

УДК 621.745.55

Ямшинський М. М., Федоров Г. Є., Радченко К. С.**ТЕРМОСТІЙКІСТЬ ЖАРОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ РОБОТИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

Основною характеристикою жаростійких сплавів для роботи в екстремальних умовах є їх окалиностійкість, тобто здатність матеріалу чинити опір утворенню окалини на поверхні виробу в умовах високих температур та агресивних середовищ. Проте, практикою експлуатації жаростійких деталей установлено, що вибір сплаву з високою окалиностійкістю є необхідним, але недостатнім для забезпечення тривалої роботи виробів, оскільки більшість деталей в умовах високих температур працюють з періодичними нагріваннями та охолодженнями, тобто піддаються теплозмінам. Такі деталі виходять із ладу переважно через появу тріщин, які виникають внаслідок зміни температури виробу й накопичення термічних напружин, що перевищують допустимі для даних умов експлуатації. Крім того, тривала робота жаростійких деталей супроводжується зміною розмірів останніх.

Отже за сучасними уявленнями жаростійкість необхідно розглядати як три властивості металу: окалиностійкість, термостійкість і ростостійкість, а тому розроблення нових або удосконалення існуючих жаростійких сталей і сплавів слід виконувати з урахуванням цих характеристик.

Жаростійкі сплави вміщують у своєму складі багато хімічних елементів, кожен із яких по своєму впливає на процес окиснення. Такі фактори, як геометрія деталі, напружини в умовах експлуатації, фазові зміни сплаву, спричинені витримками за різних температур, ще більшою мірою ускладнюють процеси пошуку нових матеріалів. Процеси окиснення сплавів визначаються складністю як самих сплавів, так і робочого середовища. Ці ж фактори справляють суттєвий вплив і на термостійкість.

Термостійкість сплавів, в основному, залежить від розмірів зерен [1]. Сплави, для яких характерне руйнування межами зерен, менш термостійкі, ніж сплави, в яких тріщини термічної втоми розвиваються в об'ємі зерна.

Великі розміри зерен і наявність карбідів можуть сприяти утворенню тріщин термічної втоми на міжфазних межах, внаслідок послаблення сил зв'язку між твердим розчином та карбідом [2]. Феритні хромисті сталі мають недостатній опір пластичній деформації за високих температур. Під час довготривалого нагрівання за температур вищих за 850 °С феритні сталі схильні до росту зерна, що призводить до зниження міцності та пластичності, а це в свою чергу сприяє зниженню термостійкості.

Характер руйнування деталей від термічної втоми дуже різноманітний і залежить від властивостей матеріалу та умов експлуатації.

Численні теоретичні та експериментальні роботи щодо термостійкості металів і сплавів, в яких наведено спроби зв'язати кількість циклів теплосмін до руйнування деталі з фізичними та механічними властивостями сплавів і параметрами теплового циклу, не дають однозначної відповіді на питання щодо закономірностей розроблення термостійких сплавів.

За даними робіт [3–5] основними факторами, які визначають термостійкість деталі, є рівень змінних температур, неоднорідність температурного поля в об'ємі деталі, а також конструкція деталі: термостійкість знижується із збільшенням максимальної температури циклу й температурного перепаду в об'ємі деталі. Особливо чутливими до термостійкості є литі жаростійкі деталі з ребрами жорсткості та термічними вузлами. У таких деталях швидко виникає додатковий нерівномірний розподіл температур в їх об'ємах й утворюються локальні зони концентрацій напружин і деформацій. Чим жорсткіша конструкція деталі, тим швидше настане руйнування її від термічної втоми. Виготовлення деталі жорсткої конструкції припустимо тільки в разі, коли термін роботи деталі не залежить від зміни її форми та розмірів під час експлуатації.

Типовим характером руйнування деталей від термічної втоми є їх розтріскування. Він притаманний для деталей теплоенергетичного устаткування, особливо жаростійким вузлам котельних установок, що пов'язано з різким коливанням температур деталей під час зміни теплового режиму роботи котельного агрегату, плановими та аварійними зупинками теплоенергетичних блоків. Таким чином, під час розроблення нових жаростійких сплавів особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню металу високого опору розвитку термічної втоми.

Метою цієї роботи є дослідження впливу хрому, алюмінію, титану та ливарних дефектів на термостійкість хромистих і хромоалюмінієвих сталей.

Відомо [6], що хром підвищує термостійкість жаростійкої сталі внаслідок збільшення в її структурі феритної складової та зниження її коефіцієнта лінійного розширення. Крім того феритна структура сталей, які леговані хромом, зменшує негативний вплив на термостійкість напружин, які виникають під час $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перетворень. Стабілізуванням фериту під час нагрівання – охолодження та низьким коефіцієнтом лінійного розширення і пояснюється краща термостійкість феритної сталі в порівнянні з хромонікелевими сплавами й сплавами на нікелевій та кобальтовій основах [3].

За даними авторів [6, 7] аустенітні сталі схильніші до утворення тріщин термічної втоми через вищий коефіцієнт лінійного розширення й пластичну деформацію металу в кожному циклі нагрівання – охолодження.

У роботі [5] відзначається, що термостійкість матеріалу визначається коефіцієнтом його лінійного розширення – чим він менший, тим вища термостійкість сплаву. В інших роботах [6, 8] автори віддають перевагу пластичності сплавів. Таку розбіжність даних в оцінюванні термостійкості жаростійких сплавів можна пояснити тим, що в кожному випадку ця характеристика визначалась за різними методиками в обмеженому тепловому режимі. Отже порівняти дані різних авторів, якщо враховувати велику кількість факторів, які впливають на термостійкість, неможливо.

Здатність металу утворювати на поверхні захисну окисну плівку є важливою передумовою забезпечення високої термостійкості. У реальних умовах роботи жаростійкого виробу його термостійкість визначається й властивостями поверхневого шару металу, який утратив вихідну щільність під час окиснення. Мікротріщини, які утворюються в таких поверхневих шарах металу, відкривають доступ кисню та азоту до «живого» металу, що призводить до прискорення процесу міжкристалевої корозії й швидкого поширення тріщин у глибину металу. Цим можна пояснити вищу термостійкість жаростійких сплавів у відновлювальній атмосфері ніж в окиснювальній.

Таким чином можна вважати, що підвищення термостійкості можна досягти утворенням на поверхні виробу щільної захисної плівки.

Автори робіт [6–8] відзначають, що тріщини термічної втоми можуть з'являтися в місцях розташування дефектів технологічного походження (усадкові та газові раковини, крупнозерниста структура, неметалеві вкраплини). У той же час, ливарні дефекти можуть і не впливати на термостійкість металу, якщо вони не потрапили до зон з високою концентрацією напружин і до меж з максимальною нерівномірністю температурного поля під час теплозмін. Отже, для досягнення високої термостійкості необхідно чітко виконувати вимоги правильно розробленої технології виготовлення виливків.

У цілому на підставі аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що загальна термостійкість матеріалу має бути тим вищою, чим вищі механічні властивості та теплопровідність сплаву за високих температур, чим нижчий коефіцієнт лінійного розширення та вища окалиностійкість сплаву.

Таким чином термостійкість сплаву є функцією всього комплексу механічних, фізичних, фізико-хімічних і технологічних властивостей.

Нашими дослідженнями підтверджено, що чим вищий вміст у сталі хрому (особливо в межах 25–35 %), тим краща її термостійкість. Дійсно це можна пояснити феритизацією структури, деяким подрібненням первинного зерна, підвищенням міцності та зниженням коефіцієнта лінійного розширення. Низький коефіцієнт лінійного розширення хромистих сталей є одним із важливих характеристик, які визначають термостійкість.

Залежність термостійкості (кількість циклів до руйнування зразка) сплавів від концентрації хрому можна описати фактично прямолінійною залежністю:

$$N_p = 20 + 1,5(Cr, \%)$$

Можна припустити, що вміст хрому слід було б підвищувати до максимуму для забезпечення найвищої термостійкості. Але погіршення технологічності сталі та економічні розрахунки обмежують використання хрому на рівні 30–32 %. Необхідно зауважити, що такий вміст хрому повною мірою забезпечує найважливішу характеристику сталі – окалиностійкість.

Досліджено вплив алюмінію на термостійкість високохромистої сталі 30Х30Л в діапазоні концентрацій до 5 %. Установлено, що вміст алюмінію до 1,0 % в хромисту сталь покращує термостійкість сталі (рис. 1) внаслідок глибокого розкиснення сталі, підвищення стабільної феритної складової, очищення металу від газів і неметалевих вкраплин. Такий вміст алюмінію дещо збільшує відносне подовження, що в свою чергу призводить до покращання термостійкості. Подальше підвищення вмісту алюмінію в сталі, не дивлячись на зростання феритної складової, сприяє зниженню термостійкості приблизно на 10–12 % на кожний відсоток алюмінію через збільшення розмірів зерен фериту та послаблення міжзернинного зв'язку. Крім того це можна пояснити і тим, що за вмісту в такій сталі 0,25–0,30 % вуглецю γ -область замикається за вмісту хрому 27 % [4], тобто під час нагрівання до 1 100 °С у структурі сталі з'являється деяка кількість аустеніту. Під час охолодження зразка, внаслідок $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, виникають додаткові термічні напруження, які негативно відбиваються на загальній пластичності.

Додавання алюмінію у високохромисту сталь сприяє здійсненню глибоких дегазації, десульфурзації та рафінування металу, що підвищує межу текучості сталі й знижує пластичну деформацію в кожному циклі нагрівання – охолодження. Швидкість накопичення деформації найменша в зразках із сталі з 0,7–1,0 % алюмінію. Такий вміст алюмінію дещо покращує відносне подовження (див. рис. 1, а), що в свою чергу призводить до покращання термостійкості.

Зниження термостійкості сталі за високого вмісту алюмінію можна пояснити суттєвим зниженням теплопровідності металу, збільшенням розмірів зерна та коефіцієнта лінійного розширення сталі. Крупнозернинна структура, як відомо, менш термостійка, ніж дрібнозернинна [1]. Крім того, додавання у високохромисту сталь великої кількості алюмінію сприяє створенню термодинамічних умов для утворення нітридів та оксидів алюмінію, які мають несприятливу форму і слугують концентраторами напружин. Такі явища можна спостерігати в структурі сталі за вмісту 4,0 % алюмінію. Отже, алюміній покращує термостійкість хромистої сталі завдяки повному переведенню сталі в суто феритний клас. За вмісту 1,0–1,5 % алюмінію сталь, яка вміщує біля 30 % хрому, стає стабільною до температури плавлення, фазові та структурні перетворення в ній відсутні.

Порівнянням характеристик зміни термостійкості сталі та коефіцієнта лінійного розширення установлено, що термостійкість хромистої сталі з вмістом алюмінію понад 1,0 % майже повною мірою визначається величиною коефіцієнта лінійного розширення. Для забезпечення високої термостійкості хромоалюмінієвої сталі з 28–32 % хрому, вміст алюмінію необхідно обмежувати на рівні 1,0–1,5 %, але для виробів, які працюють за температур вищих 1 200 °С, вміст алюмінію необхідно підвищувати до 2,0–3,0 % з метою покращання її окалиностійкості. Враховуючи достатню окалиностійкість і спрощений процес легування хромистої сталі алюмінієм, для роботи за температур 1 100–1 250 °С достатньо додавати в неї 1,0–2,0 % алюмінію.

Подрібнення структури та покращання термостійкості хромоалюмінієвої сталі можна досягти додатковим легуванням її титаном або ніобієм. Досліджено вплив титану на властивості хромоалюмінієвої сталі в діапазоні концентрацій до 2,0 %. Установлено, що за малих добавок титану (0,1–0,2 %) спостерігається погіршення термостійкості сталі (рис. 1, б) внаслідок забруднення металу продуктами розкиснення і послаблення міжзернинних зв'язків. Високі стабільні властивості хромоалюмінієва сталь набуває за вмісту титану в межах 0,3–0,5 %, зберігаючи високу окалиностійкість металу, причому її термостійкість із підвищенням вмісту титану безперервно зростає, не дивлячись на деяке підвищення коефіцієнту лінійного розширення.

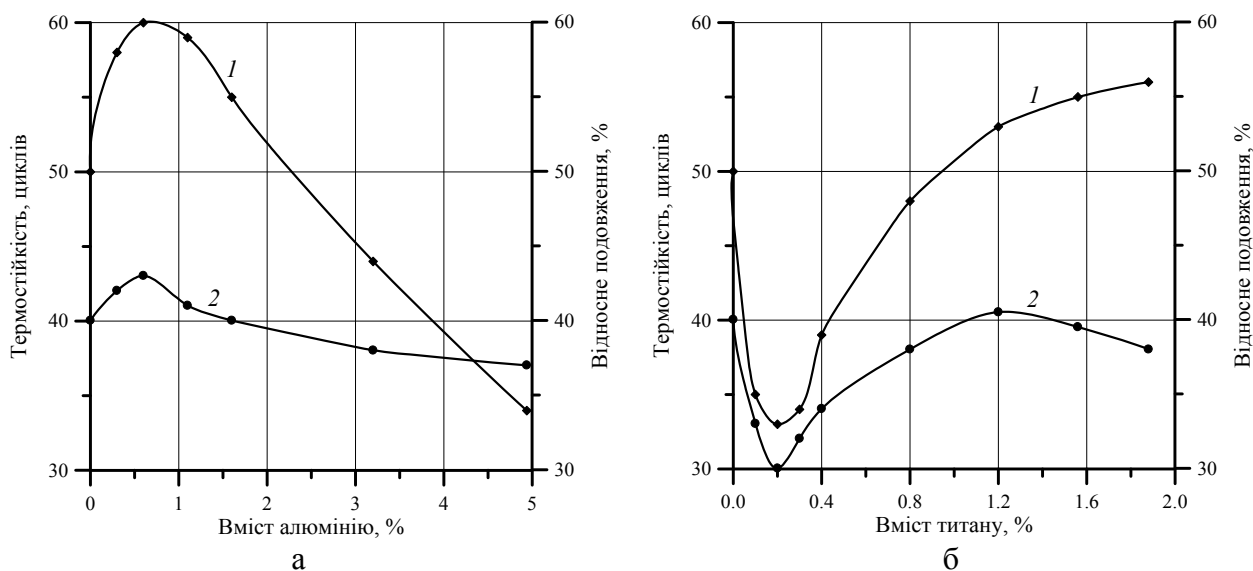


Рис. 1. Зміна властивостей хромистої сталі 30X30Л залежно від вмісту в ній алюмінію (а) та хромоалюмінієвої сталі 30X30Ю2Л залежно від вмісту титану (б):

1 – термостійкість; 2 – відносне подовження

Аналогічний вплив на термостійкість справляє і ніобій. Сумісна дія титану та ніобію сприяє згладжуванню провалу термостійкості за 0,10–0,15 % ніобію. Ймовірно, це можна пояснити вищою стійкістю карбідів ніобію, особливо в зоні високих температур. Отже можна вважати, що кращим варіантом підвищення термостійкості хромоалюмінієвої сталі є спільне оброблення її титаном у кількості 0,30–0,35 % та ніобієм – 0,10–0,15 %.

Як уже відзначалось, на термостійкість литих сталей великий вплив справляють дефекти металургійного та технологічного походження. Це підтверджено нашими дослідженнями. Установлено, що дефекти в сталі погіршують її термостійкість внаслідок зниження міцності і особливо пластичності. Наявність в сталі великих неметалевих включень призводить до руйнування зразків за малого ступеня деформації. Ще більше зниження термостійкості спостерігали в тому випадку, коли в зразках мало місце скупчення неметалевих включень, які орієнтовані у вигляді ланцюгів. Як видно з рис. 2, в структурі зразків утворюється сітка тріщин, яка проходить через неметалеві включення. Пластичність та термостійкість таких зразків знижується (сталь із вмістом алюмінію 1 % з якісною структурою витримує 55–58 циклів, а з кількістю алюмінію 2–3 % та наявністю неметалевих включень 26–32 цикли).

Крім того установлено, що найнесприятливішу дію на термостійкість справляють мікроусадкові пори, які виникають внаслідок неправильного живлення виливків під час їх виготовлення. Такі пори прискорюють розвиток тріщин термічної втоми (рис. 2, б), оскільки вони являють собою готові дефекти руйнування. Зразки всіх досліджуваних сталей із мікроусадковими порами руйнувались після 15–20 циклів. Отже дефекти металургійного та технологічного походження дійсно справляють на термостійкість деталей домінуючий вплив.

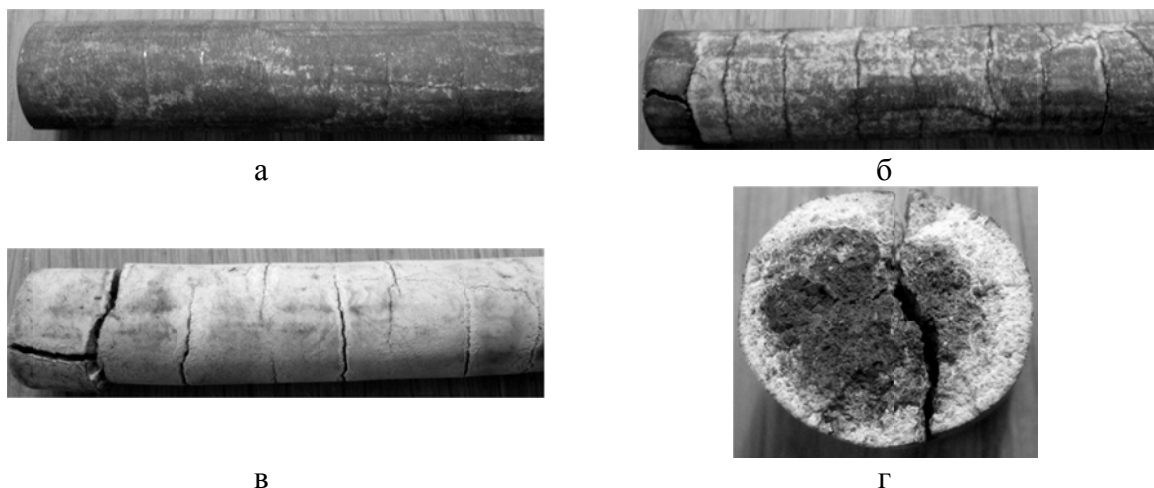


Рис. 2. Утворення та розвивання тріщини хромоалюмінієвої сталі (0,30 % вуглецю, 30,0 % хрому, 1,0 % алюмінію) під час термоциклювання в режимі $1\ 100\leftrightarrow 20\ ^\circ\text{C}$ (охолодження у воді):

а – 26 циклів; б – 43 цикли; в – руйнування після 114 циклів; г – злам після руйнування

Розповсюдженою методикою оцінювання термостійкості матеріалу є кількість циклів нагрівання-охолодження до появи поверхневих тріщин [6] або повного руйнування зразка [9]. За нашими даними кількість циклів до появи поверхневих тріщин не може бути прийнятним як об'єктивний критерій термостійкості сталі. Наприклад, нами встановлено, що тріщини починають з'являтися після 20 циклів, а повне руйнування може відбуватися після 40, 86 або 114 циклів залежно від вмісту алюмінію в сталі. Правильну та достовірну оцінку термостійкості залежно від хімічного складу можна отримати лише за однакових умов випробовування. У той же час забезпечити однакові умови для всіх випадків практично неможливо.

ВИСНОВКИ

Дослідженнями термостійкості під час термоциклювання в режимі $1\ 100\leftrightarrow 20\ ^\circ\text{C}$, відносного подовження, макро- та мікроструктури хромистої та хромоалюмінієвої сталі встановлено, що для отримання високих експлуатаційних характеристик литих деталей із жаростійкої сталі її необхідно додатково легувати 1,0–2,0 % алюмінію, 0,3–0,5 % титану або 0,10–0,15 % ніобію.

Для достовірної оцінки термостійкості для сталей різного хімічного складу доцільно прийняти кількість циклів до руйнування зразка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лютый В. А. Хромоалюминиевая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200°C : дис. ... канд. техн. наук./ В. А. Лютый – К. : КПИ, 1969. – 320 с.
2. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин – М. : Металлургия, 1964. – 672 с.
3. Бобро Ю. Г. Жаростойкие и ростоустойчивые чугуны / Ю. Г. Бобро – М.-К. : Металлургия, 1960. – 170 с.
4. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х томах, 2-е изд. / Э. Гудремон – М. : Металлургия, 1966. Т.1. – 736 с.
5. Владимиров И. А. Термостойкость жаропрочных сплавов. / И. А. Владимиров – М. : Оборонгиз, 1962. – 137 с.
6. Баландин Ю. Ф. Термическая усталость металлов / Ю. Ф. Баландин – Л. : Судостроение, 1965. – 272 с.
7. Приданцев М. В. Влияние примесей и редкоземельных металлов на свойства сплавов. / М. В. Приданцев – М. : Металлургиздат, 1962. – 208 с
8. Гаврилюк В. П. Литые железохромистые сплавы. / В. П. Гаврилюк, Е. А. Марковский – К. : Процессы литья при участии МП «Информлитъ», 2001. – 260 с.
9. Конончук Н. И. Термостойкость жаропрочных сплавов. / Н. И. Конончук, Ю. А. Яковлев – М. : Оборонгиз, 1962. – 168 с.