

КАМЕРНА ПІЧ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ У ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Губинський С.М.¹, Сибір А.В.², Федоров С.С.³, Форись О.М.¹

¹Український державний університет науки і технологій, Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна

³ Thermal & Material Engineering Center SP. Z O. O., Польща

Анотація. Існуючі лабораторні печі для високотемпературної термічної обробки матеріалів до температури 3000°C, що мають графітові нагрівачі, дозволяють нагрівати зразки з швидкістю на два порядки менші у печах з електротермічним киплячим шаром. Це унеможлиблює їх використання для досліджень термічної обробки вуглецевих матеріалів бо не відповідають умовам шокowego нагріву та не дозволяє чітко видержувати час витримки. В статі наведено дослідження використання в якості нагрівачів композитних вуглецевих матеріалів малої густини. На основі отриманих результатів створено високотемпературну камерну піч, проведено її дослідження та промодельовано температурне поле у нагрівачі. В результаті створено високотемпературну лабораторну піч з швидкістю нагріву зразків 20 °C/c – 100 °C/c що дозволило використати її для моделювати процес нагріву у печі електротермічним киплячим шаром. Порівняння витрат електроенергії в печі з традиційним нагрівачем з графіту і нагрівачем з вуглецевого композиту малої густини показало, що втрати теплоти у знижуються на 1,7- 1,8 разів.

Ключові слова: електротермічний киплячий шар, лабораторна піч, композитні вуглецеві матеріали, втрати теплоти, шоківий нагрів.

Відомі конструкції високотемпературних печей, що забезпечують термічну обробку при температурі 3000°C у атмосфері інертного газу (аргону чи азоту). Вони мають нагрівачі з графіту чи композитних вуглеграфітових матеріалів. Загальні характеристики подібних печей мають швидкості нагріву робочого простору зі досліджуваним зразком не вище 10 K/хв, що майже на два порядки менше ніж швидкість нагріву часток у електротермічному киплячому шарі (ЕКШ). Це пов'язано з інерційністю конструкції печей та стійкістю нагрівачів, які не витримують значного навантаження. Зменшення робочого простору печі теж визиває певні труднощі пов'язані з необхідністю виділення значної потужності при малих

електричних опорах нагрівачів з графіту чи композитних графітованих матеріалів. Вони мають наступні властивості [1-2]: густина – 1380-1850 кг/м³, коефіцієнт теплопровідності 15-40 Вт/мК, питомий електричний опір (40-25)*10⁻⁶ Ом*м при нормальній температурі і 15*10⁻⁶ Ом*м при температурі 2400°С. Таким чином, ці показники близькі до графіту, який має густину 2100 кг/м³, коефіцієнт теплопровідності - 70-20 Вт/мК в залежності від температури, питомий електричний опір – (12-15) *10⁻⁶ Ом*м. Отже, заміна графіту на композитний матеріал не може змінити розміри та показники напруги та струму при нагріві у високотемпературній печі та відповідно змінити її показники термічної інерційності.

Інакше виглядають вуглецеві композитні матеріали, які використовуються у високо температурних печах як теплова ізоляція. Характеристики цих матеріалів наведено у таблиці 1.

Таким чином, ці композитні матеріали мають менший питомий електричний опір і на два порядки меншу теплопровідність у порівнянні з графітом. Тобто використовуючи ці матеріали для виготовлення нагрівачів у високотемпературних печах, можливо підвищити їх товщину, що дозволить зменшити втрати теплоти з робочого підвищити їх товщину, що дозволить зменшити втрати теплоти з робочого простору печі.

Таблиця 1

Властивості вуглецевих композитних матеріалів [3].

Тип матеріалу	CBCF 14VF-2000	CBCF 18-2000	CBCF 15-2000	CBCF 25-2000
Щільність, кг/м ³	140-160	180	150	250
Питомий електричний опір, Ом*м при н.у.	12-51 *10 ⁻⁴	11 – 40 *10 ⁻⁴	25-74 *10 ⁻⁴	5,9-15,9*10 ⁻⁴
Коефіцієнт теплопровідності в середовищі аргону, Вт/мК				
500°С	0,08	0,36	0,26	0,55
1000°С	0,21	0,54	0,4	0,75
2000°С	0,76	1,16	0,98	1,38

Це також дозволить зменшити витрати енергії та зменшити струм та напругу. Для аналізу ефективності такого підходу було проведено розрахунок температурного поля печі, схему якої наведено на рисунку 1. Розглядається стаціонарний режим роботи.

Результати розрахунку перепаду температур у нагрівачі висотою 100мм при $\lambda_{\text{наг}} = 1,16$ Вт/мК наведені на рисунку 2. Отже, використання вуглецевих композитів малої густини забезпечує отримання високих температур у робочому просторі печі та значно зменшує теплові втрати.

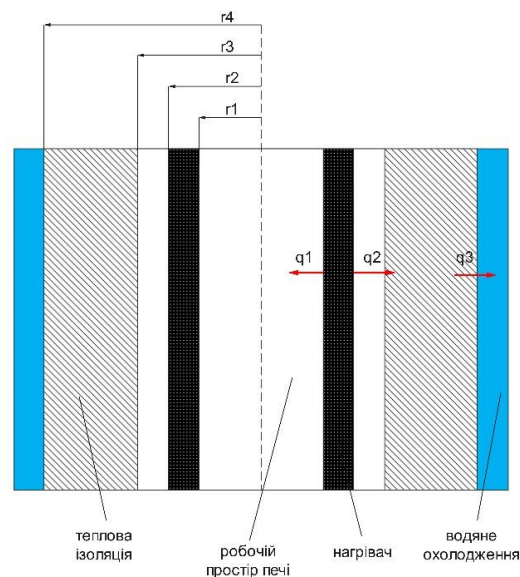


Рисунок 1 - Схема високотемпературної печі з нагрівачем з вуглецевого композиту

Для перевірки отриманих результатів була створена лабораторна камерна піч, характеристики якої наведено у таблиці 2. Фото печі наведено на рисунку 3. Особливістю конструкції печі є закритий робочий простір печі, що забезпечує відсутність втрат теплоти з внутрішньої поверхні нагрівача. Водночас це не дозволяє прямого вимірювання температури в робочому просторі печі. Тому для побудови режимної карти лабораторної печі було використано метод «свідків» - еталонних матеріалів з відомими температурами переходу з твердого у рідкий стан. Для зазначених цілей використані наступні матеріали - таблиця 3.

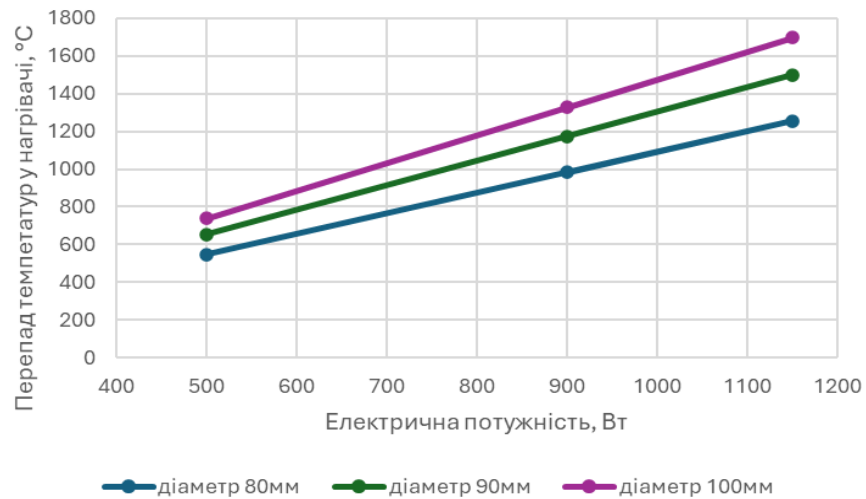


Рисунок 2: Залежність перепаду температур у нагрівачі в залежності від електричної потужності

Таблиця 2

Технічні характеристики лабораторної печі

1. Електрична потужність	6 кВт
2. Живлення шафи управління печі	~ 230В, 50 Гц
3. Напруга на електродах печі (вторинний контур)	до 22В
4. Робочий струм	50-230А
5. Інертний газ	аргон



Рисунок 3: Експериментальна піч, система газопостачання, джерело живлення.

На основі отриманих результатів випробувань (таблиця 3) побудовано енергетичну характеристику печі – залежність температури в робочому

просторі від електричної потужності, яку використано при термічній обробці вуглецевих матеріалів.

Таблиця 3

Результати випробувань експериментальної печі

№ з/п	Матеріал	Температура плавлення	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
1	Мідь	1085°C	11,5	62	917
2	Сталь 18Х10Н1Т	1400-1450°C	15,4	85	1309
3	Оксид алюмінію Al ₂ O ₃	2072°C	17,1	100	1710
4	Сплав ВК-8 92%	2780°C	19,1	220	4202
5	Карбід титану	3257°C	21,9	250	5475

Крім того, було визначено перепади температур у нагрівачі лабораторної печі. Цьому передували визначення залежностей питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності вуглецевого композитного матеріалу.

При моделюванні були прийняті умови стаціонарного режиму роботи та розглянута одномірна задача розподілу температури по радіусу нагрівача. Нагрівач був поділений по радіусу на три слої однакової товщини 5мм. Розподіл джерел джоулевої теплоти у кожному був рівномірний, що визначався відповідно до середньої температури у кожному шарі. Аналогічно визначалися коефіцієнти теплопровідності. Розрахунки велися послідовно для кожного шару по залежностям для розподілу температур у циліндричній стінці з джерелами теплоти, враховуючи відому температуру на внутрішній поверхні нагрівача.

Результати моделювання неведені на рисунку 4, з якого виходить, що перепад температур в нагрівачі в робочому діапазоні складає біля 1000°C. Швидкість розігріву печі складала не менш 1000°C/хв, що дозволяє використовувати її для моделювання процесу термічної обробки вуглецевих матеріалів у ЕКШ.

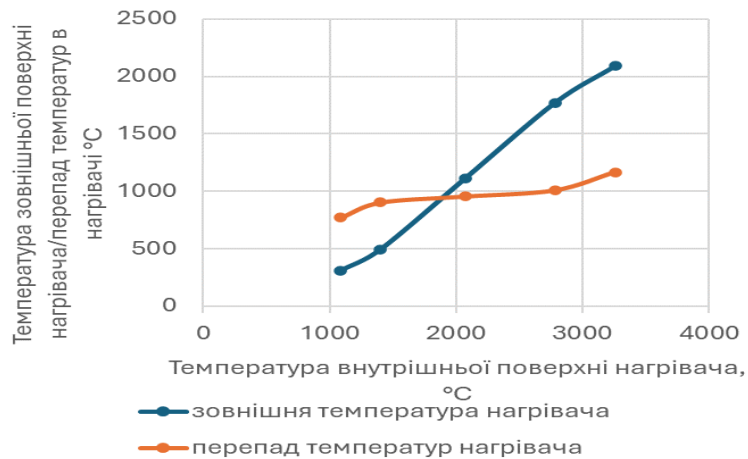


Рисунок 4 - Результати моделювання температурного поля нагрівача лабораторної печі

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. CFC / CARBON COMPOSITE URL:<https://www.cmcarbon.com/carbon-composite/3D%20CFC.htm> (дата звернення 10.01.2024)
2. Properties of Carbon Fiber URL:<https://www.clearwatercomposites.com/resources/properties-of-carbon-fiber/> (дата звернення 3.02.2024)
3. CARB®RIGID CARBON THERMAL INSULATION URL: www.mersen.com (дата звернення 5.02.2024)

CHAMBER FURNACE FOR SIMULATION OF CARBON MATERIALS HEAT TREATMENT IN ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED

Hubynskiy Semen, Sibir Artem, Fedorov Serhii, Foris Oleksiy

Abstract. Existing laboratory furnaces for high-temperature heat treatment of materials at around 3000°C, which have graphite heaters, allow samples to be heated at a rate two orders of magnitude lower than in electrothermal fluidized bed furnaces. This makes it impossible to use them in the research into the heat treatment of carbon materials because they do not meet the conditions of shock heating and do not allow to keep accurate residence time. The paper presents the research into the use of low-density composite carbon materials as heaters. Based on the results obtained, a high-temperature chamber furnace was designed, studied, and the temperature field in the heater was simulated. As a result, a high-temperature laboratory furnace was created with a sample heating rate of 20 °C/s - 100 °C/s, which made it possible to use it to simulate the heating process in the electrothermal fluidized bed furnace. Comparison of energy consumption in the furnace with a traditional graphite heater and a low-density carbon composite heater showed that heat loss in the furnace is reduced by 1.7 to 1.8 times.

Keywords: electrothermal fluidized bed, laboratory furnace, composite carbon materials, heat loss, shock heating.