

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ШЛЯХОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ

А.В. Грузевич¹, В.В. Швець²

¹Трипільська ТЕС ПАТ «Центрэнерго». 08720, м. Українка, вул. Промислова, 1
Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бул. Академіка Вернадського, 36 б.
E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²ТОВ «РЕЗОН». 49057, м. Дніпро, вул. Геофізична, 1. E-mail: 230608us@gmail.com

Метою роботи є дослідження ефективності застосування напилення для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання ТЕС. Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження технології напилення дозволяє скоротити збитки в разі аварійних відключень ТЕС в 1,5...3,0 рази на рік, а можливе збільшення ресурсу служби поверхонь збільшується в 1,7...2,5 рази. Оскільки основним видом зносу на водяному економайзері котлів ТЕС є золотий знос, а між планками дистанціювання – корозія, то запропоновано комплексне вирішення проблеми продовження експлуатаційного ресурсу екранних труб котлів та труб економайзерів за рахунок розробки нових жаростійких і зносостійких газотермічних покриттів. Бібліогр. 24, табл. 7, рис. 14.

Ключові слова: напилення, зварювання, ТЕС, золотий знос, корозія, електродугове покриття

Значна кількість відмов у роботі енергетичного обладнання теплових електростанцій (ТЕС) зумовлена uszkodженнями котельного обладнання, особливо поверхонь нагріву. Фактори, що призводять до порушення їх роботи, умовно можна розділити на експлуатаційні та uszkodження, не пов'язані з експлуатацією. До першої групи належать золотий знос (типово для труб водяного економайзера (ВЕ)), електрохімічна і високотемпературна корозія (труби радіаційної та конвективної частини котла), перегрів металу і т. д. Не пов'язані з експлуатацією пошкодження поверхонь нагріву ТЕС найчастіше викликані металургійними і технологічними дефектами металу труб, неякісним виготовленням тощо [1]. З досвіду, пошкодження не на всіх поверхнях нагріву котла призводять до раптової зупинки енергоблока. В цьому відношенні пошкодження труб ВЕ у всіх випадках викликають

відмову обладнання. Головною причиною подібних відмов є золотий знос. Кількість відмов, викликаних золотим зносом котельних труб, за даними [2, 3] на окремих енергоблоках сягає 60 %. Механізм ерозійного зносу труб ВЕ, який, відповідно до загальноприйнятої теорії, викликаний впливом частинок летючої золи, що мають високу твердість та абразивність, досить вивчений [4, 5]. Однак вибір ефективного методу захисту від зносу донині є складним завданням. Оскільки основним видом зносу трубних елементів енергетичного обладнання ТЕС є золотий знос і корозія, то для підвищення їхньої надійності, терміну служби і працездатності запропоновано використовувати електродугове напилення як метод газотермічної модифікації поверхонь нагріву (рис. 1).

Найбільш уразливими ділянками ВЕ є перші й другі по ходу газів згини калачів у розтині до пер-



Рис. 1. Електродугове напилення

© А.В. Грузевич, В.В. Швець, 2021

ших дистанціюючих стійок, внутрішні й зовнішні згини калачів, крайні змійовики з тильного боку конвективної шахти по всій ширині. Традиційно, для індивідуального захисту змійовиків використовуються манжети сегментної форми (рис. 2) [6], що встановлюються на лобову частину труб по ходу газів. Накладки (рис. 3) встановлюються і в інших зонах, схильних до інтенсивного золотого зносу.

У зв'язку зі значним зносом технологічного обладнання нині дуже гостро стоїть питання його ефективного ремонту, що забезпечує відновлення працездатності, підвищення надійності, продовження термінів експлуатації при зниженні витрат на ремонтно-відновлювальні роботи [7]. Один зі шляхів підвищення надійності роботи енергетичного устаткування електростанцій [8, 9] є його захист від золотого і корозійного зносу напильником. Інтенсивне зношування теплообмінних поверхонь котлів ТЕС, зокрема, екранних труб і труб економайзерів, зумовлене використанням в якості палива вугільного пилу з великою частиною твердих негорючих домішок [10–12]. Аналіз пошкоджень за класифікаційними ознаками [13] показує, що основною причиною пошкодження котельних труб є корозійно-ерозійний знос. За даними [14], на окремих блоках його частка сягала 60 %. Особливо часто страждають від ерозії змійовики ВЕ. Абразивні частинки золи, що захоплюються димовими газами з великою швидкістю, вдаряють в поверхню труб і викликають золотий знос (рис. 4).

На поверхні екранних труб зі сталі 12Х1МФ за температур, підвищених до 585 °С, утворюються

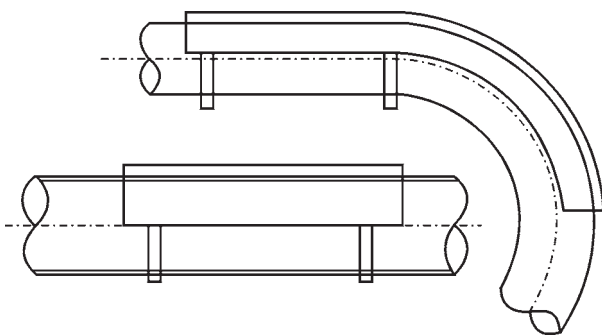


Рис. 2. Індивідуальні манжети для захисту згинів і прямих ділянок труб

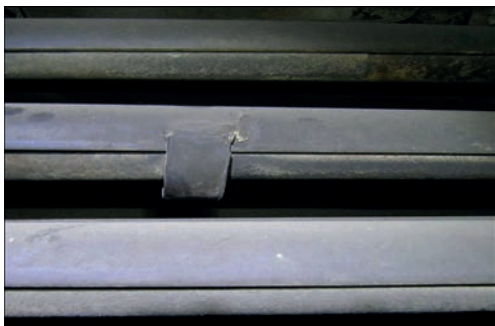


Рис. 3. Труби ВЕ з накладками золозахисту



Рис. 4. Характер пошкодження труби діаметром 32×6 мм ВЕ в результаті дії золотого зносу

плівки оксидів заліза, які мають слабе зчеплення з поверхнею сталі й легко зношуються абразивними частинками. Зношування зовнішньої поверхні труб відбувається нерівномірно по великій площі, локалізується в певних місцях. При досягненні критичної товщини стінки труби відбувається її розрив, який призводить до зупинки енергоблока. Теплове навантаження на зовнішню стінку труби також підвищується через відкладення солей на внутрішніх поверхнях екранних труб, які, крім того, відчувають корозійно-ерозійні пошкодження, тому розробка нових ефективних методів підвищення надійності роботи енергетичного обладнання ТЕС є актуальним напрямом. Пошкодження трубних елементів поверхонь нагріву енергетичного обладнання ТЕС мають характер механізмів повзучості з проявом втоми, протікання процесів ерозії і газової корозії (окислення) через екстремально високі умови експлуатації, пов'язані з високими значеннями температури, присутніми циклічними навантаженнями й агресивністю робочого середовища, а також через абразивну дію продуктів згоряння вугільного палива [11, 12]. Оскільки основним видом зносу на водяному економайзері котлів ТЕС є золотий знос, а між планками дистанціювання – корозія, то в роботах [12, 15] запропоновано комплексне вирішення проблеми продовження експлуатаційного ресурсу екранних труб котлів та труб економайзерів за рахунок розробки нових жаростійких і зносостійких газотермічних покриттів [16, 17]. В результаті, у структурі таких покриттів, при експлуатації труб котлів та труб економайзерів, будуть протікати дисперсійні процеси зміцнення за рахунок виділення дрібнодисперсних фаз карбідів, нітридів та інтерметалідів, які істотно підвищують їхні експлуатаційні властивості при роботі [18]. Метою статті є дослідження застосування електродугового напильника, виконаного ТОВ «РЕЗОН» (металізації) для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання ТЕС.

Матеріали та методи. Одним з перспективних методів підвищення надійності роботи енергетичного обладнання є електродугове напильнення. Фізико-механічним інститутом ім. В. Карпен-

ка НАН України спільно з ТОВ «РЕЗОН» розроблено технологію захисту нагрівальних елементів теплових електростанцій від золотого зносу і газової корозії [19, 20], яка передбачає нанесення економнолегованих електродугових покриттів з порошкового дроту на поверхню екранних труб і труб економайзерів теплових електростанцій з метою їх ефективного захисту від золотого зносу і газової корозії при температурах експлуатації до 600 °С. Ця технологія дозволяє підвищити довговічність захищених труб. Застосування металізації дозволить:

- надати корозійно-ерозійної стійкості ділянкам труб при підвищених температурах;
- не збільшувати сумарну вагу поверхонь нагріву;
- не ускладнювати доступ до окремих пакетів змійовиків;
- не ускладнювати візуальне спостереження за зовнішньою поверхнею труб і в місцях розташування планок дистанціювання;
- знизити трудомісткість пропонованих заходів за рахунок усунення операцій з виготовлення гільз, збирання зварних з'єднань під манжети.

Отже, застосування металізації є найбільш вигідним методом захисту труб поверхонь нагріву. Жаростійкість металу системи легування Fe–Cr–W–Al забезпечується формуванням на його поверхні оксидної плівки Al_2O_3 , яка характеризується високою хімічною і термічною стабільністю. При підвищених температурах дифузія кисню та азоту в перехідні шари призводить до утворення оксидів заліза Fe_2O_3 і нітридів алюмінію AlN , що знижує жаростійкість покриття. З метою пом'якшення негативного впливу зазначених оксидів в систему покриття введений кремній, який сприяє утворенню дифузійного шару SiO_2 , що перешкоджає окисленню подокалінного шару. Зносостійкість покриття забезпечується вмістом у складі покриття дрібнодисперсних залізохромних карбідів $(Fe, Cr)_7C_3$, шпинелів $(Fe, Cr)_2O_3$. Для відновлення зношених і захисту нових найбільш вразливих ділянок труб ВЕ (рис. 5) котла ТПП-210А у виробничих умовах енергетичного підприємства України випробувана технологія електродугової металізації.

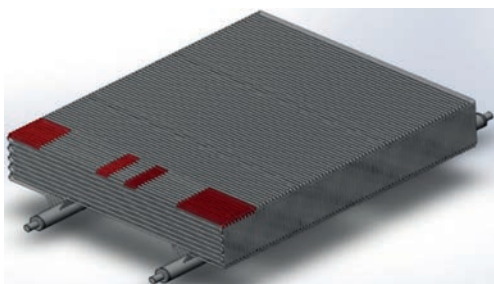


Рис. 5. Ділянки інтенсивного золотого зносу труб ВЕ: прямі ділянки і згини

До технологічних етапів газотермічного напилення входили наступні операції:

- попередня підготовка поверхні основного металу;
 - напилення;
 - зовнішній огляд і контроль якості геотермального теплового насоса.
- Для забезпечення якісного напиленого шару згідно з рекомендаціями [10] контролювалися наступні параметри:
- стан поверхні труби;
 - дистанція нанесення матеріалу;
 - кут нахилу наконечника пальника до напилюваної поверхні трубного елемента;
 - температура поверхні основного металу в процесі напилення;
 - рівномірність товщини покриття;
 - швидкість подання напилюваного матеріалу.

Електродугове напилення в струмені стисненого повітря поверхонь нагріву здійснювалося на двох теплових електростанціях у 2013 р. Змійовики ВЕ, що колись були в експлуатації на блоці № 2 Трипільської ТЕС (ТпТЕС) після двох років роботи були демонтовані і піддані напилюванню методом металізації. Перед напиленням для визначення механічних і металографічних властивостей металу змійовиків, що були в експлуатації, з труб вирізані контрольні зразки. Результати механічних випробувань на визначення межі міцності було відображено в табл. 1.

При проведенні металографічного аналізу дослідження проводилися по всьому периметру труби зі збільшенням $\times 100$ та $\times 500$. Феритно-перлітна структура металу по всьому перетину досліджуваного зразка однакова. Результати наведено в табл. 2.

Під час проведення механічних та металографічних випробувань зразків труб відхилень від нормативних вимог [21] не виявлено, після чого прийнято рішення про нанесення захисного покриття методом металізації. Роботи з нанесення покриття проводилися на ремонтному майданчику ТпТЕС і Зміївської ТЕС за розробленою ме-

Таблиця 1. Механічні характеристики труб до металізації

σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
503	28,8	60
За вимогами ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Труби сталеві безшовні для парових котлів і трубопроводів»		
420...560	24	45

Таблиця 2. Структурні характеристики труб до металізації

Зразок	Бал відманшеттгової структури за шкалою ТУ 14-3-460	Бал смугастості за шкалою ТУ 14-3-460	Бал графітизації згідно з СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009
Вирізка з ВЕ	0	0	1 (графітизації не виявлено)

тодікою [22]. Для виконання робіт з нанесення захисного покриття на труби поверхонь нагріву застосовували комплект обладнання, до складу якого входили: апарат для піщаноструйної обробки, електродуговий металізатор, фільтр-осушувач, касети з порошковим дротом, шафа електрична, джерело живлення. У процесі напилення проводився операційний контроль, при якому підлягали перевірці якість підготовки поверхонь нагріву до напилення, режим напилення, порядок нанесення шарів напиленого металу, зернистість і колір покриття. Напилення велося без використання підкладки. Труби після металізації не підлягали термообробці.

Після проведення напилення захисного шару змійовики було встановлено на паровий котел надкритичного тиску ТПП-210 А блок станційний №1 корпус А. В якості палива за проектом для котла ТПП-210 А використовується вугілля марки АШ. При роботі котла на вугіллі марки АШ температура газів в районі розташування змійовиків коливалася в межах 700...900 °С, а склад топкових газів при цьому був приблизно таким: CO – 50...70 мг/м³; O₂ – 5 %; SO₂ – 2863 мг/м³; NO_x – 1187 мг/м³. Хімічний склад золи вугілля АШ з циклонних золоуловлювачів (%): SiO₂ = 51,4, CaO = 3,8, MgO = 1,6, Fe₂O₃ = 15,3, Al₂O₃ = 22,4, K₂O = 3,3, Na₂O = 1,5. На Вуглегірській ТЕС (Вг.ТЕС) напиленню були піддані дві поверхні нагрівання: котел харчоварильний паровий (КХП) н.д. (Ст.12Х1МФ) між планками дистанціювання і згини біля стінок парового котла надкритичного тиску ТПП-312 А блок станційний № 4. Так само напиленню підлягав ВЕ (сталь 20 (ст.)) парового котла надкритичного тиску ТПП-312 А

блок станційний № 2. В якості палива за проектом для котла ТПП-312 А використовується вугілля марки Г. Встановлено, що на Тп.ТЕС і Вг.ТЕС основним видом зносу на ВЕ був золотий, а між планками дистанціювання – корозія, тому напилення на поверхнях нагріву вироблялося одним і тим самим матеріалом. Склад напиленого шару наведено в табл. 3. На Трипільській ТЕС склад контролювали рентгенофлуоресцентним спектрометром NITON XL2.

Електродугове напилення проводилося у 2013 р. на найбільш абразивно-зношених ділянках змійовиків ВЕ котлів ТПП-210 А та ТПП-312 А, корозійнопошкоджених ділянках труб змійовиків КХП н/д в планках дистанціювання котла ТПП-312 А. Фото напилених змійовиків наведені на рис. 6.

Після напилення і під час експлуатації проводилися вирізки з труб поверхонь нагріву, мікроструктура яких для надійної експлуатації повинна відповідати вимогам [21]. На Вуглегірській ТЕС після металізації для проведення металографічного дослідження з напиленої труби КХП н.д. було вирізано 2 контрольних зразка: один – безпосередньо зі згину (з напиленням на поверхні), а другий (контрольний) – на відстані 150 мм від напиленої зони. Шліфи виготовлялися шляхом послідовного шліфування і полірування. Травлення шліфів вироблялося в 4%-му розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Для металографічного аналізу використовувався мікроскоп МІМ-8М, при збільшеннях ×100 та ×500 раз. Структура контрольного зразка – феритно-перлітна. Стилоскопіювання вироблялося на стаціонарному стилоскопі СЛ-13. Зовнішньому огляду піддавалися напилені труби і згини. Механічні випробування проводилися на

Таблиця 3. Склад напиленого шару

Номер зразка	Вміст легуючих елементів, %								
	Fe	Cr	Al	Si	Ni	Cu	Ti	Zn	Mo
1	76,04	11,76	5,41	5,36	0,17	0,08	0,14	0,13	0,05
2	77,39	11,27	5,58	4,66	0,15	0,09	0,11	0,1	0,09
3	75,13	11,33	5,52	5,67	0,19	0,09	-	0,04	-
4	76,95	12,37	6,04	3,5	0,18	0,11	0,11	0,06	0,04



Рис. 6. Зовнішній вигляд напилених змійовиків

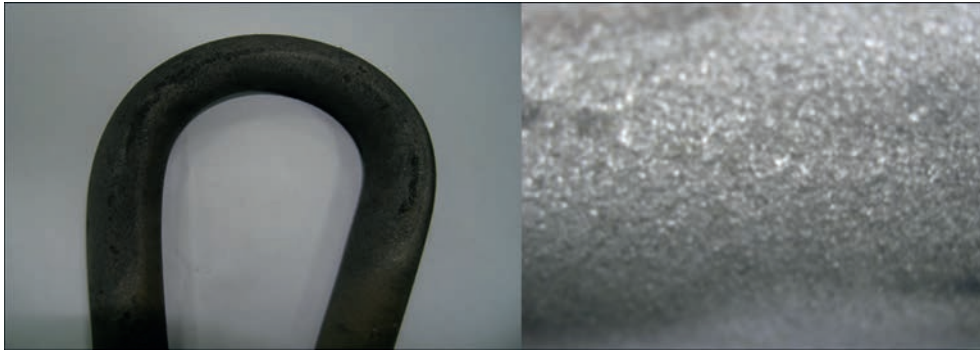


Рис. 7. Зовнішній вигляд згину труби та її поверхні після напилення

сплющування і на визначення механічних властивостей. На Трипільській ТЕС після проведення металізації змійовиків ВЕ діаметром 32×6 мм Ст.20 вирізалися котушки (виробничі зразки), далі з них вирізалися зразки, які випробовувалися на сплющування. Відшарування шару покриття відбувається після сходження внутрішніх сторін до $H_{\text{вн}} = 15$ мм. Сходження сторін виконувалося до $H_{\text{вн}} = 10$ мм. Напилений шар піддавався вимірюванню твердості на ультразвуковому твердомірі ТКМ-459.

На Трипільській ТЕС досліджені два варіанти зварювання труб зі сталі 20 після металізації. Перший – електродугове зварювання труб після металізації електродами ЦУ-5 – 2,5 мм з трубами, що не пройшли металізацію. Другий – зварювання електродами ЦУ-5 при стикуванні труб, які пройшли металізацію між собою. Зварювання виконувалося відповідно до [23]. Перед зварюванням кромки труб обробляли під кутом 40...45° з очищенням в районі торців. Діаметр стрижня електродів ЦУ-5 – 2,5 мм. За зовнішнім виглядом зварні шви в задовільному стані. Розтріскувань, пор, раковин, підрізів та інших зовнішніх дефектів не спостерігалось. Поверхневий шар труб з металізацією в районі зварного з'єднання зачищають для проведення контролю неруйнівними методами. Ультразвуковим контролем внутрішніх дефектів в стикових швах не виявлено. Мікроструктура металу в біляшовній зоні і в районі швів в обох випадках задовільна. При проведенні рентгенофлуорисцентного аналізу зварних з'єднань виявлено незначне підвищення вмісту хрому. Підвищений вміст кремнію у зварно-

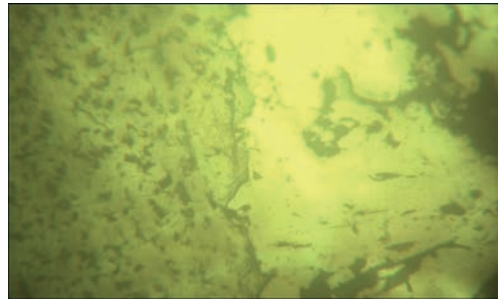


Рис. 8. Мікроструктура (×500) металу зразка з напиленим шаром у з'єднанні очевидно пов'язаний з недостатньою якістю підготовки поверхні. Під час проведення механічних випробувань зварного шва руйнування зразка відбувається по основному металу, що свідчить про задовільні механічні властивості шва. Мікроструктура металу в біляшовній і зоні швів в обох випадках у межах норми.

Результати та обговорення. Зовнішній огляд труб і згинів показав, що напилений шар має грубу шорстку поверхню, що має металевий блиск. При детальному розгляді напилень поверхні на ній розрізняються відокремлені великі кристали, які і надають їй значної шорсткості. Напилення має рівномірний і суцільний розподіл по зовнішній поверхні згинів. У результаті виконаного напилення труб і згинів на Трипільській ТЕС було зроблено фотографії їх макроструктури (рис. 7), а також мікроструктури труби після напилення (рис. 8). Структура після металізації не зазнала змін і відповідала нормативним вимогам.

За допомогою якісного спектрального аналізу встановлено, що напилений захисний шар труби

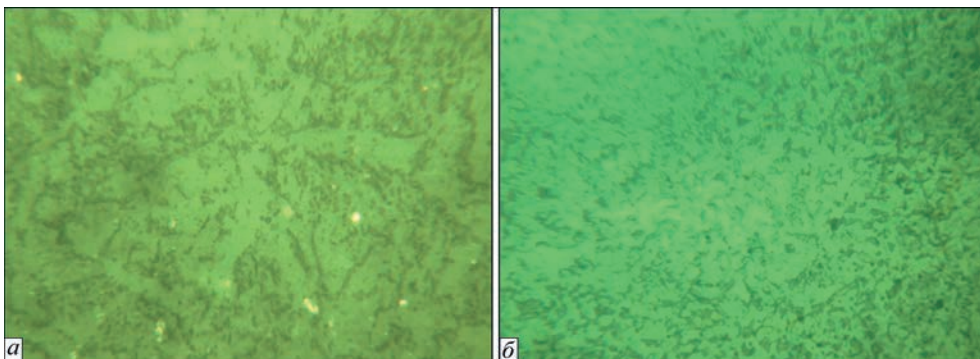


Рис. 9. Мікроструктура напилених труб зі сталі марки 20: а – ×500; б – ×100

ВЕ, отриманий методом електродугової металізації, являє собою композит зі зміцнювальною карбідною фазою в металевій матриці і містить такі легуючі елементи, як хром і алюміній. Склад фази карбіду близько 40 %. Основний метал – вуглецева сталь (легуючі елементи не виявлені). У мікроструктурі напилених труб зі сталі марки 20 (рис. 9) орієнтація по відманштеттовій структурі не повинна перевищувати 3-го бала шкали 2 Додатка Б «Шкали смугастості й відманштеттової структури металу котельних труб» [21].

При проведенні металографічного дослідження труб КХП н.д. Вуглегірської ТЕС встановлено, що для вихідної структури металу труби характерна значна смугастість, що є відхиленням від нормативів і свідчить про неякісну термічну обробку труб після прокатки в процесі їх виготовлення. Структура напиленого зразка, як і у контрольного – феритно-перлітна; видимих структурних змін не встановлено. Під напиленим шаром проглядається вузька прикордонна смуга основного металу товщиною від 0,07 до 0,15 мм, яка піддалася взаємодії з напиленим шаром. Структура матриці цієї смуги така ж, як і у основного металу – феритно-перлітна. В межах цієї смуги застосований травник контрастно не надав вкраплення напиленого матеріалу, проте можна припустити, що дифузійні вкраплення повинні бути там присутніми.

Використаний травник не дав можливості виділити в структурі напилення ніяких структурних складових (не використовувалися спеціальні хімічні реактиви). Однак дозволив встановити пухко-шарувату і пористу (не монолітну) будову напилення, зумовлену технологічними особливостями електродугової металізації. В обох випадках товщина напиленого шару варіюється на різних ділянках труби. Так, в лобовій точці труби товщина напилення досягає 0,42 мм, а на бічних – до 0,2 мм. З урахуванням прикордонного шару основного металу, який піддався дифузії в нього напиленого матеріалу, можна констатувати, що найбільша товщина напилення становить 0,57 мм (на лобовій частині згину). При проведенні техно-

логічних випробувань на сплющування тріщин, надривів по основному металу труби не виявлено. Після випробувань на сплющування (рис. 10) для відшарованого шару (0,55 мм) (рис. 11) проведено рентгенофлуоресцентний аналіз, який показав наступний хімічний склад, мас. %: 11,7...12,21 Cr; 0,12 Ni; 4,0...5,65 Si; 4,37...5,87 Al; 0,37...0,44 S. Фото макроструктури напилених труб після шести років експлуатації наведено на рис. 11.

Руйнування поверхневого шару відбувається відшаруванням великих фрагментів напиленого шару. Під час проведення механічних випробувань на визначення межі міцності труби після напилення було отримано результати, наведені в табл. 4.

Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам ТУ 14-3-460: 2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 [21]. Ділянки напиленого шару мають твердість *HRC* 54...58. Поверхневий шар під відшарованим покриттям має наступний хімічний склад, мас. %: 91,47 Fe; 2,78 Cr; 3,9 Si; 1,1 Al; 0,26 S. Твердість поверхні під шаром напилення становить *HB* 200...217. Таким чином, отримані результати можуть свідчити про те, що основний метал після напилення не зазнав істотних змін мікроструктури та механічних властивостей і відповідав вимогам технічних умов. Після трирічної експлуатації труб і згинів на Трипільській ТЕС проведено спектральний аналіз поверхневого шару покриття. Склад шару змінився незначно (табл. 5).

При проведенні вирізок після шести років експлуатації так само фіксувалися: макро- і мікроструктура напилених труб (рис. 12, 13), склад поверхневого шару (табл. 6). Проведено технологічні випробування на сплющування, замір твердості проведено не було. Протягом експлуатації поверхня стає більш грубою, на поверхні видно виступаючі карбіди різного розміру.

Дослідження мікроструктури до і після зношування в потоці вугільного пилу при робочих параметрах ВЕ показують переорієнтацію карбідного каркаса в матриці.

Поверхневий дифузний шар має наступний хімічний склад, мас. %: 3,27 Cr; 1,87 Si; 0,9 Al; 0,3 S.

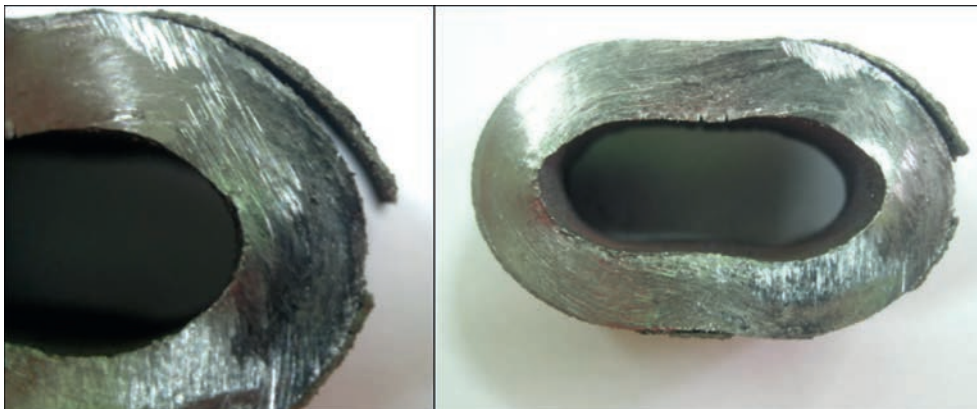


Рис. 10. Зразки після випробування на сплющування



Рис. 11. Відшарований шар після випробування на сплющування

Таблиця 4. Результати механічних випробувань

σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
511	28,2	58
ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009		
420...560	24	45

Таблиця 5. Склад напиленого шару після трирічної експлуатації на ТЕС

Номер зразка	Вміст легуючих елементів, %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	11,41	5,67	5,67	0,15
2	«-»	10,89	5,87	5,5	0,17



Рис. 12. Макроструктура напилених труб після шести років експлуатації

Таблиця 6. Склад напиленого шару після шестирічної експлуатації на ТЕС

Номер зразка	Вміст легуючих елементів, %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	12,9	6,67	7,9	0,1
2	«-»	12,7	5,79	7,1	0,1

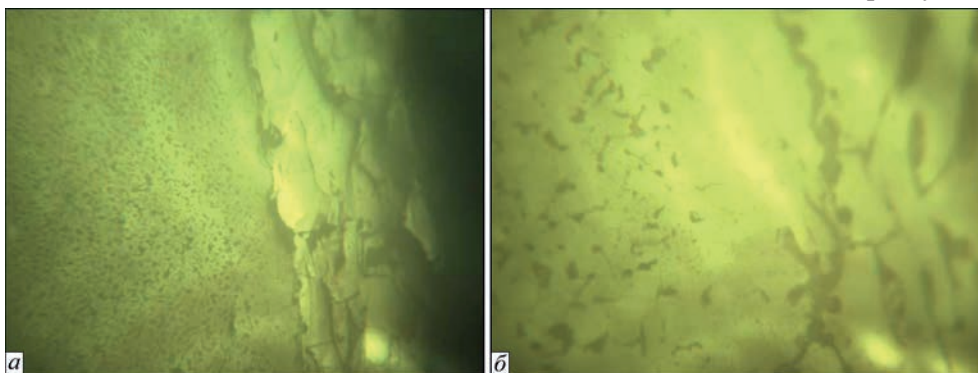


Рис. 13. Мікроструктура напилених труб після шести років експлуатації: а – $\times 100$; б – $\times 500$

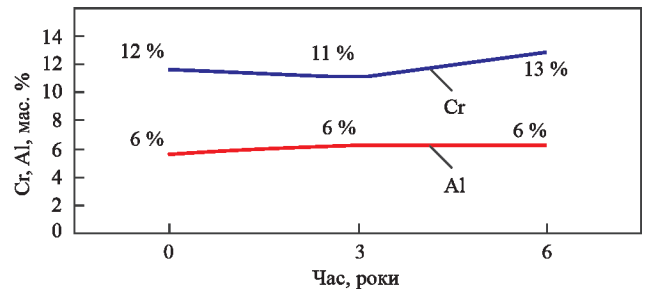


Рис. 14. Зміна концентрації хрому і алюмінію в поверхневому шарі покриття залежно від терміну експлуатації

Горизонтальні лінії на рис. 14 показують, що протягом шести років концентрація хрому в поверхневому шарі практично не змінилася і навіть трохи підвищилася, відбувається його накопичення в поверхневому шарі. Збільшення концентрації алюмінію в поверхневому шарі швидше за все пов'язане з осадженням на трубах змійовиків алюмінієвмісних елементів, що утворюються в процесі спалювання органічного палива.

Руйнування поверхневого шару при випробуванні зразків відбувається шляхом розтріскування покриття на дрібні фрагменти і його викришування. Як видно, витримка покриттів при робочих параметрах призводить до зміни механіки їх руйнувань, що можливо, викликано зміною в структурі дисперсних фаз. Твердість напиленого шару виміряти не вдалося. Твердість поверхні під шаром напилення становить *HB* 180. На кожній електростанції збираються дані з фактичної товщини стінок труб поверхонь нагріву руйнівними і неруйнівними методами. При проведенні вирізок з труб фіксуються дані з її товщини, мікроструктури і механічних властивостей. Для виміру стоншування труб використовується методика прямого виміру товщини стінки. Підсумкові дані зі стоншування стінок труб до напилення, а також час роботи кожного вирізаного зразка зведені в табл. 7.

Аналізуючи дані зі стоншування, можна зробити висновок, що у всіх випадках зі збільшенням часу експлуатації зростає і величина стоншування стінки від золотого зносу. Найбільша інтенсивність золотого зносу спостерігається на перших двох трубах зі сталі 20 крайніх змійовиків ВЕ. Це явище, швидше за все, пов'язане з конструктивною особливістю газового тракту пиловугільного

Таблиця 7. Дані зі стоншування стінок труб

Номер блока	Поверхня нагріву	Поверхня, робоче середовище	Марка матеріалу	Номер змійовика	Номер труби	Стоншування, мм				Напряцювання, год
						Лівий бік	Правий бік	Зовнішній	Внутрішній	
1	BE	АШ	Сталь 20	152	1	-0,4	-0,4	-0,5	+0,2	11296
1	BE	«-»	«-»	150	«-»	-0,5	-0,5	-0,8	+0,1	12138
1	BE (після напилення)	«-»	«-»	151	«-»	+0,4	+0,5	+0,7	+0,2	9084

П-подібного котла. При виході з верхньої радіаційної частини, в поворотній камері, гази змінюють свій напрямок і найбільш великі частки продуктів згоряння палива закидаються на периферію загального потоку. Збільшення їхньої щільності в потоці сприяє інтенсифікації золотого зносу 20 крайніх змійовиків BE [24]. Після металізації поверхні труб змійовиків BE виявлено зниження інтенсивності золотого зносу змійовиків. Під час проведення заміру товщини стінки на контрольних вирізках стоншення не зафіксовано. Таким чином, у даному випадку можна допустити наявність впливу твердості на швидкість золотого зносу і зробити висновок, що з підвищенням твердості зносостійкість зростає. Це спостереження узгоджується з моделлю ерозійного зносу [23].

Висновки

В роботі досліджено застосування методу електродугового напилення (металізації), виконаного ТОВ «РЕЗОН» для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання ТЕС. За даними, отриманими про механічний, хімічний та структурний стан металу труби і шару покриття, можна зробити висновок про позитивний досвід впровадження методу електродугового напилення як перспективного і високоефективного методу підвищення надійності роботи енергетичного обладнання. На Трипільській ТЕС досліджено два варіанти зварювання труб зі сталі 20 після металізації. Перший – електродугове зварювання труб після металізації електродами ЦУ-5 – 2,5 мм з трубами, що не пройшли металізацію. Другий – зварювання електродами ЦУ-5 при стикуванні труб, які пройшли металізацію, між собою. При проведенні рентгенофлуорисцентного аналізу зварних з'єднань виявлено незначне підвищення вмісту хрому. Підвищений вміст хрому у зварному з'єднанні, очевидно, пов'язаний з недостатньою якістю підготовки поверхні. Під час проведення механічних випробувань зварного шва руйнування зразка відбувається по основному металу, що свідчить про задовільні механічні властивості шва. Мікроструктура металу в біляшовній і зоні швів в обох випадках у межах норми [21]. Відсутність корозійних пошкоджень у місцях установок досліджуваних змійовиків і значного ерозійного зносу стінок труб BE, порівняно з необробленими напиленням, з традиційними методами індивідуального захисту змійовиків, вказує на успішну реалізацію технології, про що свідчить збільшення ресурсу котельної труби.

Список літератури

1. Шрайбер А.А., Яценко В.П. (2008) Моделирование абразивного износа конвективных теплообменных поверхностей котла. *Проблеми загальної енергетики*, **17**, 37–40.
2. *Аварійність на об'єктах електроенергетики України у 2004 р.* Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list> (дата звернення: 11.10.2020)
3. *Огляд технологічних порушень в електроенергетиці України за четвертий квартал 2005 р.* Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list> (дата звернення: 11.10.2020)
4. Soltani, M., Chahartaghi, M., Majid Hashemian, S., Faghieh Shojaei, A. (2020) Technical and economic evaluations of combined cooling, heating and power (CCHP) system with gas engine in commercial cold storages. *Energy Conversion and Management*, 214. Article number: 112877.
5. Yang, S., Zhang, L., Fan, J., Sun, B. (2021) Experimental study on erosion behavior of fracturing pipeline involving tensile stress and erosion prediction using random forest regression. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 87. Article number: 103760.
6. Maidanik, M.N., Tugov, A.N., Vereshchetin, V.A. (2020) Assessment of Boiler Units' Technical State Based on Quality Indicators. *Thermal Engineering*, **67**, 4, 216–222.
7. Kiselev, S.P., Kiselev, V.P., Maximovsky, E.A. et al. (2019) Mechanism of formation of intermetallic coatings by the Cold Spray Technology. *Journal of Physics, Conference Series*, 1677, 1. Article number: 012136.
8. Sethi, A.K. (2020) Studies on hard surfacing of structural steel by gas thermal spraying process. *International Conference on Mechanical and Energy Technologies*, 21, 1436–1440.
9. Шатов А.П. (2009) *Сварка и ремонт металлических конструкций противокоррозионными покрытиями*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
10. Пантелеенко Ф.И., Снарский А.С., Крыленко А.В. (2012) Особенности деградации структуры и механические свойства элементов печного и теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации. *Наука и техника*, **1**, 16–20.
11. Som Dutt Sharma, S.D., Saluja, R., Moeed, K.M. (2013) A review on the effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *International Journal of Technical Research and Applications*, **1**, 5–7.
12. Feng, L., Yang, N. (2019) Stainless Steel Welding and Development Trend of Welding Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 252, 2, Article number: 022117.
13. Яценко В.П. (2006) Прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельного устаткування. *Проблеми загальної енергетики*, **13**, 81–85.
14. Birkin, P.R., Lear, R., Webster, L. et al. (2020) In-situ detection of single particle impact, erosion/corrosion and surface roughening. *Wear*, 464–465. Article number: 203527.
15. Корж В.М. (2005) *Газотермічна обробка матеріалів*. Київ, Екотехнологія.
16. Лашенко Г.И. (2012) *Современные технологии сварочного производства*. Киев, Экотехнологія.
17. Hirohata, M., Takeda, F., Konishi, H., Itoh, Y. (2018) Effect of weld line direction and paint orientation on corrosion and paint deterioration characteristics of welded part of steel. *Corrosion Engineering Science and Technology*, **53**, 8, 591–600.
18. *Інструкція по відновленню изношених и защите новых гибов и прямых участков труб поверхностей нагрева котлов высокого давления методом газопорошковой наплавки И 34-70-027-87*. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=68749 (дата обращения: 12.10.2020)

19. Гречнева М.В., Гоппе Г.Г. (2015) Газопорошковое напыление труб поверхностей нагрева котлоагрегатов тепловых электрических станций. *Вестник ИрГТУ*, **11**, 106, 23–27.
20. Мальчевський І.А., Беспалов С.А. (2017) *Перспективні науково-технічні розробки. Енергетика та енергоефективність*. Київ, Академперіодика.
21. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293733/4293733499.htm> (дата обращения: 16.10.2020).
22. Нанесення захисного покриття на змієвики водяного економізатора та екранні труби котла ТП-100. ТІ 00130044.25101.00549. Львів, ДП «Львівське конструкторське бюро» Режим доступу: <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/as/2019/05/04/> (дата звернення: 16.10.2020).
23. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций. РД.15.027-89. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026674> (дата обращения: 15.10.2020).
24. Ruff A.W., Wiederhorn S.M. (1979) Erosion by solid particle impact. *Treatise on Materials Science and Technology*, 16, 69–126.
9. Shatov, A.P. (2009) *Welding and repair of metal structures of anticorrosion coatings*. Moscow, MG TU [in Russian].
10. Panteleenko, F.I., Snarsky, A.S., Krylenko, A.V. (2012) Peculiarities of structure degradation and mechanical properties of components of furnace and heat-and-power engineering equipment after long term service. *Nauka i Tekhnika*, **1**, 16–20 [in Russian].
11. Som Dutt Sharma, S.D., Saluja, R., Moeed, K.M. (2013) A review on the effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *Int. J. of Technical Research and Applications*, **1**, 5–7.
12. Feng, L., Yang, N. (2019) Stainless Steel Welding and Development Trend of Welding Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 252, 2, Article number: 022117.
13. Yatsenko, V.P. (2006) Prediction of erosion wear of heat exchange surfaces of boiler equipment. *Problemy Zagalnoi Energetyky*, **13**, 81–85 [in Russian].
14. Birkin, P.R., Lear, R., Webster, L. et al. (2020) In-situ detection of single particle impact, erosion/corrosion and surface roughening. *Wear*, 464–465. Article number: 203527.
15. Korzh, V.M. (2005) *Thermal treatment materials*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
16. Lashchenko, G.I. (2012) *Modern technologies of welding production*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
17. Hirohata, M., Takeda, F., Konishi, H., Itoh, Y. (2018) Effect of weld line direction and paint orientation on corrosion and paint deterioration characteristics of welded part of steel. *Corrosion Engin. Sci. and Technology*, 53(8), 591–600.
18. *Instruction on restoration of worn-out and new bends and straight pipe areas of heating surfaces of high-pressure boilers by gas powder surfacing. I 34-70-027-87* [in Russian]. http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=68749.
19. Grechneva, M.V., Goppe, G.G. (2015) Gas powder spraying of heating surface pipes of boiler units of thermal power stations. *Vestnik IrGTU*, **11**, 106, 23–27 [in Russian].
20. Malchevsky, I.A., Bepalov, S.A. (2017) *Prospective scientific and technical developments. Energetyka ta Energoefektivnist*. Kyiv, Akadempriodyka [in Ukrainian].
21. ТУ У 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009: *Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines* [in Russian]. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293733/4293733499.htm>
22. ТІ 00130044.25101.00549: *Deposition of protective coating on coils of feed-water economizer and water wall tubes of boiler TP-100*. Lviv, SE Lviv Design Bureau. <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/as/2019/05/04/>
23. РД.15.027-89: *Welding, heat treatment and inspection of pipe systems of boilers and pipelines in mounting and repair of power plant equipment*. <http://docs.cntd.ru/document/1200026674>
24. Ruff, A.W., Wiederhorn, S.M. (1979) Erosion by solid particle impact. *Treatise on Mater. Sci. and Technol.*, 16, 69–126.

References

1. Shrajber, A.A., Yatsenko, V.P. (2008) Modeling of abrasive wear of convective heat exchange surface of boiler. *Problemy Zagalnoi Energetyky*, **17**, 37–40 [in Russian].
2. *Accident rate in the facilities of electrical power engineering of Ukraine in 2004*. <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list>.
3. *Inspection of technology violation in electrical power engineering of Ukraine in fourth quarter of 2005*. <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list>
4. Soltani, M., Chahartaghi, M., Majid Hashemian, S., Faghih Shojaei, A. (2020) Technical and economic evaluations of combined cooling, heating and power (CCHP) system with gas engine in commercial cold storages. *Energy Conversion and Management*, 214. Article number: 112877.
5. Yang, S., Zhang, L., Fan, J., Sun, B. (2021) Experimental study on erosion behavior of fracturing pipeline involving tensile stress and erosion prediction using random forest regression. *J. of Natural Gas Sci. and Engin.*, 87. Article number: 103760.
6. Maidanik, M.N., Tugov, A.N., Vereshchetin, V.A. (2020) Assessment of Boiler Units' Technical State Based on Quality Indicators. *Thermal Engineering*, 67(4), 216–222.
7. Kiselev, S.P., Kiselev, V.P., Maximovsky, E.A. et al. (2019) Mechanism of formation of intermetallic coatings by the cold spray technology. *J. of Physics, Conf. Series*, 1677, 1. Article number: 012136.
8. Sethi, A.K. (2020) Studies on hard surfacing of structural steel by gas thermal spraying process. In: *Proc. of Int. Conf. on Mechanical and Energy Technologies*, 21, 1436–1440.

IMPROVING THE RELIABILITY OF ENERGY COMPLEX EQUIPMENT BY ELECTRIC ARC SPRAYING

A.V. Hruzevych¹, V.V. Shvets²

¹Trypilska TPP. PJSC «Centrengo». 1 Promyshlennaya Str., 08720, Ukrainka, Ukraine

Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine. 03142, 36-b Akademik Vernadsky Blvd., Kyiv, Ukraine. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Chief Technologist Department. «REZON», LTD. 1 Geofizicheskaya Str., 49057, Dnipro, Ukraine. E-mail: 230608us@gmail.com

The purpose of the work is studying the efficiency of spraying application to improve the reliability of TPPs power equipment. A feasibility study indicated that the introduction of spraying technology can reduce losses in case of TPPs emergency shutdowns by 1.5-3.0 times a year, and the estimated extension of the service life of surfaces increases by 1.7-2.5 times. Since the main type of wear in the water economiser (WE) of TPP boilers is ash wear, and corrosion between the spacing bars, a comprehensive solution was proposed for the problem of extending the service life of boiler shield tubes and economiser tubes through development of new heat-resistant and wear-resistant gas-thermal coatings. 24 Ref., 7 Tabl., 14 Fig.

Keywords: spraying, welding, thermal power plant, ash wear, corrosion, electric arc coating

Надійшла до редакції 20.08.2021