

УДК 622.741

ДЕФЕКТИ ВОГНЕТРИВКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПАЛЮВАЛЬНИХ ПРОСТІНКІВ КОКСОВИХ ТА ПЕКОКОКСОВИХ ПЕЧЕЙ

Топоров А.А., Боровльов В.М., Трет'яков П.В.

Донецький національний технічний університет, м. Покровськ, Україна

Анотація. Коксові та пекококові батареї є дорогими агрегатами та є основним обладнанням коксохімічних виробництв, то подовження їх ресурсу є актуальною задачею. Внаслідок важких умов експлуатації неминуче змінюється технічний стан цих печей, що пов'язано з процесами руйнування вогнетривких елементів. Тому дослідження процесів руйнування вогнетривких елементів опалювальних простінків коксових та пекокококових печей є актуальною задачею. В статті розглянуто розвиток дефектів вогнетривких елементів обігрівальних простінків коксових та пекокококових печей. Розроблені основні структурні схеми зміни стану об'єкту руйнування під час експлуатації. Для математичного опису зміни стану об'єкту руйнування запропоновано використати модель на базі теорії ланцюгів Маркова, яка дозволяє оцінити ймовірність відмови як окремого вогнетривкого елемента так і обігрівального простінку та коксової печі в загалом.

Ключові слова: піч коксова, елемент вогнетривкий, дефект; ймовірність відмови

Умови експлуатації обігрівальних простінків відрізняються температурними перепадами 300...1100 °С, механічними навантаженнями від завантаження сировини для коксування, тиску від розпирання під час коксування, тиску з боку виштовхувальної штанги коксовиштовхувача, впливу заграфічування та розграфічування, засмолення поверхні [1]. Структура вогнетриву має досить неоднорідний характер. Кварцеві матеріали, які містять 95...97% SiO₂ та невелику кількість домішок. З'єднання елементів матеріалу виникає під час випалу під час виготовлення та введення в експлуатацію, тобто розігріванням згідно регламенту. Під час випалу та експлуатації в зоні високих температур для динасових вогнетривів протікає процес тримітизації від 60 до 75 % кварца перетворюється в наступну модифікацію кремнезему - триміт та його алотропічні форми. З'єднання окремих мікроелементів модифікацій кремнезему відбувається неоднорідно, тому ще до початку експлуатації виникає пориста структура з мікропорами, мікрОВИРАЗКАМИ, мікРОТРИЩИНАМИ.

Було проведено попереднє дослідження мікроструктури поверхні вогнетривів. На фотографіях з SEM мікроскопу видно характерну пористу структуру вогнетриву (рис. 1). Характерний розмір порожнин складає приблизно 50...100 мкм, а пор приблизно 10 мкм.

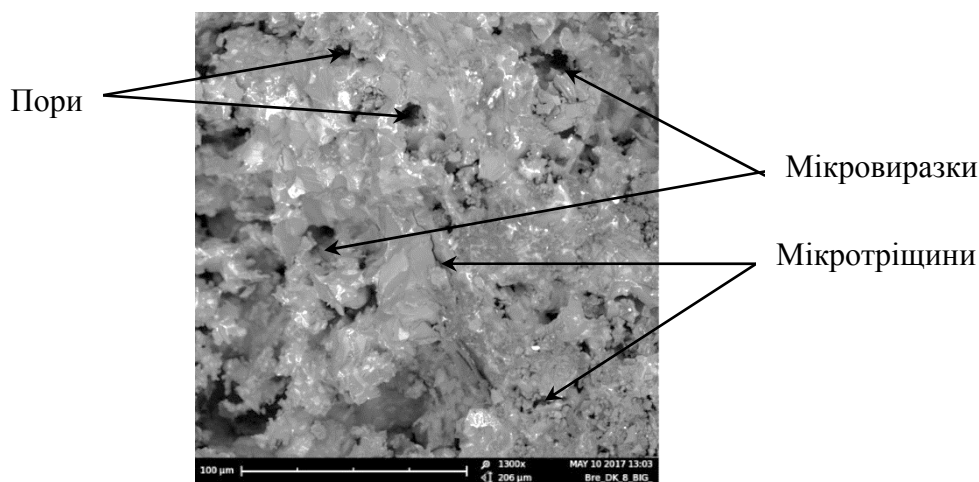


Рис. 1 – Поверхня вогнетриву з мікроефектами

Аналіз виникнення та розвитку дефектів вогнетривів коксових та пекокококових печей показує, що вони розвиваються майже за однаковою схемою. На мікрорівні знаходиться

певна початкова кількість дефектів, які виникли під час виготовлення, транспортування, монтажу, введення в експлуатацію печей.

Під час експлуатації відбувається поступове накопичення мікродефектів та перехід з мікрорівня до макрорівня. Мікродефекти – це дефекти, які не помітні неозброєним оком. Макродефекти – дефекти, які можна побачити неозброєним оком та піддаються фіксації. Кумулятивний ефект накопичення дефектів присутній як на мікрорівні так і на макрорівні, але призводить до різних наслідків.

Накопичення дефектів на мікрорівні призводить до погіршення структури вогнетриву обігрівального простінка, зміни фізико-хімічних властивостей: вогнетривкості, термостійкості, теплопровідності, газопроникності, зниженні межі міцності при стисненні, збільшенні деформації під навантаженням при робочих температурах. Відбувається поступове насичення пустих порожнин вогнетриву вуглецем, який поступово руйнує цілісність структури вогнетриву.

Згідно рисунка 2 дефект при розвитку проходить декілька стадій від мікродефектів до наскрізного макродефекту, який призводить до відмови як вогнетриву так і обігрівального простінку в загалом. Під груповим мікродефектом приймається до 3-10 мікродефектів, які розташовані поряд. В подальшому розвитку груповий мікродефект може перейти або в мікротріщину або в мікровиразку. Під мікротріщиною приймається мікродефекти, які розташовані вздовж лінії та характеризуються таким параметром як довжина. Мікровиразка – групове скупчення мікродефектів або по площі поверхні або в об'ємі вогнетриву, та характеризується площею або, відповідно, об'ємом.

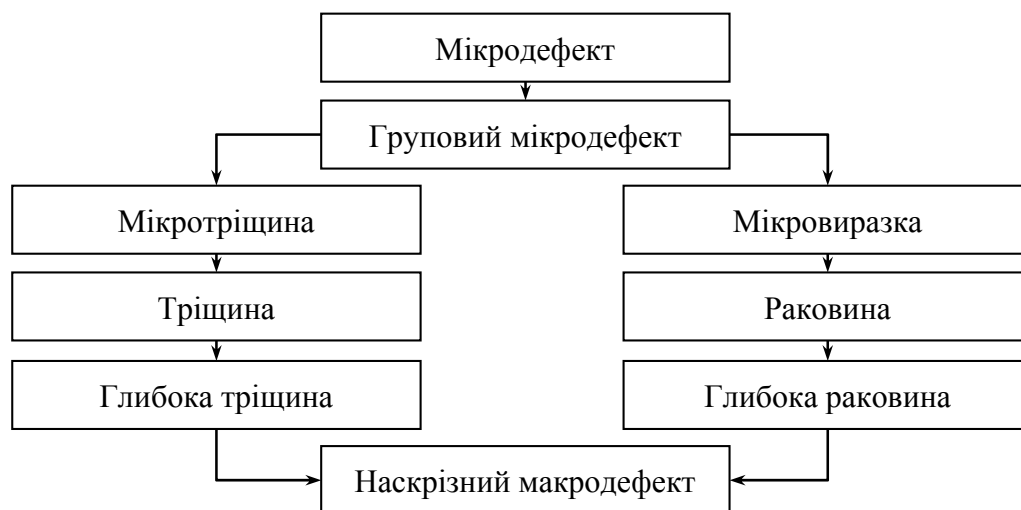


Рис. 2 – Схема розвитку дефекту

Зміна технічного стану окремого вогнетриву також проходить декілька стадій. На першій стадії виникають окремі, незалежні один від одного дефекти (рис. 3). В подальшому мікродефекти можуть розвинути в мікротріщини (тріщини), сітку тріщин, та призвести до вищерблювання і в результаті до виникнення результуючої події – наскрізного макродефекту. У випадку поверхневого мікродефекту він розвивається у виразку, та збільшення їх кількості призводить до ерозії, та далі до раковини. Під час виникнення раковин зростає ймовірність виникнення результуючої події – виникнення наскрізного макродефекту.

Аналогічно окремого вогнетриву змінюється технічний стан обігрівуючого простінку (рис. 4). Розглянемо випадок, коли окремих вогнетривкий елемент руйнується внаслідок розвинення тріщини. За першою можливою послідовністю тріщини виникають спочатку на двох сусідніх вогнетривах, потім розвиваються до тріщини простінку, що приводить до результуючої події – розриву простінку. За другою можливою послідовністю тріщини виникають спочатку на двох НЕ сусідніх вогнетривах, потім на декількох НЕ сусідніх

вогнетривах. Між такими вогнетривами виникає деформація простінку, що приводить до результуючої події – розриву та провалу простінку.

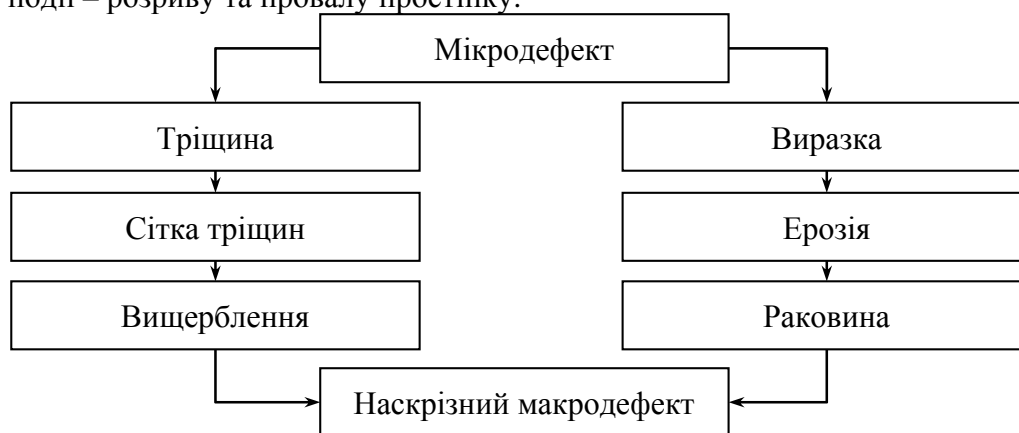


Рис. 3 – Схема розвитку дефектів окремого вогнетриву

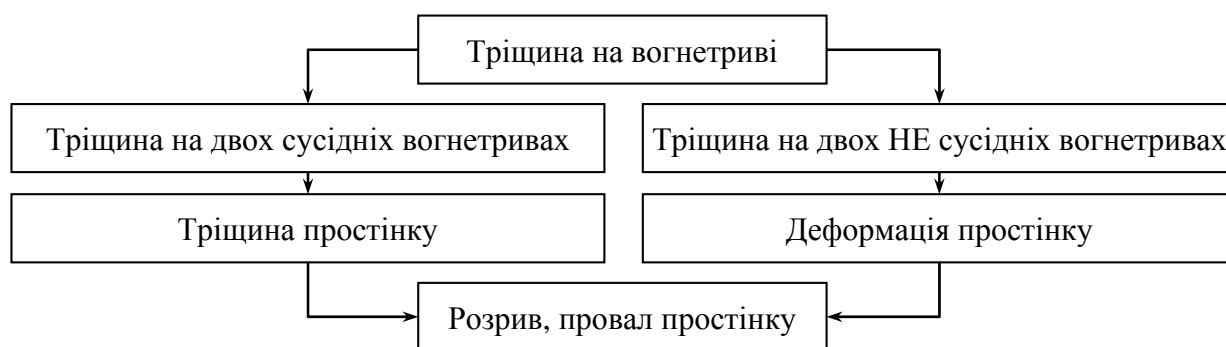


Рис. 4 – Схема розвитку дефектів обігрівальних простінків

Для схем, що наведено вище, найбільш відповідною сутності процесу розвитку дефектів є теорія кінцевих ланцюгів Маркова [2] в додатку до процесу накопичення пошкоджень [3]. Назвемо дефект, вогнетривкий елемент та простінок, стан яких змінюється, об'єктом руйнування. Досліджуваний процес будемо розглядати наступним чином: об'єктом руйнування циклічно піддається впливу високих температур і механічних навантажень. Під час циклів навантаження (ЦН) відбувається незворотні зміни його параметрів. Збільшення їх кількості та значень параметрів відбувається до критичних величин або відмови об'єкта руйнування.

Об'єкт руйнування в процесі експлуатації може бути в одному з станів пошкодження, що характеризується ступенем пошкодження a (кількість і/або величина дефектів). Стан пошкодження дискретний: $J = 1, 2, \dots, j, \dots, Z$. Відповідно кількісний параметр ступеню пошкодження $a = a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_Z$. При досягненні стану Z виникає відмова об'єкту руйнування. Зміна кількісних параметрів пошкодження, що виникає всередині ЦН не розглядаємо.

Оскільки процес зміни стану об'єкту руйнування неспадний, то його стан пошкодження не може переходити в будь-який з попередніх станів. Об'єкт руйнування за ЦН може або не змінити свій стан, або набути наступного стану пошкодження.

Графічна інтерпретація зміни стану пошкодження об'єкту руйнування представлена на рисунку 5.

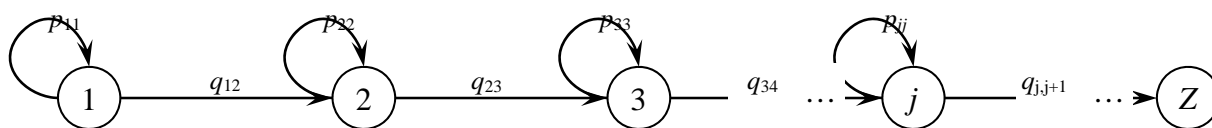


Рис. 5 – Граф зміни стану пошкодження об'єкту руйнування

Графу зміни стану пошкодження об'єкту руйнування відповідає матриця перехідних ймовірностей:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & q_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & q_{23} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & q_{34} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & p_{Z-1,Z-1} & q_{Z-1,Z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

де p_{jj} – ймовірність того, що об'єкт руйнування залишається в стані j , $0 < p_{jj} < 1$; $q_{j,j+1}$ – ймовірність переходу стану пошкодження об'єкту руйнування в наступний стан. $p_{jj} + q_{j,j+1} = 1$.

Зв'язок між часом досягнення об'єктом руйнування будь-якого стану пошкодження та матрицею перехідних ймовірностей виражається через характеристичну функцію.

$$\begin{aligned} \Phi_W(y; 1, Z) &= \frac{q_{12}q_{23} \dots q_{Z-1,Z}}{(1-p_{11}y) \dots (1-p_{Z-1,Z-1}y)} \cdot y^{Z-1} + \\ &+ \left\{ \frac{q_{13}q_{34} \dots q_{Z-1,Z}}{(1-p_{11}y)(1-p_{33}y) \dots (1-p_{Z-1,Z-1}y)} \cdot y^{Z-2} + \text{подібні члени (в кількості } \binom{Z-2}{1} - 1) \right\} + \\ &+ \left\{ \frac{q_{14}q_{45} \dots q_{Z-1,Z}}{(1-p_{11}y)(1-p_{44}y) \dots (1-p_{Z-1,Z-1}y)} \cdot y^{Z-3} + \text{подібні члени (в кількості } \binom{Z-2}{2} - 1) \right\} + \\ &+ \dots + \\ &+ \left\{ \frac{q_{1,Z-1}q_{Z-1,Z}}{(1-p_{1,Z-1}y)(1-p_{Z-1,Z-1}y)} \cdot y^2 + \text{подібні члени (в кількості } \binom{Z-2}{Z-3} - 1) \right\} + \frac{q_{1,Z}}{(1-p_{11}y)} \cdot y. \end{aligned}$$

Математичне очікування M часу досягнення об'єктом руйнування стану відмови $W_{1,Z}$ є першою похідною характеристичної функції:

$$M\{W_{1,Z}\} = \left. \frac{d\Phi_W}{dy} \right|_{y=1}.$$

Дисперсія σ часу досягнення об'єктом руйнування стану відмови $W_{1,Z}$:

$$\sigma\{W_{1,Z}\} = \left. \frac{d^2\Phi_W}{dy^2} \right|_{y=1} + \left. \frac{d\Phi_W}{dy} \right|_{y=1} - \left[\left. \frac{d\Phi_W}{dy} \right|_{y=1} \right]^2, \quad M\{W_{1,Z}^2\} - M\{W_{1,Z}\} = \left. \frac{d^2\Phi_W}{dy^2} \right|_{y=1}.$$

Диференціюючи характеристичну функції отримуємо математичне очікування і дисперсію:

$$M\{W_{1,Z}\} = \sum_{j=1}^{Z-1} (1 + r_{jj}), \quad \sigma\{W_{1,Z}\} = \sum_{j=1}^{Z-1} r_{jj}(1 + r_{jj}), \quad r_{jj} = p_{jj}/q_{j,j+1}.$$

Для визначення r_{jj} та j використовуємо метод моментів, згідно якого значення математичного очікування $M\{W_{1,j}\}$ і дисперсії $\sigma\{W_{1,j}\}$ отримуємо з статистичного аналізу зміни якого стану пошкодження об'єкту руйнування під час експлуатації. Виконавши підстановки визначаємо p_{jj} і $q_{j,j+1}$ матриці перехідних ймовірностей та ймовірність відмови об'єкту руйнування.

Список літератури:

1. Парфенюк А.С. О разрушении кладки коксовых батарей из крупных огнеупорных бетонных блоков и традиционных динасовых огнеупоров // Парфенюк А.С., Третьяков П.В., Костина Е.Д. Кокс и химия. – 2004. – № 8. – С. 14-19.
2. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения = An introduction to probability theory and its applications: Пер. с англ. Ю. В. Прохорова. – М. : Мир, 1984. Т. 2. – 751 с.
3. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. – М.: Мир, 1989. – 344 с.