

Приборы и оборудование

УДК 620.9:620.19
DOI:10.33070/etars.4.2019.08

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, **Борисов І.І.**, канд. техн. наук,
Халатов А.А., акад. НАНУ, докт. техн. наук, проф.

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

вул. Марії Капніст, 2а, 03057 Київ, Україна, e-mail: sergiykobzar@gmail.com

Моделювання корозії лопаток завихрювача пальника котла ТПП-312

Проведено розрахунки швидкості корозії сталевих лопаток завихрювача пилувугільного пальника котла ТПП-312 у реальних умовах його експлуатації. Як матеріал використовувалася сталь Ст3 та сталь 20. На першому етапі проводилося комп'ютерне моделювання термогазодинаміки потоків у пальнику, процесу горіння вугілля у топці котла з метою визначення температурного стану лопаток. На другому етапі із застосуванням експериментальних констант гетерогенної реакції окислення виконано розрахунки збільшення ваги матеріалу лопатки на одиницю поверхні та зменшення товщини основного матеріалу. Отримано дані щодо динаміки окислення поверхні лопаток для різних режимів експлуатації пальників. Розрахунки показали, що на процес окислення впливає матеріал лопаток, їх кількість, а також режим роботи пальника. Отримані результати дають можливість здійснювати обґрунтовану оцінку ресурсу роботи лопаток пальникового пристрою. *Бібл. 5, рис. 4, табл. 1.*

Ключові слова: пальник пилувугільного котла, лопатки завихрювача, корозія, динаміка потоншення основного матеріалу.

Пальники котлів ТЕС знаходяться в зоні впливу потужного радіаційного потоку з об'єму топки. У пальниках із закруткою вторинного повітря найбільш вразливим елементом пальника є лопатки завихрювача, оскільки на них, у першу чергу на частинах, що обернені до топки, відбувається інтенсивне окислення матеріалу. Як правило, товщина сталевих лопаток завихрювача не перевищує 4 мм, відведення теплоти теплопровідністю є досить ускладненим, максимальна температура на окремих ділянках поверхні досягає 800 °С та більше. Внаслідок руйнівного впливу агресив-

ного середовища відбувається корозія матеріалу, погіршується газодинаміка обтікання лопаток та в результаті відбуваються небажані зміни режиму горіння палива у котлі. Подовження ресурсу завихрювача пальника є актуальною комплексною проблемою теплофізики та матеріалознавства.

Швидкість окислення залежить від багатьох факторів, основними з яких є температура, хімічний склад, розмір зерен матеріалу, хімічний склад навколишнього середовища. Для виготовлення лопаток пальників пилувугільного котла ТПП-312 використовуються низьковугле-

цеві сталі із вмістом вуглецю менше 0,2 %. При високих температурах на поверхні матеріалу утворюється окалина, яка складається з вюститу (FeO), магнетиту (Fe_3O_4) та гематиту (Fe_2O_3). Склад окалини суттєво залежить від хімічного складу матеріалу.

В огляді [1] відмічається, що при окисленні чистого заліза у повітрі співвідношення шарів гематиту, магнетиту та вюститу приблизно дорівнює 1 : 4 : 95, тобто окалина практично повністю складається з монооксиду FeO , причому він безпосередньо примикає до чистого металу. Для низьковуглецевої сталі SAE-AISI 1006 (хімічний склад: С — до 0,08 %, Si — до 0,3 %, Mn — 0,25–0,4 %) окалина складається в основному з гематиту (Fe_2O_3), що суттєво відрізняється від окалини чистого заліза. Для легованої сталі у зв'язку з наявністю хрому хімічний склад окалини принципово інший [2].

Кінетика окислення залежить від терміну витримки матеріалу в окислювальному середовищі. Спочатку визначальним є кінетичний механізм, тобто утворення окалини залежить від швидкості гетерогенної хімічної реакції, але із зростанням товщини оксидної плівки починає переважати дифузійний механізм, який лімітує перенесення реагентів у зону хімічної реакції. На практиці для розрахунків, як правило, застосовується дифузійний механізм окислення, для якого зростання маси зразка описується параболічним законом [1]:

$$(\Delta m/S)^2 = k_p \tau, \quad (1)$$

де $\Delta m/S$ — зростання маси зразка на одиницю поверхні, $\text{г}/\text{см}^2$; k_p — константа швидкості гетерогенної реакції, $\text{г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$; τ — час, с.

Константа швидкості реакції визначається законом Ареніуса:

$$k_p = k_{p0} \cdot \exp(-Q/RT), \quad (2)$$

де k_{p0} — константа; Q — енергія активації, $\text{Дж}/\text{моль}$; R — газова стала, $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

У деяких експериментальних роботах вимірювалося не зростання маси, а зростання товщини оксидної плівки. У цьому випадку кінетичне рівняння (для параболічного закону) записується таким чином:

$$(x)^2 = k_x \tau, \quad (3)$$

а константа швидкості гетерогенної реакції визначається аналогічно рівнянню (2):

$$k_x = k_{x0} \cdot \exp(-Q/RT), \quad (4)$$

де k_{x0} — константа.

Для порівняння даних різних робіт необхідно мати коефіцієнт перерахунку k_p на k_x :

$$k_p (\text{г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})) = \alpha k_x (\text{см}^2/\text{с}).$$

За даними [1], значення α з достатньою для розрахунків точністю можна прийняти рівним 1,64. У багатьох роботах наводяться відомості щодо енергії активації та констант k_{p0} та k_{x0} . Вони суттєво відрізняються у залежності від експериментальних умов.

У даній роботі розглядається кінетика окислення низьковуглецевих сталей Ст3 та сталь 20 у повітрі стосовно окислення лопаток завихрювача пальникового пристрою пило-вугільного котла ТПП-312, тому основну увагу було приділено пошуку необхідних констант для сталей цього класу.

У роботі [1] для окислення чистого заліза у повітряному середовищі наведено такі значення константи та енергії активації: $k_{p0} = 3,047 \text{ г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$, $Q = 143264 \text{ Дж}/\text{моль}$. У статті [3] наведено дані для сталей СтЗсп та сталь 20. Для СтЗсп $k_{p0} = 0,251 \text{ г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$, $Q = 120653 \text{ Дж}/\text{моль}$, за своїм абсолютним значенням константа k_p близька до константи для чистого заліза. Для Сталі 20, за даними [3], $k_{p0} = 5,91 \text{ г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$, $Q = 160360 \text{ Дж}/\text{моль}$, а за даними [4], $k_{p0} = 3,73 \text{ г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$, $Q = 157966 \text{ Дж}/\text{моль}$. Для сталі SAE-AISI 1006, близької за складом до Сталі 20, $k_{p0} = 9,99 \text{ г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$, $Q = 169452 \text{ Дж}/\text{моль}$ [1]. За своїми абсолютними значеннями дані по константі швидкості для Сталі 20 та SAE-AISI 1006 є близькими, вони на порядок нижчі, ніж константа швидкості для Ст 3. Ці дані використовувалися при розрахунку швидкості окислення лопаток завихрювача.

Мета роботи — визначення температурного поля на поверхні лопатки пилувугільного пальника на основі комп'ютерного моделювання процесів горіння та теплообміну у топковому просторі енергетичного котла ТПП-312 у реальних умовах роботи, моделювання кінетики окислення поверхні та зменшення маси та товщини основного матеріалу лопатки завихрювача вторинного повітря.

Комп'ютерне моделювання

Котлоагрегат ТПП-312 оснащений 16-ма пальниками, що розташовані у два яруси [5]. Як модель для розрахункового дослідження

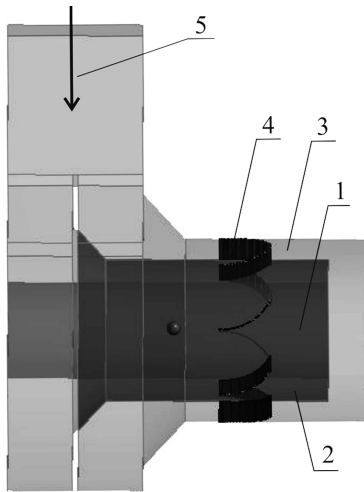


Рис.1. Комп'ютерна модель пальника: 1 – канал первинного повітря; 2, 3 – внутрішній кільцевий та периферійний кільцевий канали вторинного повітря; 4 – лопатки завихрювача; 5 – вхід вторинного повітря.

взято реконструйований пальник (рис.1); такими пальниками оснащено котли ДТЕК Ладжинської ТЕС.

Комп'ютерне моделювання процесів горіння та теплообміну у топковому просторі енергетичного котла ТПП-312 у реальних умовах роботи здійснювалося за допомогою пакету ANSYS CFX. Моделювання мало 3 послідовних етапи.

На першому етапі проводилося моделювання термогазодинаміки потоків у пальнику до виходу в об'єм топки котла. Як вихідні використовувалися дані (витрата та температура первинного та вторинного повітря), отримані при експлуатації котла. Дослідження проводилося у двох варіантах, з різною кількістю лопатей для завихрення вторинного повітря: 8 та 24. У моделі пальника використовувалися аксіальні лопатки з кутом повороту потоку 57° . У результаті визначався коефіцієнт витрати вторинного повітря для кожного з двох кільцевих каналів у вигляді співвідношення маси повітря через канал до загальної маси повітря, що подається у пальник. Також визначався надлишковий тиск, необхідний для проходу повітря через пальник, а також значення векторів швидкості на зрізі пальника. Результати розрахунку використовувалися для завдання граничних умов на зрізі пальників при розрахунку термогазодинаміки котла ТПП-312.

На другому етапі проводилося чисельне моделювання процесу горіння вугілля у топці котла. Було побудовано комп'ютерну модель газового тракту котла ТПП-312 та проведено чисельне моделювання процесу горіння вугілля [5]. Задача розв'язувалася у тримірній поста-

новці. Для замкнення рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася RNG k- ϵ модель турбулентності. Радіаційний теплообмін враховувався за допомогою моделі Discrete Transfer. Транспорт часток вугілля розраховувався за допомогою метода Лагранжа.

Розрахунок виконаний для двох основних режимів експлуатації котла: з усіма працюючими кільцевими каналами та з попарним відключенням двох крайніх пальників верхнього ярусу.

У першому випадку навантаження складало 280 МВт_е, в другому – 210 МВт_е. Було визначено вплив фактора закрутки вторинного повітря на термогазодинаміку вогневого простору для цих режимів. Для захисту зупинених пальників від термічної руйнації при навантаженні 210 МВт_е у вторинний тракт подається повітря, приблизно 10 % від робочого значення. Подача повітря в тракт аеросуміші не відключається. Сумарний надлишок повітря становить 1,22. Результати розрахунку поля температури всередині топки для режиму навантаження 280 МВт_е наведені на рис.2.

Розрахунки для навантаження 210 МВт_е показали, що при попарному відключенні двох крайніх пальників верхнього ярусу температурне поле в районі першого ярусу майже не змінюється. Зміни температурного поля спостерігаються лише в районі крайніх пальників другого ярусу, тому для них було проведено окремий розрахунок. Отримані температурні поля були використані для завдання граничних умов при дослідженні впливу радіаційного теплообміну на температурний стан лопатей завихрювача вторинного повітря.

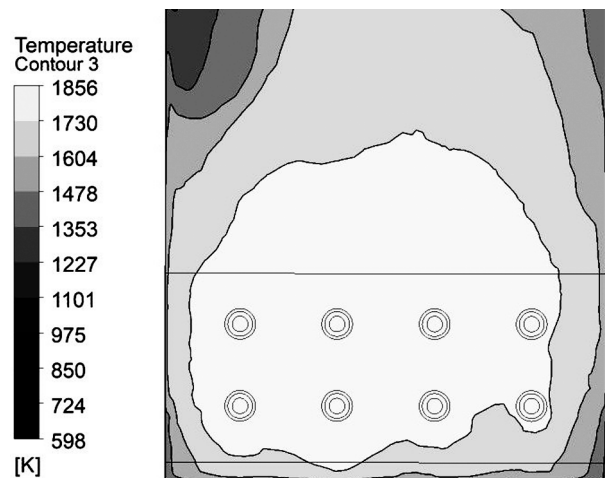


Рис.2. Температурне поле на середині глибини топки (280 МВт_е).

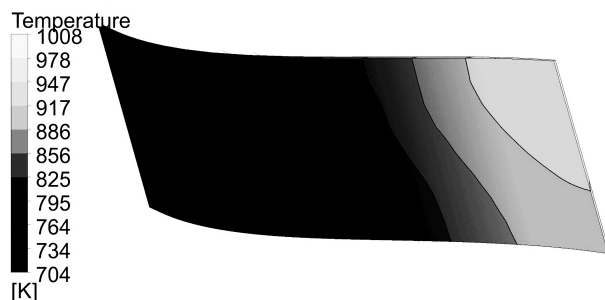


Рис.3. Температурний стан лопатки завихрювача робочого пальника з 8 лопатками.

На третьому етапі проводилося визначення температурного стану лопаток завихрювача вторинного повітря. У програмному середовищі Ansys CFX була побудована та досліджена детальна комп'ютерна модель пальника з частиною топкового простору. Розрахункова модель містила дві розрахункові підобласті.

Перша підобласть була рідиною та являла собою всі тракти руху повітря у пальнику та у частині топкового простору. Теплофізичні властивості цієї підобласті відповідали повітрю за законом ідеального газу.

Друга підобласть була представлена у вигляді твердого тіла та мала теплофізичні властивості сталі. Ці дві підобласті були з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті. Радіаційний теплообмін розраховувався за допомогою моделі Discrete Transfer, гідродинаміка розраховувалася з використанням RNG k-ε моделі турбулентності, температурний стан визначався за допомогою двох рівнянь енергії: для рідинної та твердої підобластей.

На рис.3 показано температурний стан лопатки для працюючого пальника. Як і слід було очікувати, максимальне значення температури поверхні має місце на кінці лопатки. У таблиці наведені значення максимальної температури поверхні лопатки для робочого та відключеного режимів та для варіантів завихрювача з 8 та 24 лопатками. Із розрахованих ва-

Значення максимальної температури лопаток завихрювача

Кількість лопаток завихрювача	Режим	Максимальна температура, К
8	в роботі	1008
8	відключений	1063
24	в роботі	957
24	відключений	1023

ріантів максимальна температура має місце для завихрювача з 8 лопатками для режиму, коли пальник відключений.

Розрахунок окислення лопатки завихрювача вторинного потоку

Для середньостатистичного навантаження базового блоку приблизний термін річної роботи котла складає 6000 год, з них 2000 год на пониженому навантаженні. Розрахунок динаміки окислювання матеріалу проводився для максимальних температур, зазначених у таблиці. При розрахунку «виїдання» чистого металу будемо вважати, що шар окалини складається з гематиту (Fe_2O_3). Тоді частка заліза у прирості маси окалини становить 70 %. Виходячи з цього, за допомогою рівнянь (1), (2) було проведено розрахунки стоншення кінцевої частини лопатки завихрювача зі Ст. 3 та Ст. 20 для режимів, вказаних у таблиці. Результати розрахунку для варіантів з 8 та 24 лопатками наведено на рис.4.

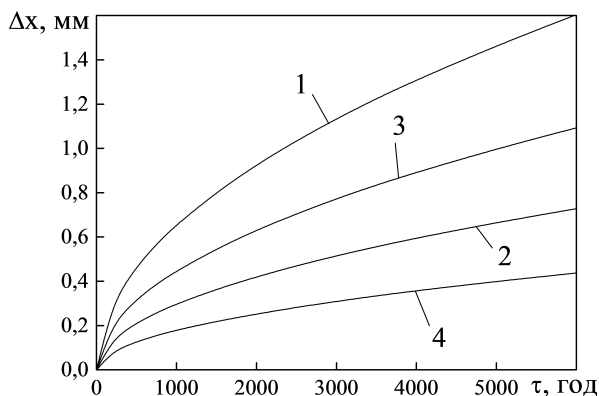


Рис.4. Часова динаміка зменшення товщини основного матеріалу лопатки завихрювача зі сталі Ст 3 (1, 3) та Ст. 20 (2, 4): 1, 2 – 8 лопаток, $T = 1008 \text{ K}$, 3, 4 – 24 лопатки, $T = 957 \text{ K}$.

Як видно з рис.4, збільшення кількості лопаток з 8 до 24 зменшує корозію лопаток на 50–70 % внаслідок зменшення температури поверхні за рахунок поліпшення умов тепловіддачі в міжлопаткових каналах. Заміна матеріалу Ст3 на сталь 20 зменшує корозію у 2,5 рази. Розрахунки також показали, що при виключенні лопатки з роботи температура її поверхні зростає, а корозія пришвидшується у 1,45–1,65 рази. У цілому можна відмітити, що за рік експлуатації корозія є порівняною з товщиною матеріалу.

Висновки

Проведено чисельне дослідження високо-температурної корозії сталевих лопаток завихрювача пилоугільного пальника котла ТПП-312 у реальних умовах його експлуатації. Розрахунки проводилися на базі результатів комп'ютерного моделювання горіння пилоугільної аеросуміші в об'ємі котла з подальшим визначенням поля температур на поверхні лопатки. Динаміка корозії визначалася за допомогою експериментальних констант окислення сталі, наведених у літературних джерелах. Отримано дані для двох видів низьковуглецевої сталі та різних режимів експлуатації пальників. Розрахунки показали, що найбільший вплив на процес окислення має матеріал лопатки: заміна Ст3 на сталь 20 дає можливість зменшити швидкість корозії у 2,5 рази. Суттєве, на 50–70 %, уповільнення корозії досягається за рахунок збільшення кількості лопаток з 8 до 24 % внаслідок зменшення температури поверхні за рахунок поліпшення умов тепловіддачі у міжлопаткових каналах.

Робота виконувалася при підтримці Національної академії наук України, проект Р5.9 цільової програми наукових досліджень «На-

дійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2).

Список літератури

1. Chen R.Y., Yuen W.Y.D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. *Oxidation of Metals*. 2003. Vol. 59, No. 5/6. P. 433–468.
2. Trindade V.B., Borin R., Hanjari B.Z. Yanga S., Kruppa U., Christa H-J. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2.25Cr1Mo. *Materials Research*. 2005. Vol. 8, No. 4. P. 365–369.
3. Темлянцев Н.В. Повышение качества толстолистового проката на основе применения рациональных режимов нагрева стали в печах и деформационного окалинудаления : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2007. 23 с.
4. Отс А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 272 с.
5. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС. *Вісник НТУУ ХПІ. Серія: Енергетичні та тепло-технічні процеси й устаткування*. 2014. № 13. С. 85–91.

Надійшла до редакції 11.10.19

Кобзарь С.Г., канд. техн. наук, **Борисов И.И.**, канд. техн. наук,
Халатов А.А., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.
Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев
ул. Марии Капитист, 2а, 03057 Киев, Украина e-mail: sergiykobzar@gmail.com

Моделирование коррозии лопаток завихрителя горелки котла ТПП-312

Выполнен расчет скорости коррозии стальных лопаток завихрителя пылеугольной горелки котла ТПП-312 в реальных условиях его эксплуатации. В качестве материала использована сталь Ст3 и сталь 20. На первом этапе проводилось компьютерное моделирование термогазодинамики потоков в горелке, процесса горения угля в топке котла с целью определения температурного состояния лопаток. На втором этапе с использованием экспериментальных констант гетерогенной реакции окисления выполнены расчеты увеличения массы материала лопатки на единицу поверхности и уменьшения толщины основного материала. Получены данные по динамике окисления поверхности лопаток для разных режимов эксплуатации горелок. Расчеты показали, что на процесс окисления влияет материал лопаток, их количество, а также режим работы горелки. Полученные результаты позволяют проводить обоснованную оценку ресурса работы лопаток горелочного устройства. *Библ. 5, рис. 4, табл. 1.*

Ключевые слова: горелка пылеугольного котла, лопатки завихрителя, коррозия, динамика утонения основного материала.

Kobzar S.G., Candidate of Technical Sciences,
Borysov I.I., Candidate of Technical Sciences,
Khalatov A.A., Academician of NAS of Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences
of Ukraine, Kyiv**

2a, Marii Kapnist Str., 03057 Kyiv, Ukraine e-mail: sergiykobzar@gmail.com

Modelling of Corrosion of the Burner Swirling Blades of the Boiler TPP-312

The corrosion rate was calculated for steel blades of a swirler of a dust coal burner of the boiler TPP-312 in real conditions of its operation. The material used is steel 3 and steel 20. At the first stage, computer modelling of the thermogas dynamics of the flow in the burner, the process of coal burning in the boiler furnace, was carried out with the aim of determining the temperature state of the blades. At the second stage, using the experimental constants of the heterogeneous oxidation reaction, the calculations of the increase in the mass of the blade material per unit surface and the decrease in the thickness of the base material were carried out. The data obtained on the dynamics of oxidation of the surface of the blades for different operating modes of the burners. Calculations showed that the oxidation process is affected by the type of material of the blade, the number of blades, as well as the mode of operation of the burner. The obtained results allow a reasonable assessment of the service life of the burner blades. *Bibl. 5, Fig. 4, Tab. 1.*

Key words: burner of dust coal boiler; swirl blades; corrosion; base material thinning dynamics.

References

1. Chen R.Y., Yuen W.Y.D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. *Oxidation of Metals*. 2003. 59 (5/6). pp. 433–468.
2. Trindade V.B., Borin R., Hanjari B.Z., Yanga S., Kruppa U., Christa H-J. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2.25Cr1Mo. *Materials Research*. 2005. 8 (4). pp. 365–369.
3. Temliantsev N.V. [Improving the quality of steel plates through the use of rational modes of steel heating in furnaces and deformation scale removal. Autoreferat]. Novokuznetsk, 2007. 23 p. (Rus.)
4. Ots A.A. [Corrosion and wear of heating surfaces of boilers], Moscow : Energoatomizdat, 1987. 272 p. (Rus.)
5. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [Determining the efficiency of the reduction of nitrogen oxide emissions using the system of stage coal combustion of the TPP-312 boiler block No. 6 DTEK of Ladyzhin Thermal Power Station]. *Visnyk NTU KhPI. Ser.: Energetychni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja [NTU KhPI. Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment]*, 2014, No. 13. pp. 85–91. (Ukr.)

Received October 11, 2019