджень як від виробника листового металопрокату, так і від підприємств-виробників кінцевої продукції. В процесі подальших досліджень дослідницький колектив прийшов до висновку про можливість розширення марочного складу економнолегованих жаростійких сталей, феритного класу, легованих хромом, алюмінієм та кремнієм, шляхом додаткового легування їх у невеликій кількості іншими елементами для отримання нових якостей та розширення галузей застосування.

Запропоновано знизити вміст вуглецю до 0,03 %, що стало можливим при впровадженні новітніх технологій виплавлення легованих сталей. Це дало змогу не використовувати титан, але зберегти феритну структуру. Сталь із вмістом 0,28 % C, 8,0 % Cr, 1,19 %, Si та 0,61 % Al прогнозовано отримала однофазну феритну структуру, навіть при відсутності у її складі титану, що дало змогу підвищити пластичність холоднокатаного прокату, який став більш придатним до операцій штампування та витягування, а також більш технологічним при зварюванні електрозварних труб та інших елементів газопроводів. Технічне рішення захищене патентом на корисну модель (сталь марки 03X8CЮ) [3].

Для вирішення завдання виготовлення елементів облицювання камер згорання топочних печей, де основною вимогою є достатній рівень жароміцності гарячекатаного прокату, було розроблено економнолеговану жаростійку сталь, особливостями якої є легування залізо-хромистої матриці при вмісті хрому 7...13 %, кремнієм та алюмінієм (0,8...1,5 % та 0,5...0,9 % відповідно), з додатковим легуванням вольфрамом, ванадієм, молібденом, ніобієм. Досліджено вплив додаткових легувальних елементів (W, V, Mo, Nb) для підвищення жароміцності економнолегованої жаростійкої дослідної сталі та визначенні границі їх вмісту: по вольфраму – 0,5...0,8 %, по ванадію – 0,6...0,9 %, по молібдену – 1,0...1,5 %, по ніобію – 0,5...0,8 %.

Роль додаткових легувальних елементів полягає в підсиленні міжатомних зв'язків у фериті, що збільшує пружний модуль зсуву. Це забезпечить збереження форми виробів при їх експлуатації в умовах підвищених температур. Крім цього дані елементи є ефективними феритоутворювачами. Отримана жаростійка сталь, яка містить: 0,03 % C, 8,0 % Cr, 1,2 % Si, 0,6 % Al, 0,65 % W, 0,75 % V, 1,0 % Mo, 0,65 % Nb. Це технічне рішення було також захищено патентом на корисну модель (сталь марки 03X8CЮВМБФ) [4].

Мета роботи. Пошук альтернативних шляхів заміни високолегованих сталей спеціального призначення шляхом розробки економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів для застосування в енергетичному обладнанні.

Для досягнення цілі необхідно вирішити наступні завдання:

- вибрати область легування сталі з метою одержання бажаної структури;
- встановити кількісне співвідношення легувальних елементів, що забезпечує отримання сталі з оптимальним поєднанням експлуатаційних і технологічних властивостей;
- розробити хімічний склад економнолегованої жаростійкої сталі;
- апробувати технологічність сталі при виробництві холоднокатаного листа та виготовленні з нього виробів;

– дослідити найважливіші експлуатаційні властивості сталі – жаростійкість і корозійну стійкість.

Виклад основного матеріалу. *Методи дослідження.* В роботі застосовано ряд досліджень, які дозволили у повній мірі визначити структурний стан досліджуваних сталей, значення механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей.

Було визначено ряд легувальних елементів, які входять до складу дослідницьких сталей, як додаткові, з метою розширення галузей використання отриманого металопрокату. Для визначення раціональних схем легування були створені лінійні плани експериментів, згідно яких були отримані плавки з різним вмістом легувальних елементів з урахуванням трьох факторів впливу.

Виплавку дослідних сталей проводили у вакуумно-індукційній електропечі. В подальшому зливки піддавали механічній обробці для видалення ливарної корки з поверхні та кування. Кування здійснювали за шість нагрівань. Видалення окалини теж здійснювали механічними засобами. Смуги розрізали на зразки розміри яких відповідали вимогам проведення подальших досліджень.

Дослідження мікроструктури проводили металографічним методом.

Механічні властивості зразків дослідних сталей після гарячого та холодного деформування та різних режимів рекристалізації визначали у відповідності із [5]. Випробування механічних властивостей зразків проводили на серво-гідравлічній машині фірми «Instron» моделі 8801. Визначали такі механічні характеристики: границя міцності, границя плинності, відносне подовження (звуження).

Порівняльні випробування жаростійкості проводили на зразках із економнолегованих дослідних сталей 08X8CЮТч (база порівняння), 03X8CЮ та 03X8CЮВМБФ в умовах, близьких до експлуатаційних для елементів камер згоряння та систем газовідведення - температура випробування 700° С; тривалість випробування – 100 год.

При обробці отриманих результатів використовували метод розрахунку результатів за величиною привіску з отриманням приросту маси на одиницю площі (формула 1):

$$q = \frac{m_1 - m_0}{S}, \quad (1)$$

де q – приріст маси на одиницю площі, г/см²;
 m_1, m_0 – маси зразка до та після випробувань, г;
 S – площа поверхні зразка, см².

Показники корозії та корозійної стійкості зразків визначали в умовах близьких до експлуатаційних для глушників шуму автомобілів та тракторів з урахуванням хімічного складу та структури сталі згідно методики ГОСТ 9.908-85.

Ступінь ураження поверхні зразка корозією визначали за формулою 2:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100, \quad (2)$$

де S_i – площа i -ї зони, м²;
 n – кількість зон.

Вибір раціональних схем легування для нових економнолегованих жаростійких сталей різного призначення.

Для визначення хімічного складу дослідницьких жаростійких сталей було розроблено математичний план ПФЕ (2³) з варіюванням основних легувальних елементів. Факторами варіювання були Cr, Si і Al.

Отримана жаростійка сталь однієї з дослідних плавок, яка містить: 0,03 % C, 8,0% Cr, 1,2% Si, 0,6% Al, 0,65% W, 0,75% V, 1,0% Mo, 0,65% Nb мала феритну структуру.

Результати досліджень мікроструктури зразків дослідних сталей в гаряче- та холоднодеформованому стані

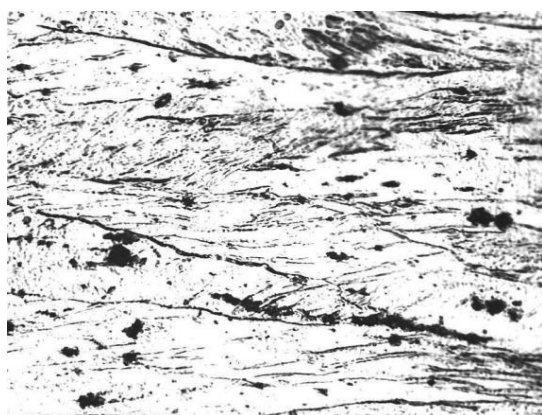
Дослідження структури зразків з дослідної сталі 03X8CЮ при переробці зливків на гарячедеформовані та холоднодеформовані смуги показало, що на усіх етапах зберігається структура фериту. Так, після гарячого кування зливків у структурі металу спостерігаються сліди смугастості (рис. 1, а).

Для поліпшення структури деформованого металу проводили рекристалізацію при температурі 950...970 °С. Волокнистість структури зникала і зерна фериту набували рівноосну форму з розміром зерен 4-5 балу (рис. 1,б). Холодну прокатку проводили з обтисненням близько 70%, при цьому структура знову набувала волокнисту будову (рис. 1,в). Формування кінцевої структури відбувалося у ході рекристалізації з температур 970...990 °С з охолодженням під водяним душем. По завершенню первинної рекристалізації зерна знову набували рівноосну форму з розвиненими границями. Розмір зерна зменшувався до 7-8 бала (рис. 1,г). Вважається, що листовий матеріал, який має таку форму і розмір зерен, найбільш придатний для отримання деталей методом штампування-витягування.

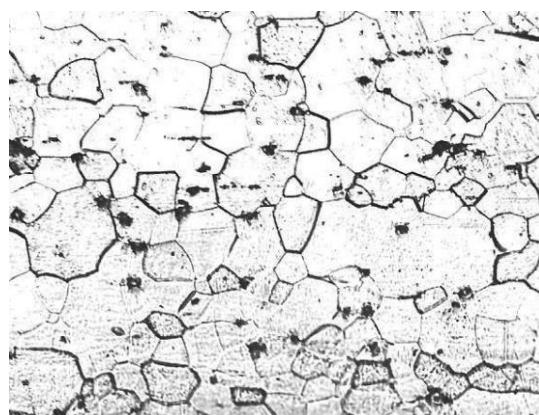
Дослідження мікроструктури дослідної сталі 03X8CЮВМБФ показало, що сталь має феритну структуру. Отримані зливки переробляли на гарячекатані сутунки методом вільного кування при ступені деформації близько 88 %. Мікроструктура гарячедеформованої сутунки представлена на рисунку 2,а. Сталь має однорідну структуру з витягнутими зернами фериту 3-4 балу.

З огляду на відсутність фазових перетворень та достатньо велику ступінь деформації та температуру кінця кування (780 °С) процес рекристалізації починається вже при температурі 870 °С. В подальшому при збільшенні температури рекристалізації зникає смугастість структури з невеликою різницею у розмірі зерен. При температурі рекристалізації 950-970 °С зерна набувають рівноосну форму з балом зерен 5-6 (рис. 2, б).

Результати випробувань механічних властивостей дослідних сталей з холоднокатаних смуг. Гаряче деформування зливків з дослідної сталі 03X8CЮ з температури 1050...1100 °С не спричиняло будь-яких складнощів. При наявності кремнію та алюмінію – легувальних елементів, які зміцнюють твердий розчин фериту – тріщин аж до кінця деформування (870 °С) не було виявлено. В результаті отримували штаби товщиною 5-6 мм, які піддавали рекристалізації при температурі 950...970 °С, де було усунення смугастості структури, що позитивно вплинуло на спорідненість значень механічних властивостей як впродовж, так і впоперек напрямку деформації.



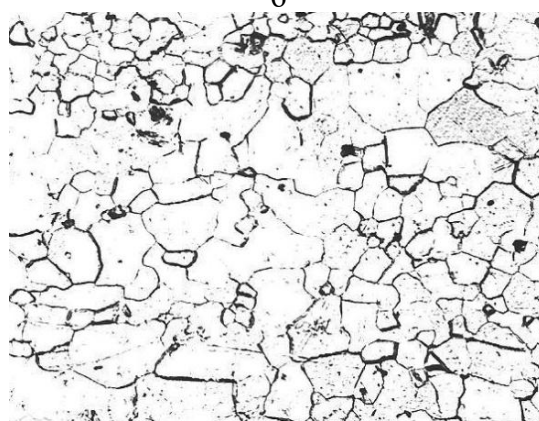
а



б



в



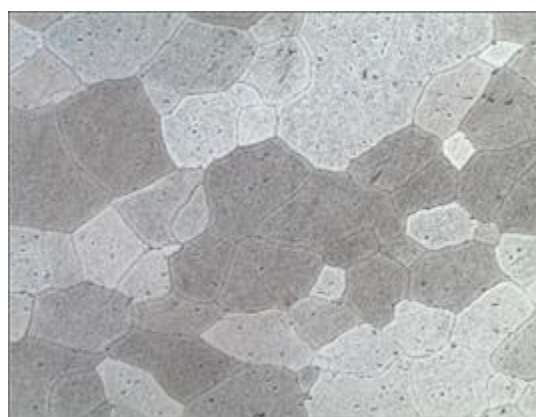
г

а – гарячекатані смуги без термообробки; б – гарячекатані смуги після рекристалізації при 960 °С; в – холоднокатані нагартвані смуги; г – холоднокатані рекристалізовані смуги (980 °С)

Рисунок 1 – Типова структура дослідних зразків зі сталі 03Х8СЮ на усіх етапах переробу, $\times 100$



а



б

а – нагартований стан; б – рекристалізація при 950 °С

Рисунок 2 – Мікроструктури гарячекатаних дослідних зразків зі сталі 03Х8СЮВМБФ у нагартваному та рекристалізованому стані; $\times 100$

Механічні властивості металу у гарячекатаному стані є такими: $\sigma_T^{0,2} = 300$ МПа; $\sigma_B = 535$ МПа; $\delta_5 = 28$ %; НВ 388.

Підготовлені штаби піддавали холодній прокатці на смуги за 15-20 проходів на двовалковому стані до товщини 1,5...2,0 мм. Після холодної прокатки проводилась рекристалізація при температурі 950...970 С.

Механічні властивості холоднокатаного листа дослідної сталі є такими: $\sigma_T^{0,2} = 182$ МПа; $\sigma_B = 308$ МПа; $\delta_5 = 28$ %; НВ 235; $\sigma_T/\sigma_B = 0,59$. Значення механічних властивостей холоднокатаного листа з дослідної сталі свідчили про можливість отримання виробів шляхом штампування та витягування.

Для сталі 03Х8СЮВМБФ рекристалізація при температурах 870...950 °С з різним ступенем деформації позитивно впливає на отримання оптимальної феритної структури з розвиненими зернограничними зонами. Вплив додаткових легувальних елементів, таких як ванадій та ніобій, полягає у дисперсійному зміцненні частками термостійких інтерметалевих фаз, які стримують рух дислокацій, а легування вольфрамом і молібденом забезпечує необхідний рівень твердорозчинного зміцнення за рахунок локального викривлення кристалічної ґратки, тобто підвищення внутрішнього тертя.

Результати випробувань механічних властивостей сталі 03Х8СЮВМБФ у гарячедеформованому та рекристалізованому стані є такими: $\sigma_T^{0,2} = 203,3$ МПа; $\sigma_B = 522$ МПа; $\delta_5 = 22$ %; НВ 207.

Результати дослідження жаростійкості дослідних сталей в окислювальному середовищі. Температурні і часові параметри випробувань та кількісні показники жаростійкості, представлені у табл.1

Таблиця 1 – Характеристики жаростійкості дослідної сталі

Марка сталі	Жаростійкість, q , г/см ²
08Х8СЮТч	$8,21 \cdot 10^{-4}$
03Х8СЮ	$2,9 \cdot 10^{-4}$
03Х8СЮВМБФ	$3,06 \cdot 10^{-3}$

Результати досліджень свідчать про те, що сталь 03Х8СЮВМБФ та сталі 08Х8СЮТч і 03Х8СЮ мають достатній рівень жаростійкості притаманний більшості високолегованих корозійностійких сталей. Зважаючи на вміст легувальних елементів, які найбільш впливають на жаростійкість, але окрихчують твердий розчин – кремнію та алюмінію, вміст їх в сталі 03Х8СЮВМБФ знижено (з 1,0...2,25 % до 1,0...1,5 % та з 1,0...1,5 % до 0,6...0,9 % відповідно). Це і обумовило нижчі показники жаростійкості порівняно зі сталями 08Х8СЮТч і 03Х8СЮ. Однак отриманий рівень жаростійкості дозволяє використовувати ці матеріали для виготовлення виробів, які придатні працювати в умовах агресивних середовищ при температурах 700 °С довготривало та до 1000 °С короткочасно.

Аналіз результатів порівняльних випробувань стійкості до атмосферної корозії в умовах міського середовища та прискорених випробувань в камері сольового туману зразків сталі 03Х8СЮ. Визначили, що корозійні ушкодження на зразках після випробувань у міському середовищі, після експозиції 30000 год. виражені не явно (площа корозійних пошкоджень на зразках складає 15 %), при прискорених випробуваннях у камері сольового туману після експозиції 100 год, у зв'язку з набагато більшою агресивністю середовища, площа корозійних пошкоджень на зразках складає 80 % (рис. 3). Таким чином, розроблена дослідна сталь має достатній рівень корозійної стійкості, який є притаманним економнолегованим жаростійким сталям імпортного виробництва.



а – випробування у міському середовищі; б – прискорені випробування у камері сольового туману

Рисунок 3 – Корозійні ушкодження на зразках із дослідної сталі 03X8CЮ

Визначення рівня жароміцності дослідної сталі 03X8CЮВМБФ. За результатами досліджень встановлено, що найбільший внесок у підвищення показників жароміцності мають вольфрам та молібден. При цьому підвищення жароміцності не призводить до погіршення жаростійкості. Зразки з дослідної сталі випробували на руйнування при статичному навантаженні 100 МПа та температурі 600 °С, при витримці 100 год руйнування зразків не сталося.

Аналіз впливу додаткових легувальних елементів на експлуатаційні властивості сталі та результати випробувань дають підстави рекомендувати даний матеріал у гарячекатаному стані товщиною 6-8 мм для облицювання камер згорання теплогенеруючого обладнання.

ВИСНОВКИ

Таким чином, результати наукових досліджень здатні внести певний вклад у вирішення проблеми відновлення теплової електрогенерації України. Виготовлення холоднокатаного та гарячекатаного металопрокату розроблених економнолегованих жаростійких сталей дозволить використовувати вітчизняні промислові потужності та технології на підприємствах металургійної галузі, зменшити витрати на відновлення елементів енергетичного обладнання, які працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ.

Список використаних джерел

1. Нестеров О.В. Дослідження та розробка економнолегованої ферритної жаростійкої сталі для системи вихлопного тракту автомобілів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Запоріжжя, 2000. 31 с.
2. Феритна жаростійка сталь: пат. 15168 Україна: МПК C22C 38/18, № u200512448; заявл. 23.12.2005; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6, 3 с.
3. Феритна жаростійка сталь: пат. 94450 Україна: МПК C22C 38/18, заявл. 11.06.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21, 4 с.
4. Жаростійка феритна сталь: пат. 61987 Україна: МПК C22C 38/18, № u201015817; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15, 4 с.
5. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT) [На заміну ДСТУ EN 10002-1:2006, ДСТУ 4131-2002, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 11701-84, ГОСТ 10006-80; чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

ALTERNATIVE WAYS TO REPLACE HIGH-ALLOY SPECIAL-PURPOSE STEELS

The study is dedicated to finding for alternative ways to replace high-alloy special-purpose steels by developing economical alloyed steels, the structure and properties of which would ensure the manufacture and long-term operation of a wide range of products for use in energy equipment. The structure, mechanical and operational properties of economically alloyed heat-resistant steels 03X8SYU, 03X8SYUVMB were studied, in comparison with the previously developed steel 08X8SYUTch. The possibility of obtaining additional technological and operational qualities such as improved stamping and drawing ability, heat resistance due to the use of tungsten and molybdenum as additional alloying elements was determined. The optimal ratio of mechanical properties and a sufficient level of heat resistance of products in aggressive environments at elevated temperatures and corrosion resistance in atmospheric conditions were confirmed, and the use of additional alloying makes it possible to expand the functional purpose of these steels. Theoretically, the removal of titanium from the composition of the experimental steel is justified in order to improve the surface condition of the sheet material while maintaining the ferritic structure. The required level of ferritization of this material is associated with the influence of a low carbon content together with a balanced (in terms of quantity) content of chromium, aluminum and silicon as effective ferrite formers, as well as tungsten and molybdenum, which positively affect the level of heat resistance. The results of scientific research on the use of economically alloyed steels have been developed, the chemical composition of which does not require the use of acutely scarce and expensive alloying elements, and the resulting range of hot-rolled and cold-rolled steels allows replacing high-alloyed special-purpose steels in the manufacture of energy equipment products, in particular, lining elements of combustion chambers, pipes and other elements where shape-changing operations and welding are used.

Keywords: Power equipment, low-alloy steels, alloying elements, ferritic structure, heat resistance, heat resistance.

Стаття надійшла 08.12.2025 р.