

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 666.76.1: 539.217.1: 539.376

О.Ю. Гусєв, канд. фіз.-мат. наук,
Ю.П. Рибальченко

Державний вищий навчальний заклад „Національний
гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: gusev@metrology.dp.ua

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПОВЗУЧОСТІ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ В ПЕРІОД ЗАДУВАННЯ

O.Yu. Husiev, Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Yu.P. Rybalchenko

State Higher Educational Institution "National Mining University",
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: gusev@metrology.dp.ua

EVALUATION OF THE PARAMETERS OF BLAST FURNACE LINING CREEPING PROCESS DURING THE FIRST BLOW

Розроблено модифіковану методику розрахунку характеристик фізико-хімічних процесів футеровочних матеріалів, які використовуються в доменних печах. Виконано розрахунки високотемпературної деформації під навантаженням і оцінка повзучості оксидної вогнетривкої кераміки. Показано, що методика розрахунку при першій задувці доменної печі залежить від механізму деформації, який виявляється при високій температурі та напрузі, а також від загальної пористості, форми і розмірів пор, зернового складу, неврахування яких призводить до значної похибки вимірів температури футеровки горна.

Ключові слова: футеровка, деформація, повзучість, доменна піч, кераміка

Вступ. При експлуатації доменної печі намагаються вирішити завдання підвищення безпеки роботи технічного персоналу та експлуатаційної надійності, збільшення тривалості терміну служби технологічного агрегату. Повною мірою це відноситься й до пуску доменної печі, тобто періоду задування, який значно обумовлює багаторічну роботу печі в подальшому. Саме для забезпечення зазначених характеристик технологічні об'єкти управління оснащуються сучасними інформаційно-вимірювальними системами, системами діагностики стану як окремих елементів доменної печі, так і всього об'єкту управління в цілому.

Теоретичні дослідження різних режимів доменного процесу і розробка методів практичного управління вказаним процесом за останні роки отримали значний розвиток. Проте залишаються ще нерозв'язані проблеми, що мають велике наукове і практичне значення для доменного виробництва. До таких проблем, зокрема, відноситься оцінка параметрів процесу повзучості вогнетривкої футеровки в режимі задувки доменних печей [1].

Постановка завдання. Для вирішення поставленої проблеми необхідно на підставі експериментальних даних встановити характерні особливості проце-

су повзучості вогнетривкої футеровки. Розробити адекватну математичну модель та методику розрахунку характеристик процесу повзучості.

Мета роботи. Розробка інформаційної технології оцінки параметрів процесу повзучості, що дозволяє визначити еволюцію в часі структури футеровки на основі Al_2O_3 , та її деформацію при нагріванні під навантаженням, з метою забезпечення нормального теплового режиму роботи доменної печі в період задування.

Виклад основного матеріалу. Характерним для періоду задування доменної печі є формування температурно-теплового поля горна в умовах інтенсифікації масообмінних процесів у горні. Контроль теплового стану футеровки горна доменної печі здійснюється за даними, отриманими за допомогою термодатчиків, встановлених у блоки вогнетривкої кладки горна. На підставі експериментальних даних, отриманих у період задування доменної печі ДП- 7 Шоагуанського меткомбінату (Китай), було встановлено, що за перший місяць кампанії печі на п'ятому горизонті сталася істотна (приблизно до 20%) зміна температури [1].

Значення температур знімалися з термопар, вмонтованих у вогнетривку футеровку горна, виконаного з корундових цеглин з хімічним складом Al_2O_3 , - 82%, Fe_2O_3 - 1%, SiC - 9%. Перший нагрів до 998 °С здійснювався при початковому мінімальному наван-

таженні (був відсутній розплавлений чавун) з плавною появою розплавленої маси, призвів до збільшення тиску на лещадь доменної печі до 5 МПа.

Температура робочої поверхні футеровки, де відбувається зіткнення рідкої фази з твердою, складає величину близько 1350 °С. Характерним є те, що при появі рідкої фази (рідкого чавуну і шлаку) починається хімічна взаємодія рідких продуктів плавки з вогнетривкою футеровкою.

При вказаних значеннях температури і навантаження відбувається розм'якшення вогнетривів, що призводить до осідання та деформації і може викликати обвалення. Тому деформація футеровочних матеріалів під навантаженням при високих температурах визначає їх здатність протистояти одночасній дії високих температур та стискуючого навантаження, і є одним з важливих показників вогнетривких матеріалів.

Температурну залежність, наведену в [1], можна пояснити тільки фазовими перетвореннями у вогнетриві. Повзучість виникає внаслідок фазових перетворень, що обумовлюють структурні зміни, пов'язані з протіканням реакцій на межі „футеровка-рідкі продукти плавки“ і переходом в іншу кристобалітну форму. Протікання реакції пов'язане з процесами дифузії через поверхневий шар футеровки. Таким чином відбувається формування нової структури і властивостей матеріалу футеровки, причому, ця структура і її властивості, в основному, залежать від процесу усадки. Усю складну послідовність процесів, що відбуваються при усадці, можна пояснити тим, що при температурі чавуну 1350 °С, який змочує футеровку доменної печі, починається процес стягування пор великих розмірів основної фази (рис.1), внаслідок чого формується якісна, щільна структура, в якій, переважно, залишаються лише замкнуті ізольовані пори, а ущільнення матеріалу футеровки є наслідком зменшення числа і загального об'єму ізольованих одна від однієї пор.

З рис.1 видно, що зменшення загальної пористості (приблизно на 8% від відкритої пористості) призводить до істотної зміни теплопровідності футеровки.

Залежність коефіцієнта теплопровідності λ від температури в часі зображена на рис.2, де є добре помітний вплив „робочої усадки“ футеровки в інтервалі температур 760...940 °С. Після виходу доменної печі на робочий режим роботи відбувається вирівнювання коефіцієнтів теплопровідності системи.

Необхідно відмітити, що зі зменшенням пористості за рахунок усадки на порівняно короткому, тимчасовому проміжку відбувається істотне збільшення коефіцієнта теплопровідності, яке для цих тимчасових процесів можна розглядати як стрибкоподібне (рис.2, часовий інтервал 11.09...14.09). При $T=750$ °С пористість для усієї системи складає приблизно 24% (для вогнетривкої цегли марки ZSG), при 950 °С пористість становить близько 22%. Таким чином, дуже невелика зміна пористості (близько 2%) викликає зміну коефіцієнта теплопровідності на 0,431 (Вт/м·К), що, у свою чергу, обумовлює істотну зміну температури футеровки (близько 27%).

Досвід роботи [2] показує, що доменна піч виходить на робочий режим через 25–30 днів з моменту початку задування. У нашому випадку процес повзучості почався через 13 днів. Це дає підставу припустити, що процес початку „робочої усадки“ випереджає початок робочого режиму та розповсюдити це припущення на процес задування всіх доменних печей. Після завершення процесу „робочої усадки“ наступні зупинки печей на ремонт і їх задування на теплопровідність не впливають (за умови, якщо ремонт не пов'язаний із заміною футеровочних блоків горна), що пояснюється безповоротністю фазових процесів.

Згідно з експериментальними даними, отриманими при задуванні доменної печі ДП-7 Шоуганьського меткомбінату, оцінку деформації і повзучості можна виконати за допомогою рівнянь, запропонованих в [1], а за величиною повзучості ε визначити величину деформації за заданий інтервал часу, використовуючи рівняння

$$\varepsilon(\%) = M\Phi^\alpha \exp\left[\frac{-\alpha Q}{RT}\right], \quad (1)$$

де α і M – безрозмірні постійні, причому, M не залежить від температури і напруги; Φ – комбінований аргумент ($\text{Па}^2 \cdot \text{ч}$); Q – ефективна енергія активації деформації (кДж/моль); R – універсальна газова постійна; T – абсолютна температура. У (1) спеціальний аргумент Φ має вигляд

$$\Phi = \int_0^\tau \sigma^2 d\tau = \sigma^2 \tau, \quad (2)$$

де σ – напруга, τ – час.

Запишемо рівняння (1) в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \ln \varepsilon &= \ln M + \alpha \ln \Phi - \alpha Q/RT = \\ &= \alpha \ln \Phi - \alpha Q/RT + \ln M \end{aligned} \quad (3)$$

Підставивши в рівняння (3) аргумент (2), отримаємо

$$\ln \varepsilon = 2\alpha \ln \sigma + \alpha \ln \tau + \ln M - \alpha Q/RT. \quad (4)$$

Введемо позначення

$$C = \ln M - \alpha Q/RT \quad (5)$$

з рівняння (4) і отримаємо, що

$$C = \ln \varepsilon - 2\alpha \ln \sigma - \alpha \ln \tau. \quad (6)$$

Енергія активації повзучості вогнетривів на основі Al_2O_3 залежить від температурної обробки зразків: зі збільшенням температури випалення і витримки при максимальній температурі енергія активації процесу може змінюватися в діапазоні 200...500 кДж/моль [3]. Значення енергії активації для вогнетривів футеровки на основі Al_2O_3 прийемо таким, що дорівнює 234 кДж/моль, при напрузі 10^5 Па [3]

$$Q_{\sigma=10^5 \text{ Па}} = R / \alpha \ln \varepsilon / (1/T_2 - 1/T_1) = 234.$$

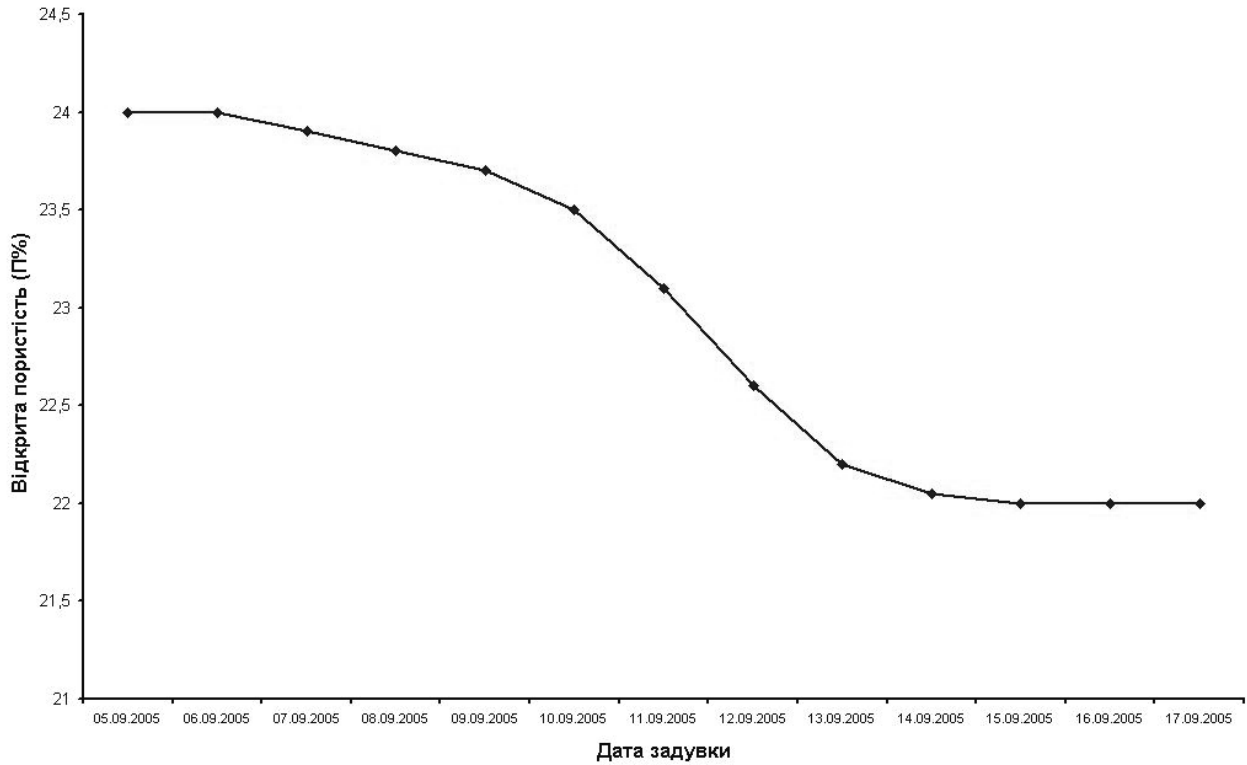


Рис.1. Зміни пористості футеровки горна доменної печі в процесі усадки

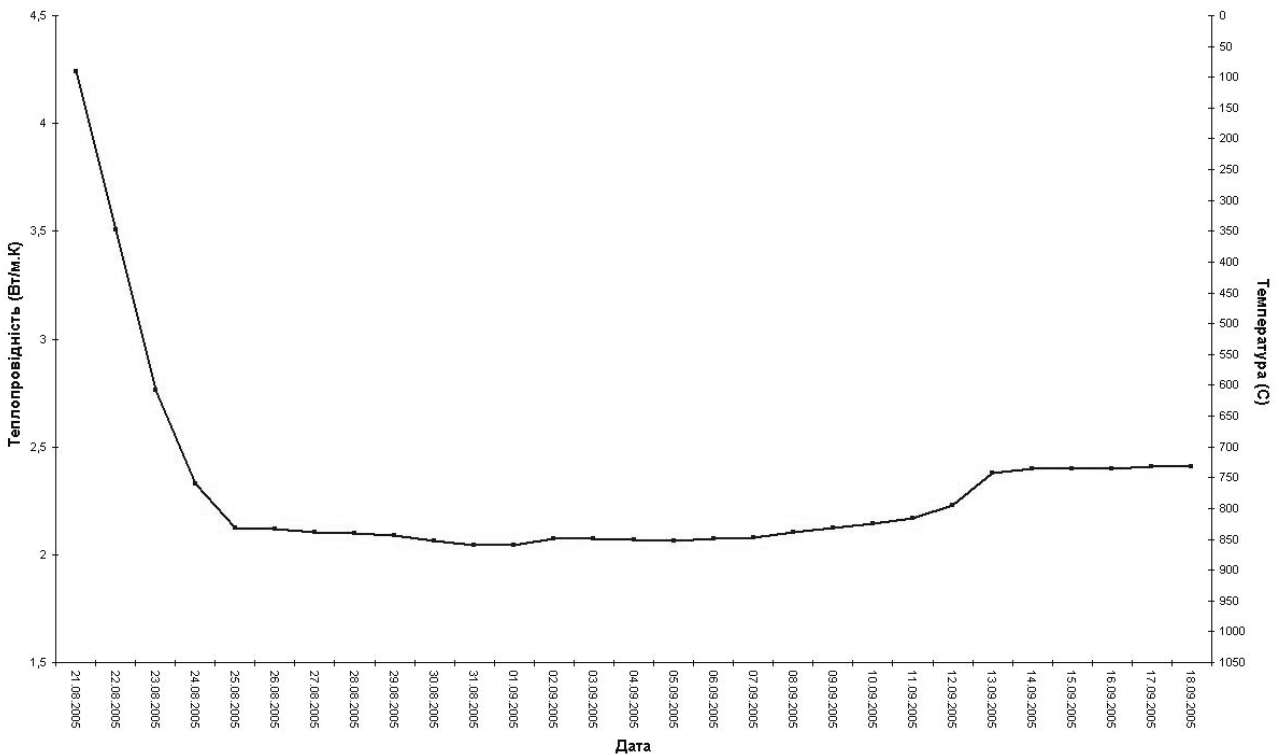


Рис.2. Зміна коефіцієнта теплопровідності вогнетривкої кладки

З експериментальних даних [4] можна визначити величину α , яка складає при температурі 1300 °С

$$\alpha_{1300} = \ln \varepsilon / \ln \Phi = 0,16.$$

Підставивши в (6) отримане значення Q , α , а також експериментальне значення ε (у %) і конкретне значення $\tau = 312$ год. при напрузі 5 МПа (тиск розплавленого чавуну на футеровку доменної печі) з даних [1], знаходимо

$$C_{1300(\sigma=5\text{МПа})} = \ln \varepsilon - 2\alpha \ln \sigma - \alpha \ln \tau = -1,42 .$$

Тоді

$$\ln \varepsilon_{1300} = 0,32 \ln \sigma + 0,16 \ln \tau - 1,42 . \quad (7)$$

У цих рівняннях σ виражається в МПа; τ – в годинах, межі зміни σ від 0,1 до 5 МПа; ε – деформація стискування в %.

За допомогою формули (7) виконаний розрахунок часу деформації (год) футеровки на 1% під навантаженнями 5 МПа при температурі 1300 °С, результати якого співпадають з експериментальними даними, одержаними при першому задуванні доменної печі.

Слід зазначити, що отримане рівняння вигляду

$$\ln \varepsilon_{1300} = 0,32 \ln \sigma + 0,16 \ln \tau - 1,42$$

дозволяє встановити час деформації футеровочних матеріалів під впливом навантаження при різних температурах і, таким чином, оцінити міру первинної робочої усадки і тривалість служби вогнетривкої футеровки горна доменної печі.

Отже, можна зробити висновок, що залежно від температури, напруги і тривалості задування доменної печі „робоча усадка“ має різний характер. Найбільш суттєвим є те, що „робоча усадка“ вогнетривкої футеровки при першому задуванні доменної печі настає при будь-якій нарузі. Величина напруги впливає тільки на проміжок часу, через який відбудеться усадка. Тобто, чим менше напруга, тим більший проміжок часу до початку процесу „робочої усадки“. Таким чином, конкретне значення межі міцності футеровки при першому задуванні доменної печі практично втрачає сенс і слід ввести іншу характеристику – напруга викликає „робочу усадку“ за даний період задування доменної печі.

Висновки:

1. Режим першого задування доменної печі характеризується процесом „робочої усадки“, що зумовлює зміну фазової структури вогнетривкої футеровки горна за рахунок виникнення процесу повзучості. Це приводить до зміни пористості і теплопровідності вогнетривків.

2. Неврахування змін характеристик теплопровідності внаслідок „робочої усадки“ при першому задуванні доменної печі призводить до значної похибки (близько 27%) вимірів температури футеровки горна.

Список літератури / References

1. Гусев О.Ю. Моделирование процессов повзучости футеровки доменной печи в период задувания / О.Ю. Гусев, Ю.П. Рибальченко // Научный вестник НГУ. – 2011. – № 4. – С.106–111

Husiev O.Yu. Modeling of blast furnace lining creep-ing processes during the first blow / O.Yu. Husiev,

Yu.P. Rybalchenko // Naukovyi visnyk NGU. – 2011. – No.4. – P. 106–111

2. Задувка доменної печі об'ємом 5000 м³ з применением нагрітого азота / [Бородулин А.В., Васюченко А.И., Дмитренко К.А., Костенко Г.П. и др.] // Сталь. – 2006. – №9. – С. 6–9.

Blowing of blast furnaces of 5000 m³ volume with application of heated nitrogen / [Borodulin A.V., Vasyuchenok A.I., Dmitrenko K.A., Kostenko G.P. et al.] // Stal. – 2006. – No.9. – P. 6–9.

3. Бакунов В.С. Ползучесть поликристаллической керамики из Al₂O₃ при высоких температурах / В.С. Бакунов, Д.Н. Полубояринов // Огнеупоры. – 1967. – № 1. – С. 39–46.

Bakunov V.S. Creep of polycrystalline ceramics of Al₂O₃ at high temperatures // V.S. Bakunov, D.N. Poluboyarinov // Ogneupory. – 1967. – No.1. – P. 39–46.

4. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К.К. Стрелов, И.Д. Кашеев – М.: Металлургия. 1996. – 601 с.

Strelov K.K. The theoretical foundations of the technology of refractory materials / K.K. Strelov, I.D. Kashcheyev // – М.: Metallurgiya. 1996. – 601 p.

Разработана модифицированная методика расчёта характеристик физико-химических процессов футеровочных материалов, используемых в доменных печах. Выполнены расчёты высокотемпературной деформации под нагрузкой и оценка ползучести оксидной огнеупорной керамики. Показано, что методика расчёта при первой задувке доменной печи зависит от механизма деформации, который проявляется при высокой температуре и напряжении, а также от общей пористости, формы и размеров пор, зернового состава, не учёт которых приводит к значительной погрешности измерений температуры футеровки горна.

Ключевые слова: футеровка, деформация, ползучесть, доменная печь, керамика

A modified method of calculating the characteristics of physical and chemical processes of lining material used in blast furnaces is developed. Calculations of high-temperature deformation under load and evaluation of the creep of oxide refractories are made. It is shown that the method of calculation at the first blast furnace blowing depends on the deformation mechanism, which appears at high temperature and voltage, as well as the total porosity, shape and size of pores, grain composition ignoring of which leads to significant measurement error of temperature refractory furnace.

Keywords: lining, deformation, creep flow, blast furnace, ceramics

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корнієнком. Дата надходження рукопису 01.04.2011