

С. М. Пагер, Ю. С. Герасименко

МОДИФІКАЦІЯ КАРБОНАТНО-НАКИПНИХ ОСАДІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ

Проаналізовано корозійну поведінку теплообмінної сталеві поверхні в умовах накопоосадження у водах різної мінералізації. Показана можливість підвищення протикорозійних властивостей карбонатно-накипних осадів за допомогою ультразвуку. Проаналізовані вірогідні механізми дії ультразвуку на формування кристалічного осаду на теплообмінній поверхні.

ВСТУП

На сьогоднішній день зростають вимоги до економної експлуатації та надійності роботи енергоустановок. Окрім ТЕЦ, які виробляють тепло для великих міст, існують і малі котельні, значно меншого масштабу - для одного району чи декількох будинків. Як правило, водогрійні та парові котли виробляють тепло у вигляді нагрітого теплоносія або пари, яка подається на потреби споживача. Традиційно вода, що використовується в теплообмінному обладнанні, проходить стадію пом'якшення методом іонного обміну та деаерацію для зменшення процесів корозії сталевих конструкцій та накипоутворення [1].

Як показав аналіз роботи районних котельень, процес деаерації води часто проводиться з порушенням технології або взагалі на котельнях відсутнє необхідне обладнання. За наявності у воді кисню термодинамічно можливе протікання корозії сталі з кисневою деполяризацією. В результаті відбувається розчинення металу. Часто цей процес відбувається нерівномірно, з утворенням осередків локальної корозії – виразок та пітингів [2]. Прискоренню корозії сприяє і підвищення температури до 70° С, що є найбільш характерною для систем ГВП та опалення.

Пом'якшення води також вимагає значних матеріальних витрат на установку та експлуатацію іонообмінних фільтрів, що є обтяжливим для бюджету малих котельень і тому непридатним для них. Внаслідок відсутності належної водопідготовки, солі жорсткості осідають на поверхні теплообміну у вигляді щільного шару із високою теплоємністю та малою теплопровідністю. Це призводить до перевитрат палива (газу, вугілля, мазуту), електроенергії на перекачування рідини внаслідок зменшення площі внутрішнього перерізу теплообмінного обладнання, перегріву металеві поверхні. Внаслідок формування товстих накипних осадів на теплообмінному обладнанні та наявності у воді кисню виникає підшламова, пароводяна та виразкові види корозії [3], що є дуже небезпечним явищем для роботи котельні.

Актуальною є розробка економічно доцільного та ефективного методу корекційної обробки води з метою зменшення як накипоутворення, так і корозії обладнання одночасно. Важливою вимогою до альтернативного методу є можливість його застосування без значних капіталовкладень на основні фонди (закупівлю та монтаж обладнання, навчання персоналу, тощо).

Із літератури відомі різні підходи до вирішення проблем накипу і корозії. Найбільш поширеними методами впливу на процес накипоутворення є фізичні – магнітна [4] та ультразвукова (УЗ) обробка [5,6], хімічні – застосування комплексонів [7]. Для боротьби з корозією застосовують інгібітори корозії [8]. Існують реагенти комбінованої дії, що повинні запобігати як корозії, так і накипоутворенню [9]. Дія останніх заснована на утворенні комплексів із солей кальцію, магнію та лігандів інгібітору, що є значно більш розчинними, ніж солі

жорсткості. Зниження швидкості корозії досягається за рахунок адсорбції інгібітору на поверхні кородуючого металу. Через те, що комбіновані інгібітори розроблені в першу чергу для запобігання накипоутворенню, при їх нерівномірній адсорбції на поверхні кородуючого металу утворюються ділянки різної активності, що працюють як гальванопари та здатні до прискорення локальної корозії [10].

З літератури відомо [11,12], що карбонатно-накипний осад в певних умовах має бар'єрні властивості – перешкоджає доступу агресивного середовища до поверхні металу. Так, при нагріванні води збільшується інтенсивність утворення осадів і швидкість корозії зменшується. Процес росту накипу не припиняється з часом і відбувається безперервне нарощення його товщини, що є недопустимим. З правил будови і експлуатації парових та водогрійних котлів [1] відомо, що осад на теплообмінній поверхні нагріву котла допустимий, але його товщина не повинна перевищувати 0,5 мм. В той же час нормативне значення швидкості рівномірної корозії становить 0,05 мм/рік [13], локальної – 0,15 мм/рік [2]. Тобто, карбонатно-накипний осад допустимої товщини може бути використаний для зниження швидкості корозії, за умови його високих блокуючих властивостей.

Використання ультразвукової технології для боротьби із накипом широко відоме і в літературі, і в промисловості. Досі немає єдиної думки щодо природи дії ультразвуку на процес зниження накипоутворення. Існує декілька гіпотез – резонансна, іонно-кінетична, електростатична, механічна, які пояснюють цей процес [14]. Найбільшого поширення отримала гіпотеза, згідно якої ультразвукова обробка полягає у створенні кавітації в об'ємі рідини, що руйнує осад на теплообмінній поверхні та запобігає появі нового. Також відомо із процесів лиття у металургії та електрокристалізації, що кавітація впливає на ці процеси, призводячи до утворення більшої кількості зародків кристалів та підвищує компактність осаду [15].

Виходячи із літературних даних, можна очікувати, що прикладання УЗ до процесу накипоутворення має призводити до зміни форми кристалів з утворенням щільних плівок із дрібних кристалів. Такі плівки повинні мати вищі протикорозійні властивості.

Дана робота проведена з метою встановлення умов формування захисного накипного шару з високими захисними властивостями при малій товщині. Важливою задачею досліджень є виявлення впливу складу води на формування осаду та дослідження впливу ультразвуку на протикорозійні властивості, морфологію та товщину карбонатно-накипного осаду.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Дослідження процесів корозії та накипоутворення проводили у лабораторній установці, що моделювала ділянку теплообмінної поверхні. Лабораторна установка (рис.1.) складалась із сталевго стакана (1 дм³), фторопластової кришки, в яку вставлялись робочий електрод, водяний холодильник та термометр.

Робочий електрод представляв собою пару циліндричних кілець, розміщених співвісно на скляній вертикальній запаяній трубці. Нагрівальним елементом слугувала ніхромова спіраль, яка знаходилась всередині скляної трубки і живилась від трансформатора. Електроди виготовлені з маловуглецевої сталі 20 – розповсюдженого конструкційного матеріалу теплообмінного обладнання [16]. Площа кожного кільця складала $6 \pm 5\% \text{ см}^2$, що дозволяє їх використовувати як двохелектродний датчик корозії. В ході експерименту через поверхню електродів проходив тепловий потік від нагрівального елемента, що

створювало умови для утворення накипу на їх поверхні. Загальну швидкість корозії I_p визначали за допомогою корозиметра ПІК-1, який працює за двохступінчатим методом поляризації і може вимірювати швидкість корозії при наявності на поверхні металу плівок з великою поляризаційною ємністю.

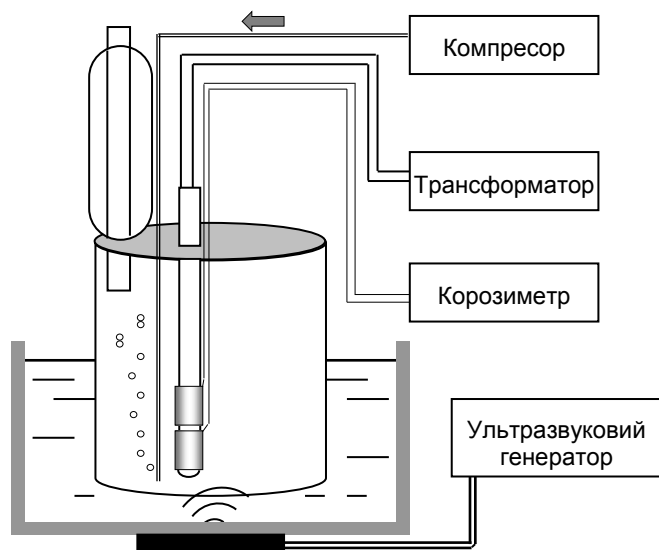


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження впливу ультразвуку за допомогою апарата №2 на формування карбонатно-накипних осадів та їх впливу на швидкість корозії

В роботі використано 2 типи вод – водогінна та артезіанська. Склад вод наведено в таблиці 1. Стакан заповнювали попередньо підігрітою водою до 70°C , щоб прискорити процес кристалізації накипу та зменшити вплив корозійних процесів протягом нагрівання води. Воду замінювали на свіжу кожні 6 годин досліді з метою поновлення концентрації солей жорсткості. Для підтримання рівноважної концентрації кисню у воді проводили барботаж повітря за допомогою компресора - концентрація розчиненого кисню становила не більше $1-1,5 \text{ мг/дм}^3$. Поверхню зразків перед дослідженнями зачищали наждаковим папером зернистістю Р180. В роботі використовували два типи ультразвукових апаратів – “Акустик-Т” (апарат №1) та ультразвукову мийку марки “Proskit” (апарат №2) з різними технічними характеристиками. Апарат №1 працює на основі магнітострикційного ефекту в імпульсному режимі і має резонансну частоту затухаючих коливань випромінювача – $18-25 \text{ кГц}$; частоту подачі пачок затухаючих імпульсів 6 Гц ; амплітуду коливання вільного кінця випромінювача – 15 мкм ; інтенсивність ультразвуку $0,2 \text{ Вт/см}^2$. Ультразвукову енергію від випромінювача подавали безпосередньо у воду [17].

Апарат №2 – працює в безперервному режимі на основі п'єзострикційного ефекту, має частоту 46 кГц . Від генератора ультразвукових коливань подається напруга, що збуджує п'єзопластину, яка приєднана до дна ванни. Ультразвукова енергія передається у воду, що міститься в ванні. Інтенсивність ультразвуку, розрахована із вихідної потужності апарата №2 та площі п'єзопластини, становила близько 2 Вт/см^2 . Ємність з досліджуванним розчином встановлювали у ванну (рис.1.).

Дослідження без ультразвукового опромінення проводили на аналогічній установці за відсутності ультразвуку.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних середовищ

№ п/п	Вода	Загальна жорсткість	Лужність, Щ _{оз}	рН	Хлориди Сl ⁻	Загальний солевміст
		мг-екв/л			мг/л	
1	Артезіанська, Київська обл.	20	8,4	7,8-8,1	148-230	1010-1180
2	"___" розведена в 2 рази	10,2	4,1	7,8-7,9	88-100	500-600
3	Водогінна м. Київ	4,5	3,7	7,8-8,0	20-30	240-250
4	"___" розведена в 2 рази	2,25	1,2	7,48	10-20	120-125
5	"___" розведена в 4 рази	1,1-1,25	0,7	6,95	5-10	60-62

Кінетику формування накипного шару визначали за зміною товщини та маси осаду з часом. Замір товщини осаду проводили шляхом безпосереднього вимірювання діаметру електрода до початку осадження та через проміжки часу в процесі осадження за допомогою мікрометра в шести точках з наступним усередненням результатів. Зважування зразків проводили на аналітичних терезах з точністю 0,0001 г. Розраховували зміну товщини та маси осаду в часі.

Структуру, морфологію та елементний склад сформованих шарів аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа selmi РЭМ-106И. Рентгеноструктурним дослідженням піддавалися осади, які видалялися з поверхні. Рентгенограми накипу знімали за методом Брег-Брентано з використанням дифрактометра Shimadzu LabX XRD 6000 (Cu K α випромінювання, 40 кВ і 30 мА, графітовий монохроматор). Дифрактограми були отримані в діапазоні кутів $2\theta = 20-50$ град., крок сканування – 0.02° , тривалість кроку сканування – 1 с.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вплив загальної жорсткості води на блокуючі властивості карбонатно-накипних осадів

В лабораторних умовах проводили дослідження впливу загальної жорсткості води на кінетику формування захисних осадів на сталевій поверхні. Карбонатно-накипні осади отримували при кипінні робочого електрода у воді різного складу.

Як видно з рисунку 2, у водах з загальною жорсткістю від 4,5 до 20 мг-екв/дм³ спостерігається зменшення швидкості корозії з часом експерименту. При чому збільшення жорсткості води призводить до зниження часу, необхідного для досягнення допустимого значення швидкості корозії. Так, при загальній жорсткості води 4,5 мг-екв/дм³ швидкість корозії 0,05 мм/рік досягається лише за 90 годин, при 10 мг-екв/дм³ – за 37 годин, у випадку дуже жорсткої води – захисний шар осаду формується вже за перші 10 годин досліду. Це свідчить про те, що концентрація солей жорсткості у водному середовищі визначає швидкість формування сольової плівки на теплообмінній поверхні. Незважаючи на те, що артезіанська вода має високий вміст хлоридів (іонів активаторів), швидкість рівномірної корозії, визначена методом поляризаційного опору, зменшується в часі.

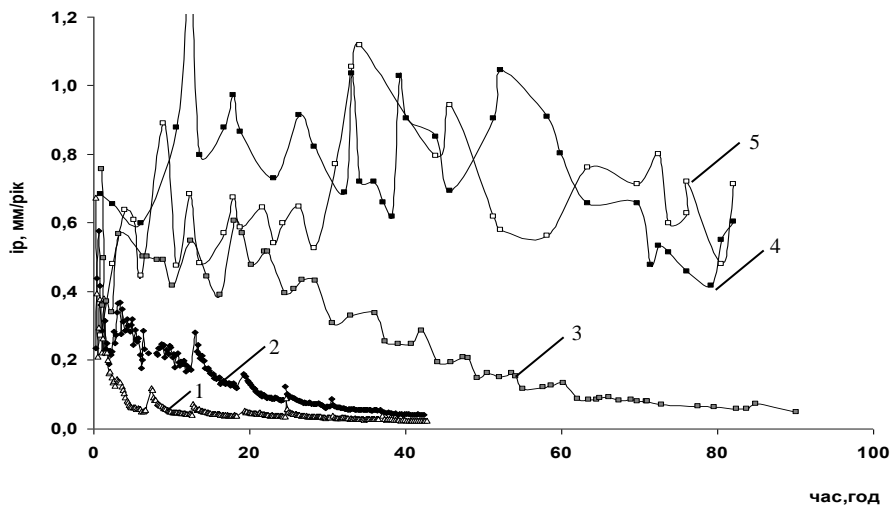


Рис. 2. Вплив карбонатно-накипних осадів, осаджених з вод з різною загальною жорсткістю, на швидкість корозії сталі 20 у часі: 1- 20 мг-екв/дм³; 2 – 10 мг-екв/ дм³; 3 – 4,5 мг-екв/ дм³; 4 – 2,25 мг-екв/ дм³; 5 – 1,1 мг-екв/ дм³.

Вода з загальною жорсткістю 1,1 та 2,25 мг-екв/дм³ – є сильно агресивним корозійним середовищем, і швидкість корозії тримається довгий час на рівні 1,2-0,7 мм/рік. Отже, пом'якшення води зменшує накипоутворення, але прискорює корозійні процеси, що узгоджується з [18].

Таблиця 2

Параметри осадження накипу, за яких швидкість корозії не перевищує 0,05 мм/рік

Загальна жорсткість води, мг-екв/дм ³	Товщина осаду, мкм	Час осадження, год
20	14-16	10
10	32-34	37
4,5	192	90

Приріст маси осаду (середній приріст між двома кільцями) на електроді у водах різної мінералізації (рис.3) свідчить про прискорення процесу випадіння карбонатно-накипного осаду з ростом концентрації солей жорсткості.

Аналіз таблиці 2 та рисунку 3 показує, що існує обернена залежність між концентрацією солей жорсткості у розчині та часом, необхідним для формування захисного карбонатно-накипного осаду. Така залежність пояснюється тим, що швидкість росту осаду визначається швидкістю доставки солей жорсткості до поверхні металу. При малих об'ємних концентраціях солей кальцію та магнію їх вміст в приелектродному шарі швидко зменшується і подальший ріст осаду відбувається переважно на сформованих кристалах з дифузійними обмеженнями. Утворені кристали збільшуються в розмірі, а кількість нових центрів кристалізації зменшується. При збільшенні концентрації солей жорсткості відбувається утворення більшої кількості зародків кристалів, що зменшує їх

розміри та збільшує блокуючі властивості осаду. Тому зарощення поверхні відбувається швидше.

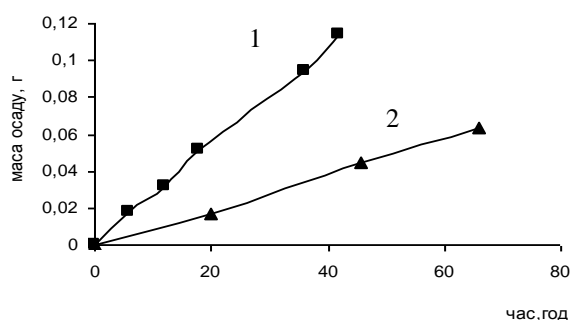


Рис. 3. Приріст маси карбонатно-накипного осаду, що формується з вод різної жорсткості: 1 – 20 мг-екв/дм³; 2 – 4,5 мг-екв/ дм³

Отже, формування карбонатно-накипного осаду з вод різної мінералізації відбувається з різною швидкістю і визначає час утворення захисного шару осаду на теплообмінній поверхні.

Вплив ультразвукової обробки на формування захисних карбонатно-накипних осадів.

Вплив ультразвукової обробки на формування захисного карбонатно-накипного осаду представлено на рисунку 4.

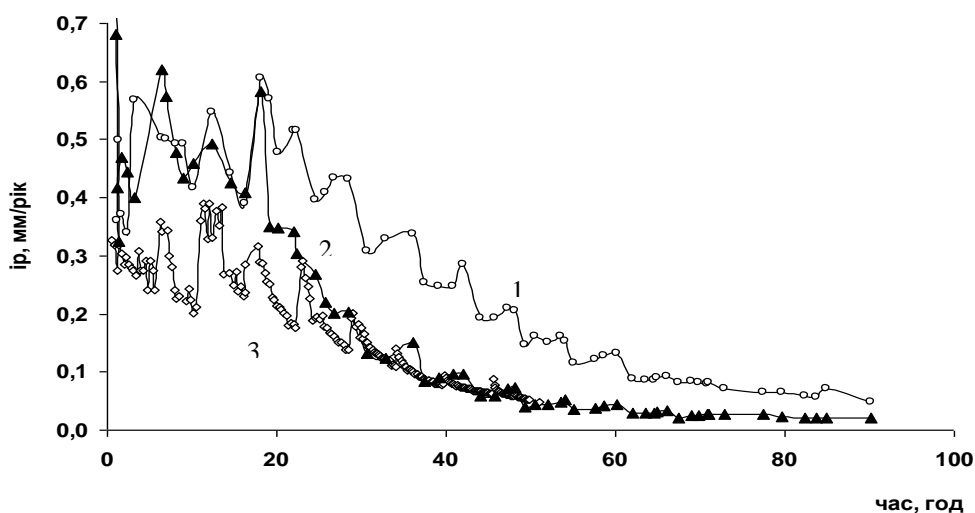


Рис. 4. Вплив ультразвуку на швидкість корозії сталі 20 в воді з загальною жорсткістю 4,5 мг-екв/дм³: 1 – без ультразвуку; 2– під дією УЗ апарату №1; 3- під дією апарату №2

Вплив УЗ на захисні властивості карбонатного шару залежить від складу води. У водогінній воді середньої жорсткості (4,5 мг-екв/дм³) УЗ прискорює зниження швидкості корозії (рис. 4). Так, на 40 годині досліду швидкість корозії без ультразвуку становить 0,25-0,28 мм/рік, під дією апарату №1 – 0,11-0,09 мм/рік, під дією апарату №2 – 0,12-0,08 мм/рік. Корозійні криві, що відповідають впливу двох ультразвукових апаратів подібні.

З кривих нарощення товщини осаду в часі з води середньої жорсткості (рис. 5б) можна помітити, що при дії ультразвуку, як за допомогою апарату №1 так і №2, відбувається пригнічення процесу накопуютворення, про що свідчать криві росту товщини осаду в часі. Ефективність різних апаратів майже однакова. Так, на 40 годині досліду товщина осаду без ультразвуку становить 0,08 мм, під впливом апарату №1 – 0,05 мм, під впливом апарату №2 – 0,044 мм (рис. 5а).

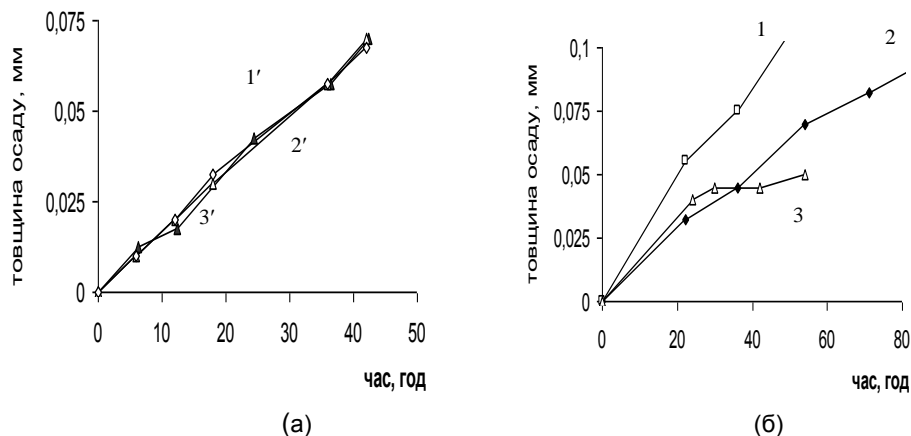


Рис. 5. Вплив ультразвуку на товщину осаду, сформованого з вод з різною жорсткістю: (а) – 20 мг-екв/дм³, (б) 4,5 мг-екв/дм³. 1, 1' - без ультразвуку; 2, 2' - під дією апарату №1; 3, 3' - під дією апарату №2

Під дією ультразвуку у воді середньої жорсткості формується осад з вищими протикорозійними властивостями – більш дрібнокристалічний, щільний, з меншою поруватістю. Доказом цього є мікрофотографії поверхні осадів (рис. 6), що сформовані під впливом одного з апаратів (№1) та без УЗ у водогінній воді.

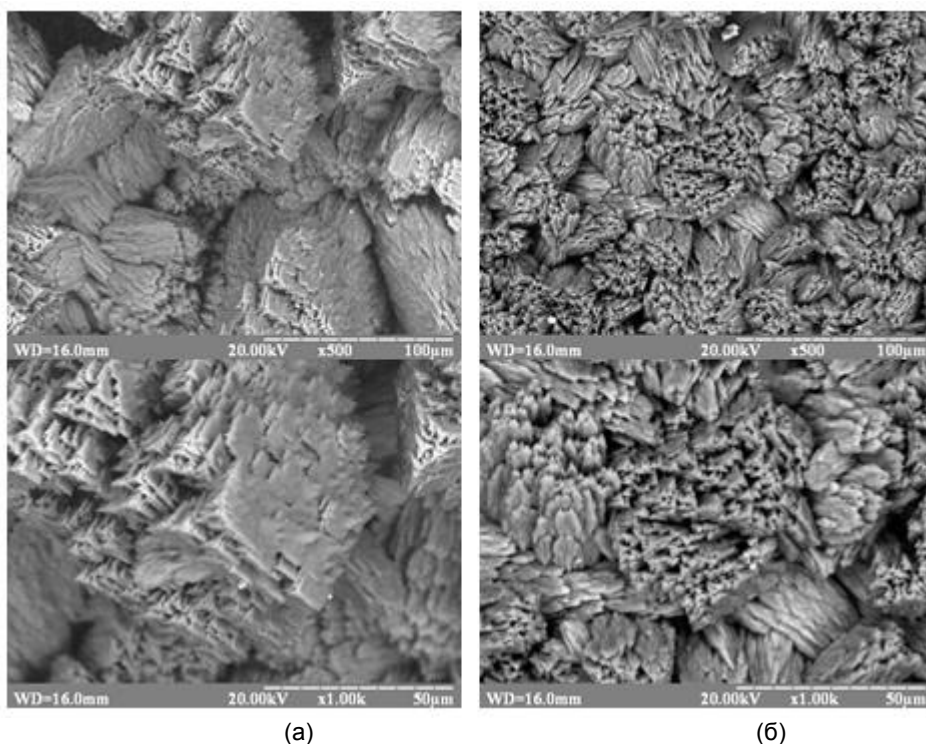


Рис. 6. Мікрофотографії карбонатно-накипного осаду, сформованого з водогінної води після 115 годин досліду: (а) - без ультразвуку; (б) – під впливом ультразвукового апарата№1

Видно, що ультразвук впливає на розмір кристалів, з яких складається покриття. Так, без ультразвуку осад більш крупнокристалічний, рихлий, з розвинутою поверхнею, в порівнянні з аналогічним, сформованим в полі ультразвуку. Останній – більш щільний, однорідний та дрібнокристалічний з менш розвинутою поверхнею, отже, під дією ультразвуку відбувається модифікація карбонатно-накипних осадів.

Елементний склад осаду на основі енергодисперсійного аналізу елементів з атомною масою вище 16 показав, що осад, утворений з водогінної води, складається на 97-99% з кальцію, 0,07-2% магнію. Також в ньому присутні включення заліза, що свідчить про корозійні процеси на теплообмінній поверхні.

Визначення сполук та їх кристалічних модифікацій, з яких складається осад, осадований із водогінної води, проводили методом XRD (рис. 7).

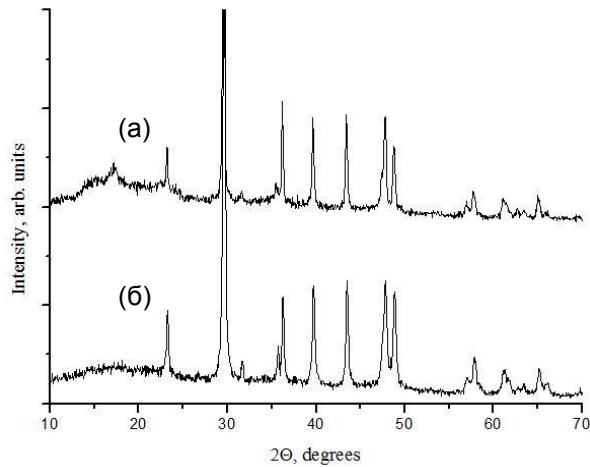


Рис. 7. Рентгенограми накипу, що утворений (а) без ультразвуку; (б) під дією апарату №1 з водогінної води

Аналіз рентгенограми показав, що в обох зразках осад складається із карбонату кальцію у модифікації кальцит JCPDS-01-072-1651 та відповідає магнієвмісному кальциту $\text{Ca}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}(\text{CO}_3)$. Отже, УЗ не впливає на склад та кристалічну модифікацію карбонату кальцію.

В дуже жорсткій артезіанській воді також спостерігається вплив ультразвуку на хід корозійних кривих, хоча його ефективність нижча (рис.8), ніж у водогінній (рис.4). Приріст товщини осаду на теплообмінній поверхні (рис.5а) відбувається з однаковою швидкістю, як під впливом ультразвуку так без нього.

Вплив УЗ обробки апаратом №2 у воді з високою мінералізацією можна помітити з мікрофотографій накипу, що приведено на рисунку 9. Зовнішній вигляд кристалічного осаду залежить від умов його формування. Під впливом ультразвуку осад не має чітких граней, складається переважно з кристалів з порушеною кристалічною формою і є більш однорідним. Без УЗ обробки накип сформований з кристалів з чіткими гранями, переважно кубічної форми, і є більш крупнокристалічним.

Елементний склад осаду показав, що осад, утворений з артезіанської води, як під дією апарату №2, так і без нього складається на 96-97% з кальцію, 0,39-2% з магнію, 2,69% заліза.

Така модифікація осадів під впливом ультразвуку може бути викликана виникненням явища кавітації у розчині. При захопленні кавітаційних бульбашок утворюються зони високого тиску та ударні хвилі, що руйнують кристали та впливають на шар накипу. Внаслідок кавітації відбувається оновлення поверхні осаду та формування нових центрів кристалізації.

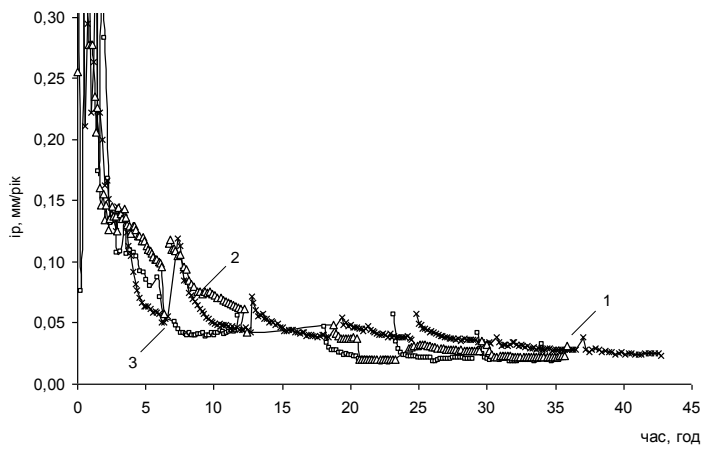


Рис. 8. Вплив ультразвуку на швидкість корозії сталі 20 в воді з загальною жорсткістю 20 мг-екв/дм³ 1 – без ультразвуку; 2– під дією УЗ апарата №1; 3- під дією апарата №2

Вплив УЗ на формування осаду більш помітний у воді середньої жорсткості. Це можна пояснити тим, що при малій жорсткості осадження накопичується із дифузійними обмеженнями. Під дією УЗ відбувається інтенсифікація масообмінних процесів внаслідок перемішування розчину та зниження товщини дифузійного шару. Це прискорює доставку карбонатних іонів до поверхні. У випадку дуже жорсткої води, транспортні обмеження відсутні, і тому ультразвукова обробка досліджуваної інтенсивності не впливає на товщину карбонатно-накипного осаду, а впливає на форму кристалічної поверхні.

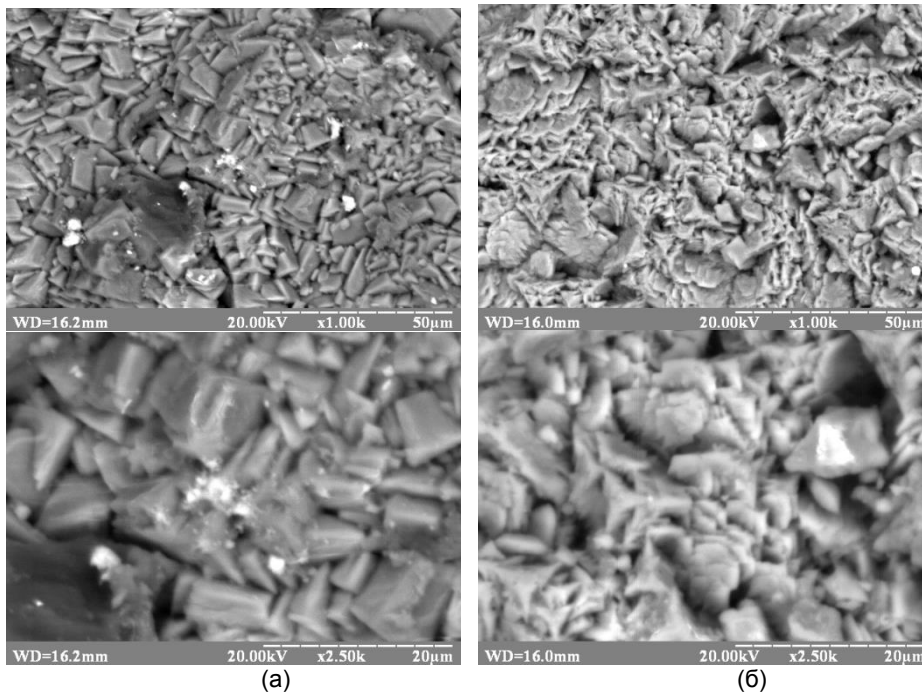


Рис. 9. Мікрофотографії поверхні осаду, що сформовано за 43 години без ультразвуку (а), під дією ультразвукового апарата №2 (б)

Отже, у воді високої мінералізації відбувається швидке зниження швидкості корозії теплообмінної поверхні внаслідок інтенсивної кристалізації карбонатного осаду по всій поверхні. Впливу ультразвуку на кінетику формування осаду у такій воді практично не спостерігається. Методом растрової електронної мікроскопії встановили вплив УЗ обробки на структуру осаду – відбувається зменшення розмірів кристалів, що призводить до ущільнення шару осаду та підвищення його блокуючих властивостей.

Вплив УЗ на форму кристалів спостерігається як у водогінній, так і в артезіанській воді – відбувається зменшення розмірів кристалів, і, як наслідок збільшення захисних властивостей накипного шару. Подрібнення кристалів пояснюється руйнівною дією кавітації, що виникає у воді при УЗ обробці. Порівнюючи ефективність ультразвукових апаратів двох типів – магніострикційного з частотою близько 20 кГц, частотою подачі пачок імпульсів 6 Гц та п'єзострикційного з частотою 46 кГц виявили, що в даних умовах експерименту практично однакова.

Отримані дані можуть бути використані для пошуку альтернативних методів по зменшенню швидкості корозії та накопуютворення у теплообмінному обладнанні. В певних умовах ультразвукова обробка не тільки покращує захисні властивості карбонатного осаду, а й дозволяє контролювати його товщину в межах допустимих значень шляхом видалення надмірного шару карбонатних осадів [17]. Для підсилення ефективності контролю товщини на допустимому рівні перспективним є використання інгібіторів накопуютворення. Їх комбінація з ультразвуком дозволить зменшити матеріальні витрати на закупівлю реагентів та зменшить екологічну шкоду навколишньому довкіллю.

ВИСНОВКИ

1. Швидкість корозії сталі 20 у водах різної мінералізації в умовах теплообміну зменшується за рахунок формування карбонатно-накипних осадів. Чим більш жорстка вода, тим менше значення швидкості корозії досягається за більш короткий час. Так, при загальній жорсткості води 4,5 мг-екв/дм³ швидкість корозії 0,05 мм/рік досягається за 90 годин, при 10 мг-екв/дм³ – за 37 годин, у випадку дуже жорсткої води – захисний шар осаду формується за перші 10 годин досліду.

2. Найбільший вплив ультразвукової обробки виявили у воді середньої жорсткості. Так, на 40 годині досліду швидкість корозії без ультразвуку становить 0,25-0,28 мм/рік, під дією апарату №1 – 0,11-0,09 мм/рік, під дією апарату №2 – 0,12-0,08 мм/рік. Корозійні криві, що відповідають впливу двох ультразвукових апаратів, близькі за значеннями.

3. Вплив ультразвуку на кристалічну форму карбонатно-накипних осадів виявили як у водогінній, так і в артезіанській воді. Формується більш дрібнокристалічний, однорідний осад з вищими захисними властивостями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов : ДНАОП 0.00-1.08-94 №51 / Гос. Комитет Украины по надзору за охраной труда. – Х. : Форт, 2002. – 184 с.
2. Акользин А. П. Контроль коррозии металла котлов / Акользин А. П. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 240 с.
3. Акользин П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования / Акользин А. П. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 304 с.

4. Кошоридзе С. И. Физическая модель снижения накипеобразования при магнитной обработке воды в теплоэнергетических установках / Кошоридзе С. И., Левин Ю. К. // Теплоэнергетика. – 2009. – № 4. – С. 66-68.
5. Панфиль П. А. Ультразвуковая технология предотвращения образования накипи / Панфиль П. А., Андреев А. Г. // Новости теплоснабжения. – 2001. – Т. 7, № 11. – С. 43-45.
6. Лопырев Н. К. Применение ультразвука для предотвращения накипеобразования в котле. // Промышленная энергетика. – 1958. - № 9. – С. 1-8.
7. Антонов В. В. Опыт применения ингибиторов солеотложения // Энергосбережение и водоподготовка. – 1998. – № 3. – С. 38.
8. Погребва І. С. Інгібітори корозії металів : навч. посіб. / Погребва І. С. – К. : Хай-Тек Прес, 2012. – 296 с.
9. Нестеренко С. В. Комплексономная обработка оборотной воды для предотвращения процессов коррозии и накипеобразования / Нестеренко С. В., Стасенко С. П. // Коммунальное хозяйство городов. – 2003. – № 49. – С. 87-93.
10. Алиев А. Ф. Защита стального теплообменного оборудования от коррозии и накипеобразования в водах различной минерализации // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С. 45-53.
11. Акользин П. А. Предупреждение коррозии оборудования технического водо- и теплоснабжения. / Акользин П. А. ; под ред. Колотыркина Я. М. - М. : Металлургия, 1988. – 96 с.
12. Техника борьбы с коррозией : пер. с пол. / Юхневич Р., Валашковский Е., Видуховский А., Станкевич Г. ; под ред. Сухотина А. М. – Л. : Химия, 1978. – 308 с.
13. СОУ ЖКГ 41.00-35077234.010:2008 Системи централізованого господарсько-питного водопостачання та комунального тепlopостачання.
14. Неведов А. В. Разработка безреагентной технологии и совершенствование оборудования для повышения безопасности и эффективности работы водогрейного оборудования : дис. ...к.т.н. - К., 2004. – 170 с.
15. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура. / Гершгал Д. А., Фридман В. М. - Изд 3-е, перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. – 320 с.
16. Тепловые и атомные электрические станции : справочник / под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1982.
17. Герасименко Ю. С. Інгібіторна дія накипу, що формується в ультразвуковому полі на теплообмінній поверхні / Герасименко Ю. С., Пагер С. М. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. : Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2012. – №9. – С. 272-278.
18. Паршутин В. В. Влияние природных и технологических вод на коррозию металлов / Паршутин В. В., Ревенко В. Г., Шолтоян Н. С. [и др.] // Физ.-хим. проблемы защиты материалов. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 414-420.