Дослідження причин аварійного руйнування пароперегрівних труб в котельному обладнанні

Л. В. Опришко, завідувач відділення матеріалознавства, завідувач лабораторії труб і виробів для теплової та атомної енергетики, Liudmila.opryshko@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5444-311X>

Т. В. Головняк, завідувач сектору експертних досліджень металопродукції із чорних та кольорових металів і сплавів, tatyana.golovniak@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8853-7034>

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості імені Я. Ю. Осади (ДП «НДТІ»), Дніпро

Наведено результати комплексних досліджень зразків передчасно зруйнованих пароперегрівних труб розміром 57×4 мм зі сталі STBA 22, в котлі фабрики «Singburi Sugar Co, Ltd» (Таїланд). Труби виготовлені ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» (Україна) за стандартом JIS G 3462 (Японія) і зруйнувалися за короткий термін експлуатації ~ 240 годин. Встановлено, що труби експлуатувалися з порушеннями режиму горіння палива і циркуляції теплоносія. Характерні особливості експлуатації пошкоджених труб - високі теплові навантаження зі сторони топки і обмеження (або відсутність) циркуляції теплоносія (закупорка гребів, колекторів та інші). В процесі експлуатації труби піддавалися також впливу значних термічних вібраційних напружень (нестабільний режим горіння). Через порушення циркуляції теплоносія і нестабільного режиму горіння палива мав місце тривалий перегрів за температури більше ніж 1000 °С. Високі теплові навантаження за практично повної відсутності теплоносія, нерівномірний розподіл підвищених теплових потоків внаслідок порушення топкового режиму горіння сприяли передчасній прискореній деградації структури і термічній деструкції металу труб. За короткий термін експлуатації (~240 годин) відбулася значна зміна розмірів труб (прискорена повзучість за високих температур) та повна перекристалізація мікроструктури металу по всій товщині стінки пошкоджених труб.

Встановлено, що прискорена деградація структури металу зруйнованих труб пов'язана як з перегрівом стінки труб, так і з не рекомендованою (для експлуатації за високих температур та тиску) структурою металу труб в стані постачання. Показана необхідність корегування на ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» режиму термічної обробки цих труб.

Результати досліджень дозволяють розробити рекомендації по усуненню порушень режиму експлуатації і налагодженню контролю фактичних теплових потоків в найбільш теплонавантажених ділянках пароперегрівника котла фабрики «Singburi Sugar Co, Ltd» (Таїланд). З урахуванням особливостей котельного обладнання і режиму його експлуатації, рекомендовано також замінити матеріал пароперегрівних труб на більш жароміцну і жаростійку марку сталі.

Ключові слова: котельна труба, пароперегрівник, пошкодження, термічна деструкція, деградація структури, режим горіння, циркуляція теплоносія, перегрів.

Котельний агрегат експлуатують протягом тривалого часу в умовах високої температури газів, високих температур і тиску пару, підвищеної корозії та ерозії металу [1,2]. Основними елементами котлоагрегату є труби з різних за хімічним складом (ступені легування) марок стали, які встановлюють залежно від параметрів експлуатації, в різних ділянках котла (пароперегрівник, водяний економайзер, трубопровід живильної води та інше) [1-3]. З урахуванням умов експлуатації до металу труб котельного агрегату висувають жорсткі вимоги щодо хімічному складу, якості поверхні, геометричних параметрів, структури та фізико-механічних властивостей, зокрема жароміцності [3-6]. Більшість цих вимог зазначена в стандартах на труби.

Трубні заводи України виробляють котельні труби як за вітчизняними, так і за закордонними стандартами. Слід зазначити, що в закордонних стандартах на котельні труби, на відміну від вітчизняних, відсутні вимоги до мікроструктури металу труб, а норми характеристик жароміцності є довідковими. Вимоги до мікроструктури вказані у внутрішніх керівних матеріалах закордонних виробників. Потрібну структуру металу труб, яка забезпечує тривалу міцність металу труб в умовах високих температур і тиску, закордонні виробники отримують завдяки повному дотриманню технології виробництва. При цьому забезпечення високої експлуатаційної надійності котельних труб періодично контролюється випробуваннями.

Передчасне пошкодження або руйнування котельних труб може призвести до аварійної ситуації з зупинками найважливіших об'єктів економіки і життєдіяльності, а також - до людських жертв. Як відомо, аварійні пошкодження (руйнування) труб в котлоагрегатах пов'язані як з невідповідністю якості труб вимогам нормативної документації, так і з порушеннями умов експлуатації енергообладнання [7-12]. Вчасно визначені причини пошкодження труб дозволяють оперативно скорегувати режими експлуатації котла, своєчасно провести технічну діагностику інших труб та запобігти подальшому руйнуванню котельного обладнання.

Метою роботи було дослідження руйнованих в котлі фабрики «Singburi Sugar Co, Ltd» (Таїланд) труб виробництва ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТБЮБ» (Україна) для визначення причин їх руйнування та розробки заходів щодо їх усунення.

Досліджували зразки передчасно пошкоджених (за 240 годин експлуатації) гарячекатаних труб розміром 57x4 мм зі сталі STBA 22, які були виготовлені за японським промисловим стандартом JIS G 3462 «Труби із легованої сталі для котлів та теплообмінників» на трубопрокатному агрегаті з безперервним станом (ТПА 30-102) ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТБЮБ». Додатково досліджували зразок непошкодженої труби, яка була розташована на відстані від найбільш теплонавантаженої ділянки котла. За даними представника фабрики «Singburi Sugar Co, Ltd» (Таїланд),

температура всередині пошкоджених труб становила $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, зовні $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$; тиск робочого середовища не перевищував 270 МПа.

Виконували зовнішній огляд пошкоджених труб для виявлення виду і характеру їх руйнування; рентгеноструктурний аналіз окалини на зовнішньої і внутрішньої поверхні цих труб; механічні випробування на зразках непошкодженої труби та металографічні дослідження металу труб за і поза зоною пошкодження. Рентгеноструктурний аналіз виконували на установці «ДРОН-2» в мідному випромінюванні з графітовим монохроматом в режимі безперервної зйомки. Мікроструктуру металу досліджували у різних перерізах зразків труб до і після травлення в реактиві Нитала на світловому мікроскопі Axiovert 200MAT за 50, 100 і 500-кратних збільшень.

На усіх зразках досліджених труб з різними видами руйнування (рис. 1) спостерігалась сітка тріщин різного ступеня огрубіння, на окремих ділянках - з наскрізними руйнуваннями. Одна з труб була вигнута, що свідчить про велику силу розриву.

Рис. 1 Зовнішній вид досліджених зразків труб розміром 57x4 мм зі сталі STBA 22. $\times 0,2$.

Усі пошкоджені зразки труб збільшились у діаметрі на 25-30 % (рис. 2 а), що свідчить про прискорену повзучість цих труб за високих температур експлуатації. Виявлена термічна деструкція металу передчасно пошкоджених труб: зменшення товщини стінки складало 50-90 %, в окремих ділянках - до наскрізного руйнування (рис. 2 б). На зовнішній і внутрішній поверхнях пошкоджених труб спостерігали товстий шар окалини з шаруватою структурою товщиною до 3,0 мм, що свідчить про експлуатацію труб за температур, які перевищували температуру інтенсивного окалиноутворення (для сталі марки STBA 22 - 600°C).

Мікроструктури усіх зразків пошкоджених і зруйнованих труб практично ідентичні і свідчать про повну перекристалізацію і різний ступінь деструкцію металу по усій товщині стінки труб в процесі їх експлуатації (рис. 3).

Рис. 2. Характер зміни діаметру (а) і товщини стінки пошкоджених труб (б). а – $\times 0,4$; б – $\times 1,0$.

Рис. 3 Характерні мікроструктури металу зразків пошкоджених труб. $\times 50$.

Мікроструктура металу цих труб складається з множини дрібних і окремих крупних зерен фериту та надлишкових дисперсних карбідів. В

Технічна інформація

окремих перерізах виявлено тільки структуру крупнозернистого фериту, причому розмір феритних зерен збігається з товщиною стінки труб, спостерігаються ділянки з міжкристалітним окисленням (оплавленням) металу. Такі зміни структури металу характерні для процесу вторинної рекристалізації, яка протікає в певному температурному інтервалі (вище 1000 °C) [14, 15].

Про значний перегрів металу свідчить і склад грубої шаруватої окалини на поверхнях пошкоджених труб. Рентгеноструктурним фазовим аналізом встановлено, що окалина на зовнішній та внутрішній поверхнях труб складається, в основному, з вюститу (FeO) і магнетиту (Fe₃O₄), які утворюються за умов термічного окислення (горіння) металу за температур, які перевищують 800 °C (таблиця).

Структура окалини (наявність пор, відколів, сітки тріщин та ін.) вказує також на вплив значних термічних вібраційних навантажень (нестабільний імпульсний режим горіння) на пошкодження труби.

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу окалини

Склад окалини	
Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня
FeO (основа)	FeO (основа)
Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄
Cr ₂ O ₃ (сліди)	Cr ₂ O ₃
8CaO×3Al ₂ O ₃ ×MgO×5SiO ₂ (сліди) та інш.	8CaO×3Al ₂ O ₃ ×MgO×5SiO ₂ та інш.

Встановлено, що незадовільна (нестабільна при експлуатації за високих температур і тиску) структура металу труб в стані постачання послугувала додатковим фактором, який вплинув на прискорення пошкодження труб. Виявлено також деградацію структури непошкодженої труби за короткий час експлуатації. Мікроструктура металу зразка цієї труби складається з ферито-карбидної суміші, яку можна оцінити максимальним 6 балом за шкалою деградації перлітної (бейнітної) складових мікроструктури металу СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009 [13]. В структурі металу на зовнішній поверхні зразка непошкодженої труби виявлено локальні ділянки крупнозернистого фериту (рис. 4 а), які вказують на нерівномірний розподіл підвищених теплових потоків (порушення топкового режиму горіння). Структурні особливості металу непошкодженої труби вплинули на її механічні властивості. Метал окремих зразків непошкодженої труби характеризується низькими значеннями границі міцності (402 Н/мм², при нормі за стандартом JIS G 3462 не менше ніж 410 Н/мм²).

Таким чином встановлено, що причиною передчасного аварійного пошкодження і руйнування досліджених труб є порушення режиму експлуатації котла. Показано необхідність корегування режиму термічної обробки пароперегрівних труб зі сталі СТВА 22 на ТОВ «ИНТЕРПАЙП

Рис. 4. Характерна мікроструктура металу дослідженого зразка непошкодженої труби. а, б – $\times 100$, в – $\times 500$.

НИКОТЬЮБ» для отримання більш стабільної структури при експлуатації за високих температур і тиску. З урахуванням особливостей котельного обладнання і режиму його експлуатації рекомендовано змінити матеріал пароперегрівних труб в котлі фабрики «Singburi Sugar Co, Ltd» (Таїланд) на більш жароміцну і жаростійку марку стали.

Література

1. Янко П.І., Мисак Й.С. Режимы эксплуатации энергетических котлов. – Львів:Українські технології, 2004, – 272 с.
2. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация. – М.: Академия, 2010, – 432 с.
3. Антикайн П.А. Металлы и расчеты на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоиздат, 1990. – 386 с.
4. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
5. Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
6. Куманин В.И. Ковалева Л.А., Алексеев С.В. Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 224 с.
7. Баранов А.П. Предупреждение аварий паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991, – 97 с.
8. Сафина И.С., Каузова П.А., Гущин Д.А. Типология дефектов трубопроводов пара и горячей воды // Технадзор, – 2016. – № 2 (111). – С. 15-21.
9. Богачев В.А., Таран О.Е. Влияние тепловой неравномерности на температуру и надежность металла конвективных пароперегревателей // Электрические станции. – 2002. – №2. – С. 21-24.

10. Гринь Е.А., Степанов В.В., Саркисян В.А., Бабкина Р.И. Методика оценки технического состояния котлов и трубопроводов ТЭС // Электрические станции. – 2011. – №7. – С. 23-27.
11. Минц И.И., Ходыкина Л.Е., Логвиненко И.Г. Повреждаемость и технологические дефекты в металле высокотемпературных трубопроводов. – Челябинск: Цитеро, 2009. – 163 с.
12. Дитяшев Б.Д., Теретьев И.А. Причины повреждений и статистика по отказам трубопроводов ТЭС // Электрические станции. – 2003. – №4. – С. 47-50.
13. СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009. Стандарт галузевий. Металографічні методи дослідження елементів теплоенергетичного устаткування. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 68с.
14. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Основы металлографии и пластической деформации стали. – Киев-Донецк: Вища школа, 1987, – 240 с.
15. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.

References

1. Yanko P.I., Mysak Y.S. *Rezhymy ekspluatatsii energetichnykh kotliv* (Operating modes of power boiler), Lviv: Ukrainian technologies, 2004, 272 p. [in Ukrainian].
2. Sokolov B.A. *Kotelnnye ustanovki i ih ekspluatatsiia* (Boiler plants and their operation), Moscow: Akademiia, 2010, 432 p. [in Russian].
3. Antikain P.A. *Metally i raschety na prochnost kotlov i truboprovodov* (Metals and calculation for the strength of boilers and piping), Moscow: Energoizdat, 1990, 386 p. [in Russian].
4. Krutasova E. I. *Nadezhnost metalla energeticheskogo oborudovaniia* (Reliability of metal power equipment), Moscow: Energoizdat, 1981, 240 p. [in Russian].
5. Bugai N.V. *Rabotosposobnost i dolgovechnost metalla energeticheskogo oborudovaniia* (Performance and durability of metal power equipment), Moscow: Energoatomizdat, 1994, 272 p. [in Russian].
6. Kumanin V.I., Kovaleva L.A., Alekseev S.V. *Dolgovechnost metalla v usloviakh polzuchesti* (Creep durability), Moscow: Metallurgiya, 1988, 224 p. [in Russian].
7. Baranov A.P. *Preduprezhdenie avarii parovykh kotlov* (Prevention of steam boiler accident), Moscow: Energoizdat, 1991, 97 p. [in Russian].
8. Safina I.S., Kauzova P.A., Gushchin D.A. *Tekhnadzor*, 2016, No. 2(111), pp. 15-21 [in Russian].
9. Bogachev V.A., Taran O.E. *Elektricheskie stantsie*, 2002, No. 2, pp. 21-24 [in Russian].
10. Grin E.A., Stepanov V.V., Sarkisian V.A., Babkina R.I. *Elektricheskie stantsie*, 2011, No. 7, pp. 23-27 [in Russian].
11. Mints I.I., Hodykina L.E., Logvinenko I.G. *Povrezhdaemost i tekhnologicheskie defekty v metalle vysokotemperaturnykh truboprovodov* (Damage and technological defects in the metal of high-temperature pipelines), Chelyabinsk: Tsitsero, 2009, 163 p. [in Russian].
12. Dityashev B.D., Terentev I. A. *Elektricheskie stantsie*, 2003, No. 4, pp. 47-50 [in Russian].
13. SOU-NEE 20.321:2009. *Standart galuzevyi. Metalografichni metody doslidzhennia elementiv teploenergetychnogo ustatkuvannia* (Metallographic methods of research of elements of heat power equipment), Kiev: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2009, 68p. [in Ukrainian].

14. Belchenko G.I., Gubenko S.I. *Osnovy metallografii i plasticheskoi deformatsii stali* (Fundamentals of metallography and plastic deformation of steel), Kiev-Donetsk: Vyshcha shkola, 1987, 240 p. [in Ukraine].
15. Novikov I.I. *Teoriia termicheskoi obrabotki metallov* (Theory of heat treatment of metals), Moscow: Metallurgiya, 1978, 392 p. [in Russian].

Одержано 14.09.2021

L. V. Opryshko, T. V. Golovniak

Studying the causes of destruction of steam superheater tubes in boiler equipment

Summary

Results of comprehensive studies of samples of prematurely destroyed 57x4 mm steam superheater tubes of STBA 22 steel used in a boiler unit of Singburi Sugar Co, Ltd factory (Thailand) are presented. The tubes were manufactured at Interpipe Niko Tube Ltd. (Ukraine) according to JIS G 3462 Standard (Japan). They were destroyed in a short (~240 hrs) term of operation. The cause of premature destruction of tubes of the above steel grade and size assortment in the boiler unit has been established. Based on present-day investigation methods (metallography, X-ray diffraction, etc.), it was found that the tubes were operated with violation of fuel combustion conditions and heat-carrying agent circulation. Characteristic features of operation of damaged tubes include high thermal stresses from the side of the fire-chamber and limitation (or absence) of circulation of the heat-carrying agent (blockage in bends, drum heads, etc.). During operation, the tubes were also exposed to significant thermal vibration stresses (unstable combustion conditions). Prolonged overheating occurred at temperatures above 1000 °C because of violation of circulation of heat-carrying agent and unstable combustion mode. High thermal stresses at almost complete absence of a heat-carrying agent, uneven distribution of growing heat flows caused by violation of the combustion mode in the fire-chamber contributed to accelerated degradation of structure and thermal destruction of the tube metal. In a short term of operation (~240 hours), there was a significant change in the tube size (accelerated high-temperature creep) and complete recrystallization of metal structure throughout the entire wall thickness of the damaged tubes.

It has been established that the accelerated degradation of metal microstructure in the destroyed tubes was associated with both overheating of the tube wall and the as-delivered metal structure non-recommended for operation at high temperatures and pressures. It was shown that it is necessary to adjust the heat treatment conditions for these tubes at Interpipe Niko Tube Ltd.

The study results have made it possible to develop recommendations for eliminating violations of operating conditions and establishing control of actual heat flows in the most thermally loaded sections of the Singburi Sugar Co. Ltd factory's steam boiler superheater. Taking into account peculiarities of the boiler equipment and its operating conditions, it was also recommended to use a more heat-resistant and refractory steel instead of the currently used material for manufacture of the steam superheater tubes.

Key words: boiler tube, steam superheater, damage, thermal destruction, structure degradation, combustion conditions, heat carrier circulation, overheating.