



UDC 614.841.22:691

DETERMINATION OF CONCRETE THERMO-CHEMICAL DESTRUCTION REGULATIONS UNDER THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES

Oksana I. Shkromada*¹, Dmytro H. Volkov¹, Viktoriia D. Ivchenko¹, Liudmyla A. Tsyhanenko¹, Hennadii M. Tsyhanenko¹, Vadym D. Chivanov², Oksana V. Yurchenko¹, Alina V. Pikhtirova³, Olha H. Shvets¹

¹ Sumy National Agrarian University, Herasym Kondratiev str., 160, Sumy, 40021, Ukraine

² Institute of Applied Physics (IAP) NAS of Ukraine, Petropavlivskaya str., 58, Sumy, 40000, Ukraine

³ Sumy State University Rymського-Korsakova str., 2, Sumy, 40007, Ukraine

Received 17 February 2024; accepted 16 April 2024; available online 10 July 2024

Abstract

The study solved the problem of investigating the mechanism of concrete destruction under the influence of high temperatures as a result of an explosion. The destruction of the concrete floor after the impact of the projectile was established, which is explained by the effect of high temperatures. Concrete samples at different distances from the epicenter had a melted surface and a change in color. The use of the TPD-MS method showed that CO was released from a sample located 1.5 m from the epicenter with an intensity of 0.016 at the temperature of 100 °C; from a distance of up to 2 m with an intensity of 0.006; from the control sample with an intensity of 0.01 at 583 °C. A control sample of concrete when heated to 583 °C emitted CO₂ with an intensity of 0.16; the sample was obtained at a distance of up to 2 m with an intensity of 0.1 at 537 °C. In the concrete samples obtained at a distance of 0.5 m to 2 m, CO₂ emission was minimal with an intensity of 0.04 at 537 °C. The carbon content (CO, CO₂) in concrete decreases when approaching the epicenter of the explosion. The highest intensity of water evaporation of 0.8 when heated to 100 °C was observed from a concrete sample within a radius of up to 1.5 m from the epicenter. Sulfur was released in small amounts when heated to 1000 °C in all concrete samples. SO₂ and SO compounds were isolated from a sample obtained at a distance of 1.5 from the explosion. The feature of the experiment is the investigation of thermomechanical and thermochemical changes in concrete under the influence of high temperatures. The conducted research is distinguished by the use of scanning electron microscopy and TPD-MS methods for the study of structural and chemical changes in concrete. The results of the experiment can be used to determine the degree of destruction of concrete after explosion and fire for the restoration of the building.

Keywords: thermochemical cracking; destruction of concrete; change in the chemical composition of concrete.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ БЕТОНУ ПІД ВПЛИВОМ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Оксана І. Шкромлада*¹, Дмитро Г. Волков¹, Вікторія Д. Івченко¹, Людмила А. Циганенко¹, Геннадій М. Циганенко¹, Вадим Д. Чіванов², Оксана В. Юрченко¹, Аліна В. Піхтірєва³, Ольга Г. Швець¹

¹ Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна

² Інститут прикладної фізики НАН України вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, 40000, Україна

³ Сумський державний університет, вул. Римського Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна

Анотація

У дослідженні вирішували проблему дослідження механізму руйнування бетону під впливом високих температур внаслідок пожежі. Досліджені руйнування бетонної підлоги під впливом високих температур, що виникла внаслідок пожежі від влучання снаряду біля місця зберігання силосу. Використання методу TPD-MS показало, що СО виділяється зі зразка, розташованого на 1.5 м від епіцентру з інтенсивністю 0.016 за температури 100 °C; з контрольного зразка - з інтенсивністю 0.01 (t = 583 °C); зі зразка на відстані до 2 м - з інтенсивністю 0.006. Контрольний зразок бетону за нагрівання до t = 583 °C виділяв СО₂ з інтенсивністю 0.16; зразок, отриманий на відстані до 2 м, - інтенсивністю 0.1 (t = 537 °C); на відстані від 0.5 м до 2 м від епіцентру пожежі виділення СО₂ було мінімальним, з інтенсивністю 0.04 (t = 537 °C). Вміст карбону (СО, СО₂) в бетоні зменшується з наближенням до епіцентру пожежі. Найбільшу інтенсивність випарування води - 0.8 (100 °C) - спостерігали із зразка бетону у радіусі до 1.5 м від епіцентру. Сірку виділяли у незначній кількості за 1000 °C в усіх зразках бетону. Сполуки SO₂ та SO виділялись зі зразка на відстані 1.5 від епіцентру пожежі від вибуху. Особливістю експерименту є дослідження термомеханічних та термохімічних змін в бетоні під впливом високих температур. Проведене дослідження відрізняється застосуванням методів скануючої електронної мікроскопії та TPD MS для дослідження структурних та хімічних змін в бетоні. Результати експерименту можна застосовувати для визначення ступеню руйнування бетону для відновлення будівлі.

Ключові слова: термохімічне розтріскування; деструкція бетону; зміна хімічного складу бетону.

*Corresponding author: e-mail: oshkromada@gmail.com

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v32i2.298636

Вступ

В Україні наразі існує проблема руйнування будівель внаслідок влучання авіаснарядів та дії інших вибухових пристроїв. Руйнація будівельних конструкцій відбувається внаслідок не тільки вибухової хвилі та прямого потрапляння снаряду, а і від пожежі, що виникає після вибуху.

Під час різкого нагрівання бетону існує великий ризик зниження його міцності через розтріскування із-за виникнення внутрішнього тиску. Відповідно до дослідження авторів [1], міцність бетону пов'язана з утворенням водовмісних кристалогідратів. Під дією високих температур відбувається втрата міцності бетону внаслідок руйнування його кристалохімічної структури. Дослідники [2] наводять результати власних досліджень бетонних контрольних зразків на портландцементі, що піддавали впливу високих температур. З аналізу досліджень авторами [3] отримана залежність зниження міцності бетону на портландцементі та його модулю пружності від температури нагрівання в межах 20–1000 °С. Зафіксовано зниження міцності бетону майже на 83 %, модуля пружності – на 90 %, що пов'язано з процесами дегідратації цементного каменю.

Дослідники [4] встановили, що добавки в бетон, такі як метакаолін і кремнезем, збільшили міцність бетону за температури нагрівання до 200 °С. Однак введення більшості добавок у різні типи бетону призводить до поступового зниження міцності за температур до 400 °С. Крім того, зниження міцності відбувається швидше, доки бетон не досягне температури 800 °С або 1000 °С.

Також під впливом надвисоких температур бетон розтріскується до такого стану, що унеможливорює використання будь-якого прикладного дослідження або тестування на міцність.

Дослідники [5] у своїх експериментах дійшли висновку, що поліпропіленові волокна покращують стійкість бетону до розколювання під дією тепла. Однак це досі вважається предметом дискусії. Основною проблемою є відсутність методу тестування для порівняння отриманих результатів. Також має значення діапазон температур нагрівання і термін впливу на бетон.

Незважаючи на значну кількість проведених експериментів, отримані

результати важко порівнювати між собою. Дослідники [6] постійно намагаються створювати спеціалізований бетон за рахунок введення добавок для попередження зменшення напруги в бетоні. Однак іншими науковцями [7] було встановлено, що поява сколів та розтріскування також залежить від типу бетону та марки цементу. Крім того, в дослідженні були встановлені межі по запобіганню руйнування мостових балок за температур до 100 °С. Показано, що за межею цих показників руйнування мостових балок не передбачається.

Проведені дослідження [8] показали існування трьох основних типів термічного розтріскування. В залежності від механізму впливу виділяють термогідралічне, термомеханічне і термохімічне розтріскування. Однак існують різні погляди на кожен тип розколювання з точки зору термічної нестабільності бетону. Тривають суперечки, якої саме теорії дотримуватись, і яка з цих теорій є найбільш практичною.

Термогідралічний механізм розтріскування бетону виникає через тиск водяної пари у порах [9]. Бетон нагрівається нерівномірно по всій поверхні бетону. Міграція водяної пари у більш прохолодні ділянки призводить до підвищення тиску і розтріскування. Однак інші дослідники [10] встановили, що поровий тиск водяної пари був нижчим у зразках, які розкололися, порівняно зі зразками, які не розтріскались. Тому не можна вважати, що термогідралічне розтріскування є основною причиною руйнування бетону під час нагрівання.

Науковці [11] довели, що за нерівномірного нагрівання бетону до високих температур виникає температурний градієнт, який призводить до виникнення механічної напруги в глибоких шарах бетону і, відповідно, до розтріскування. Однак дослідженнями [12] встановлено, що тільки термомеханічний механізм не може повністю пояснити явище розтріскування бетону.

Термохімічний механізм базується на принципі хімічного розкладання компонентів бетону за високих температур. Дослідники [13] встановили, що міцність бетону знижується поступово з підвищенням температури. Водночас хімічно зв'язана та вільна водяна пара починає поступово мігрувати та випаровуватись. Крім того, в [14] було встановлено, що за підвищення температури до 800 °С вміст гідрату силікату

кальцію (CSH) швидко зменшується.

Однак інші науковці [15] у своїх експериментах, проведених на бетонних плитах, встановили, що основною причиною розтріскування було збільшення тиску, а не хімічна дегідратація компонентів бетону.

Тому, підсумовуючи все вищезгадане, можна відмітити, що дослідники не прийшли до єдиної думки щодо механізму розтріскування бетону під дією надвисоких температур, особливо під час вибуху. Тому дослідження може підтвердити одну або декілька теорій розтріскування в результаті впливу на бетонні конструкції температур до 1200 °С.

Застосування електронної мікроскопії є важливим для визначення глибини розколювання бетону та змін мікроструктури, дає можливість встановити вплив високих температур на глибину руйнування. Також визначення зміни хімічного складу бетону під дією вогню є актуальним для подальшої ймовірної відбудови зруйнованих будівель.

Тому одним з завдань дослідження було з'ясування ступеню ураження та змін хімічного складу бетону під впливом високої температури. Також в роботі було досліджено питання взаємозв'язку впливу високої температури на ступінь руйнування бетону та можливості відновлення будівельних конструкцій.

Експериментальна частина

Метою дослідження було дослідження механізму руйнування, змін структури та хімічного складу бетону, що виникли під впливом надвисоких температур під час пожежі, що спричинив вибух снаряду.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі:

– дослідити наявність деструктивних змін в бетоні за допомогою скануючої електронної мікроскопії;

– провести аналіз зразків бетону методом термопрограмованої мас-спектрометрії.

Зразки бетону фундаменту будівлі для зберігання силосу (6 штук) були взяті на різній відстані від епіцентру пожежі від влучання снаряду на території підприємства у селищі Граково, Харківська область, Україна. Сільськогосподарська споруда побудована в 2005 році. Під час експлуатації в будівлі зберігалися соняшник та кукурудза.

Лабораторні дослідження виконували в міжфакультетській лабораторії електронної мікроскопії Сумського національного аграрного університету та лабораторії відділу радіаційної біофізики Інституту прикладної фізики НААН України (м. Суми, Україна).

Методика дослідження зразків бетону за допомогою TPD MS. Зразки бетону отримали з фундаменту сільськогосподарської споруди розміром 0.2–0.5 см² на різній відстані від епіцентру вибуху. Для дослідження зразків бетону була застосована установка термопрограмованої мас-спектрометрії (TPD MS). Зразки бетону масою 5–10 мг нагрівали за температури від 40 до 900 °С. Паралельно відбувалась фіксація суміші газів за використання мас-спектру, яка відділялась під час нагрівання. Гази ідентифікували за молекулярними масами (m/z): H₂O – 18, CO – 28, CO₂ – 44, 32 – S, 48 – SO, 64 – SO₂ [16].

Методика скануючої електронної мікроскопії зразків бетону. Дослідження мікроскопічної структури зразків бетону проводили методом скануючої електронної мікроскопії з використанням приладу РЕМ 106 і (BAT SELMI м. Суми, Україна). Застосовували для досліджень растровий електронний мікроскоп з режимом вторинних електронів в діапазоні електроннооптичних збільшень від 200 до 5000 разів [17].

Результати та їх обговорення

Результати дослідження порушення цілісності бетонних конструкцій на різній відстані від епіцентру пожежі. Внаслідок влучання снаряду біля будівлі виникла тривала пожежа на підлозі, яка призвела до змін у структурі бетону. У місці пожежі бетон має чорний колір на поверхні, місцями вугільного кольору (рис. 1 а). На відстані до 2.5 м від епіцентру пожежі колір бетону нагадує звичайний, аналогічний тому, якого не торкнулась пожежа (рис. 1, б).

Дослідні зразки порівнювали з контрольним зразком, отриманим з максимальної відстані в цій сільськогосподарській будівлі для більш точного порівняння. За мету ставили визначення структурних та хімічних змін у бетоні під впливом високих температур, а також прослідкувати найбільш вірогідний механізм виникнення розтріскування бетону (рис. 2).



Fig. 1. Image of the consequences of the fire in the agricultural premises as a result of the explosion:
a – fire epicenter; b – floor and walls around the epicenter

Рис. 1. Зображення наслідків пожежі у сільськогосподарському приміщенні в наслідок вибуху:
а – епіцентр пожежі; б – підлога та стіни навколо епіцентру



Fig. 2. Image of concrete samples depending on the epicenter of the fire. 1 – control, 5 – fire epicenter, 4 – at a distance of 0.5 m from the epicenter, 2 – at a distance of 1 m from the epicenter, 3 – at a distance of 1.5 m from the epicenter, 6 (1) and 6 (2) – at a distance of 2 m from the epicenter

Рис. 2. Зображення зразків бетону в залежності від епіцентру пожежі 1 – контроль, 5 – епіцентр пожежі, 4 – на відстані 0.5 м від епіцентру, 2 – на відстані 1 м від епіцентру, 3 – на відстані 1.5 м від епіцентру, 6 (1) та 6 (2) – на відстані 2 м від епіцентру

Дослідженнями доведено, що в результаті вибуху снаряду біля будівлі для зберігання силосу виникла пожежа і, в залежності від відстані від епіцентру, ураження бетонна підлога зазнала руйнування під впливом високої температури.

Результати дослідження зміни

мікроструктури зразків бетону під впливом високих температур. Зразки бетону, відібрані на різній відстані від епіцентру пожежі, мали різні структурні зміни в залежності від висоти температури та тривалості впливу (рис. 3–6).

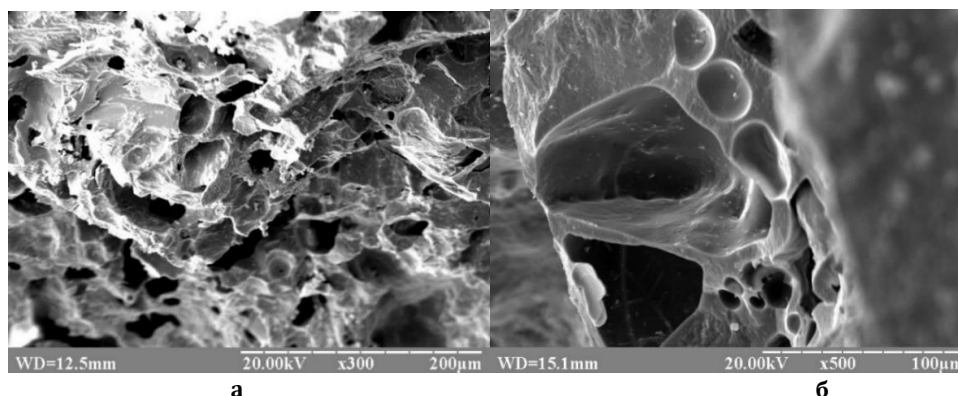


Fig. 3. Electron microscopic image: a – concrete sample 5 taken from the epicenter of the fire; b – concrete sample 4 (0.5 m from the epicenter of the fire)

Рис. 3. Електронно-мікроскопічне зображення: а – зразку 5 бетону відібраний з епіцентру пожежі; б – зразку 4 бетону (0.5 м від епіцентру пожежі)

Зразок 2 так само має оплавлену поверхню, тому відстань 0.5 м від епіцентру пожежі повністю руйнує структуру бетону (рис. 4). Єдина різниця – це тривалість впливу

високої температури, тому в ході дослідження хімічного складу можуть бути відмінності.

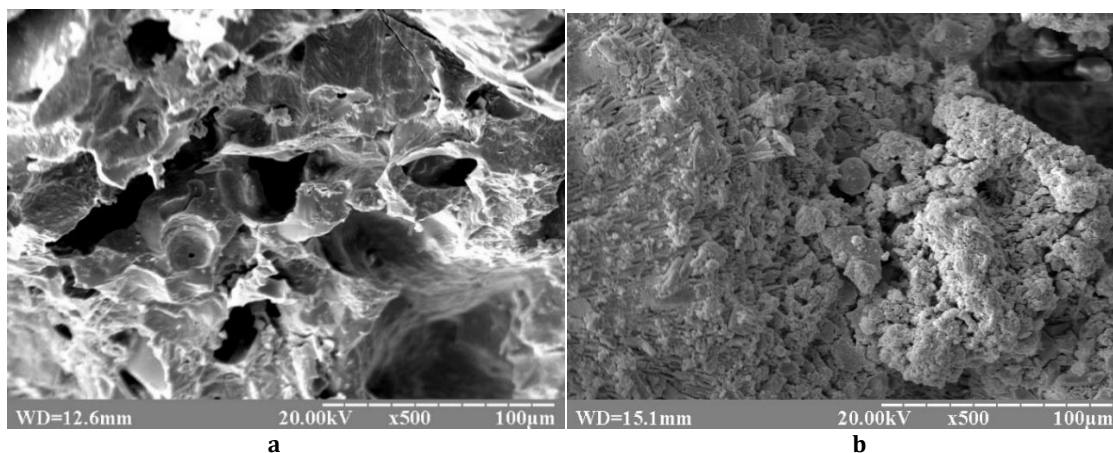


Fig. 4. Electron microscopic image: a – concrete sample 2 (1 m from the fire epicenter); b – concrete sample 3 (1.5 m from the epicenter)

Рис. 4. Електронно-мікроскопічне зображення: а – зразку 2 бетону (1 м від епіцентру пожежі); б – зразку 3 бетону (1.5 м від епіцентру)

Зразок 3, отриманий на відстані 1.5 м, також потрапив у зону враження, там була пожежа, це можна побачити на загальному фото (рис. 1). Зразок має зруйновану поверхню, але під впливом меншої температури 300–600 °С утворились рихла структура внаслідок перепадів порового тиску під час википання води.

На рис. 5, а зображена поверхня зразка 6, відстань якого до епіцентру була 2 м. Зміни в зразках 3 та 6 ідентичні через утворення однакових умов горіння бетону. Спостерігаємо наслідки термогідралічного та термохімічного розтріскування бетону під впливом високих температур в діапазоні 100–200 °С.

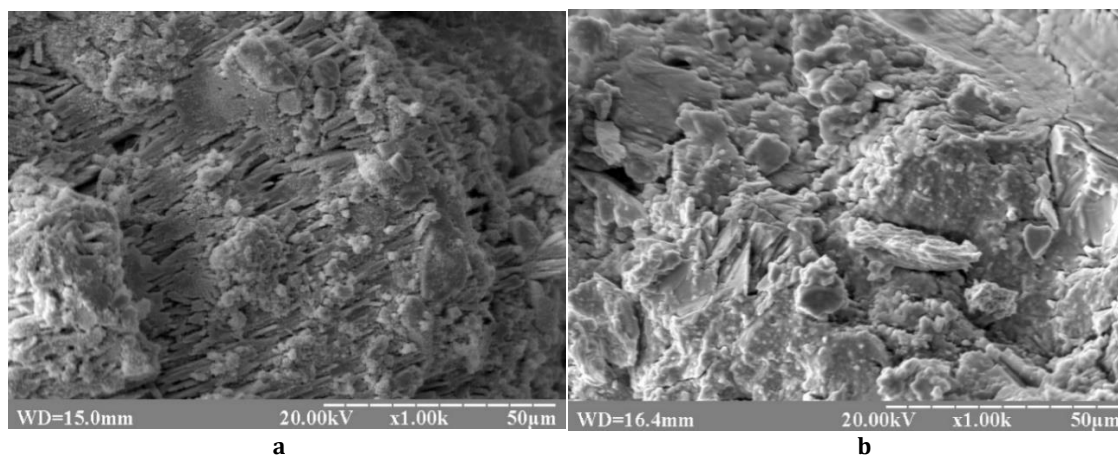


Fig. 5. Electron microscopic image: a – concrete sample 6 (2 m from the fire epicenter); b – concrete sample 1 (control)

Рис. 5. Електронно-мікроскопічне зображення: а – зразку 6 бетону (2 м від епіцентру пожежі); б – зразок 1 бетону (контроль)

Так, у зразках 4 та 5 спостерігаємо, що під впливом температури близько 1200 °С повністю змінена структура бетону. Оплавлені та закипілі складові бетону повністю перетворились на суцільну пористу масу. За допомогою скануючої електронної мікроскопії було встановлено зміну структури бетону у зразку 5, отриманого

безпосередньо з епіцентру пожежі (рис.3 а). Бетон має оплавлену структуру, яка утворилась в результаті впливу температури близько 1200 °С, відбулось теплове розширення та розтріскування зразку [18].

На відстані 0.5–1 м від місця епіцентру пожежі був відібраний зразок 4 (рис. 3 б) та зразок 2 (рис.4, а), які також мали на поверхні

оплавлену структуру. Дослідники [19] підтверджують у своїх дослідженнях, що у бетоні за нагрівання від 1000 до 1200 °C відбувається плавлення всіх компонентів.

Зразки 3 (рис. 4, б) та 6 (рис. 5, а) мали під мікроскопом рихлу структуру, також відбулась збліднення кольору порівняно з контрольним зразком бетону (рис. 5, б). На поверхні бетону зразків спостерігали чорний наліт золи. Дослідники [20] встановили, що пошкодження бетону вогнем проявляється у вигляді розтріскування та розкладання в'язучої матриці, зміни кольору.

Зразки 2, 3 та 6 мали червоний відтінок, який, як підтверджують автори [21; 22], виникає за наявності заліза або кремнію у складових бетону, наприклад в піску, за нагрівання матеріалу до температури 600–

900 °C.

Під час дослідження мікроструктури поверхні бетону, який не був уражений пожежею (контроль) і не зазнав термомеханічних змін, виявлено структуру, характерну для будівлі віком 18 років. Присутні явища незначної корозії поверхні бетону внаслідок експлуатації. Однак змін, які виникають під впливом високої температури, не виявлено.

Результати визначення хімічної деструкції бетону під дією високих температур з використанням термопрограмованої мас-спектрометрії. Дослідження зразків бетону за використання термопрограмованої мас-спектрометрії показало, що карбон (II) оксид виділяється зі зразка 3 з інтенсивністю 0.016 за температури 100 °C (рис. 6).

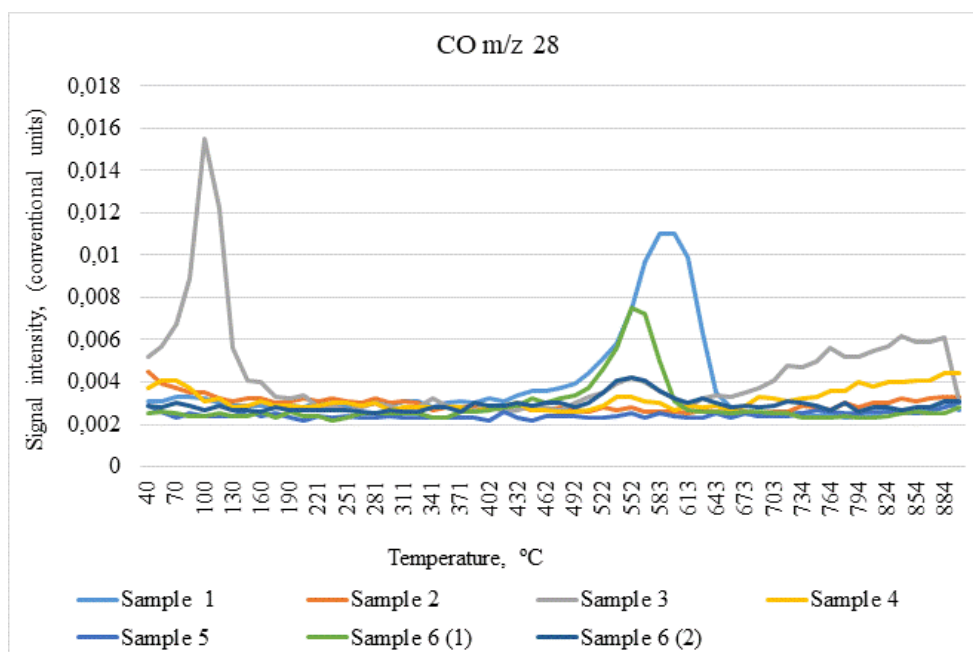


Fig. 6. Thermograms of CO release ($m/z=28$) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 6. Термограми виділення CO ($m/z=28$) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

Також CO виділяється зі зразка 1 (контроль) з інтенсивністю 0.01 за температури 583 °C, зі зразка 6 (1) – з інтенсивністю 0.006.

Під час дослідження зразків методом TPD-MS було встановлено, що контрольний зразок 1 за нагрівання до $t = 583$ °C виділяв карбон (IV) оксид з інтенсивністю 0.16 (рис. 7).

Зразок 6 (1) також виділяв CO₂ з інтенсивністю 0.1 за нагрівання до температури 537 °C. У зразках бетону 4, 6(2) та 3 виділення CO₂ було мінімальним з інтенсивністю 0.04 за температури 537 °C. У

зразках бетону 2 та 5 карбон (IV) оксид не виділявся.

Сполуки карбону є одним з основних складових бетону. В ході деструкції бетону внаслідок швидкого нагрівання до високих температур вміст CO та CO₂ стрімко знижується у порівнянні з контрольними зразками. Це підтверджує термохімічний механізм руйнування бетонних конструкцій під дією високих температур.

Під час дослідження виділення води зі зразків (рис. 8) встановлено, що найбільшу інтенсивність 0.8 за нагрівання до температури 100 °C мав зразок 3 бетону.

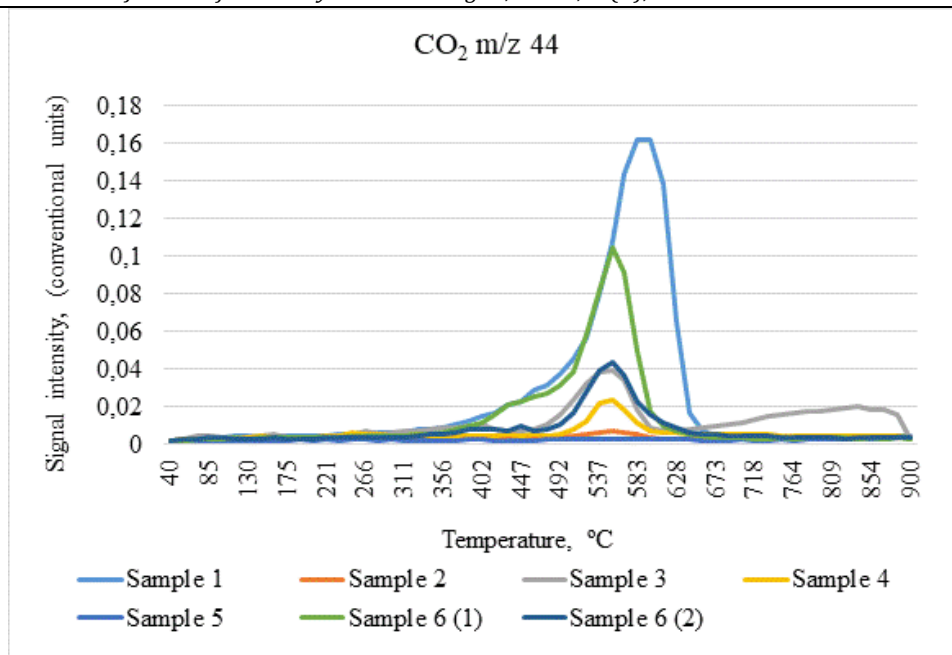


Fig. 7. Thermograms of CO₂ release (m/z=44) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 7. Термограми виділення CO₂ (m/z=44) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

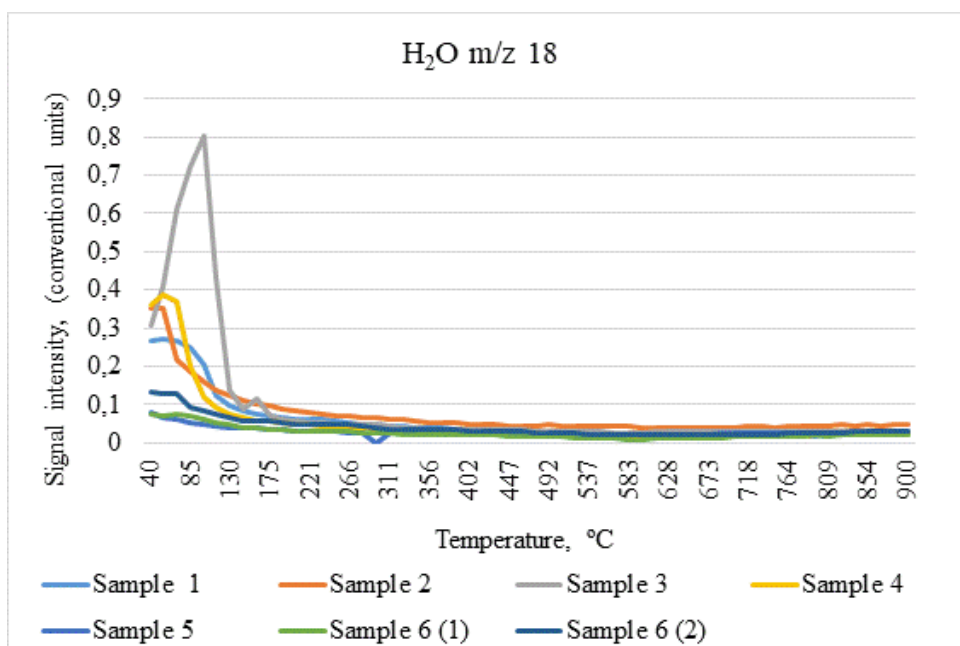


Fig. 8. Thermograms of H₂O release (m/z=18) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 9. Термограми виділення H₂O (m/z=18) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

Деяко меншу інтенсивність (0.4) виділення H₂O мали зразок 4 та 2. Зразки 5 та 6 мали настільки змінену структуру після впливу пожежі від вибуху, що води в бетоні взагалі не залишилось. У зразках, які зазнали впливу високих температур внаслідок пожежі, практично повністю відсутня вода, що є

підтвердженням термогідралічної теорії руйнування бетону.

Аналіз термограми виділення сірки у зразках бетону показав, що всі зразки, які були відібрані з місця пожежі, мали однакову інтенсивність виділення в діапазоні від 0.0015 до 0.002 (рис 9).

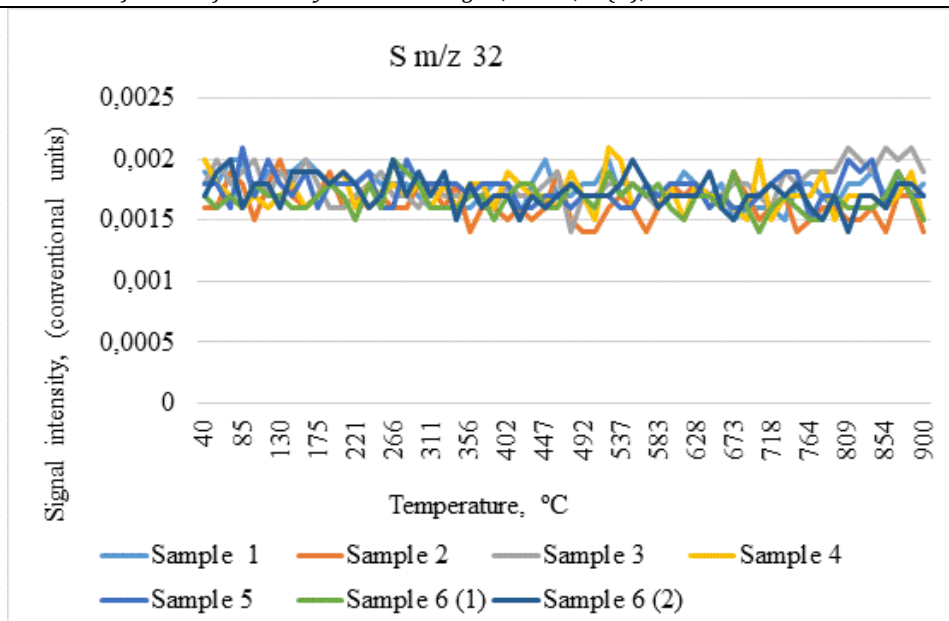


Fig. 9. Thermograms of the release of S ($m/z=32$) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 9. Термограми виділення S ($m/z=32$) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

Результати вказують на те, що не зважаючи на відстань від епіцентру пожежі після вибуху продукти горіння (сірка S) потрапили у бетон.

Інші продукти горіння, які пов'язані з водою, такі як діоксид сірки (рис. 10), в значній кількості виділялися із зразка 3 при температурі 884 °C з інтенсивністю 0.0035.

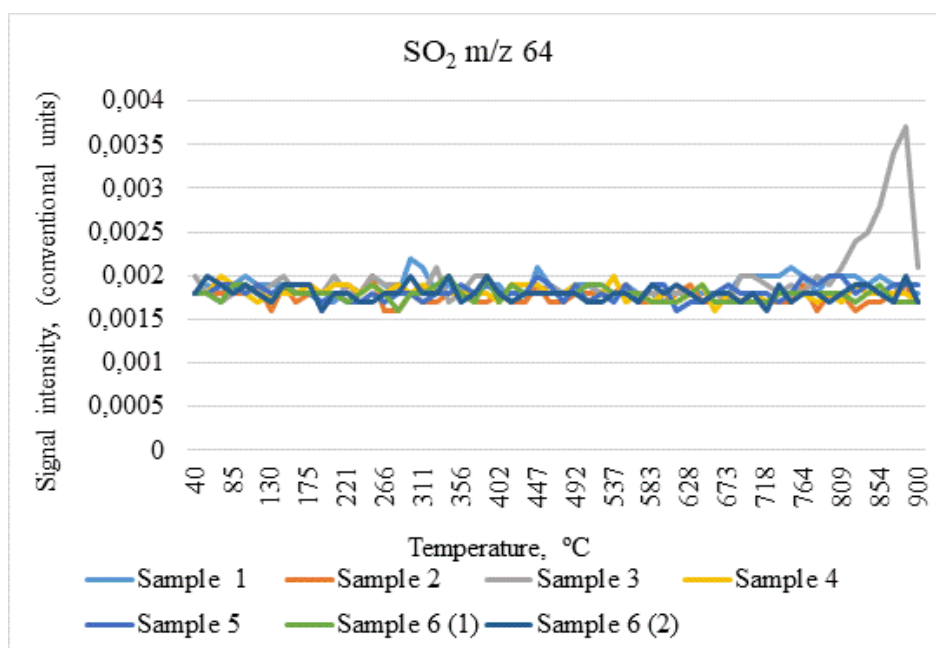


Fig. 10. Thermograms of SO_2 release ($m/z=64$) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 10. Термограми виділення SO_2 ($m/z=64$) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

Отриманий результат вказує на неповне вигорання зв'язаної води. Крім того,

температура горіння бетону була достатня у зразку 3 для утворення SO (рис. 11).

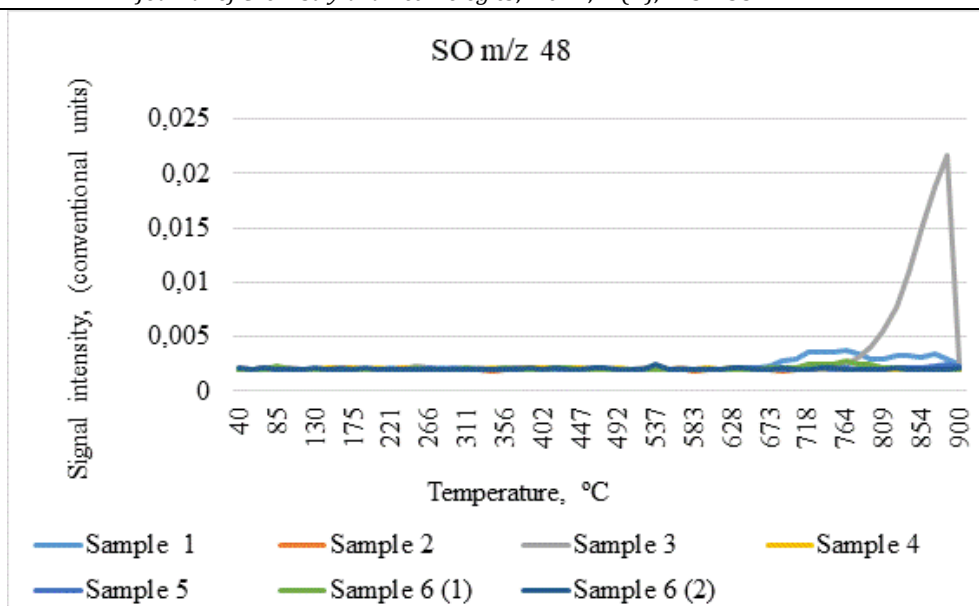


Fig. 11. Thermograms of SO release ($m/z=48$) from samples obtained at different distances from the epicenter of the fire after the explosion

Рис. 11. Термограми виділення SO ($m/z=48$) зі зразків, отриманих на різній відстані від епіцентру пожежі після вибуху

Під час нагрівання до температури 884 °C виділявся сульфур (II) оксид з інтенсивністю 0.02. Інші зразки бетону під дією нагрівання не виділяли SO.

Дослідження зразків бетону методом TPD-MS продемонструвало, що, залежно від віддаленості бетону від епіцентру пожежі після вибуху, змінюється хімічний склад матеріалу та його структура. Сірку та сульфур (II) оксид виявляли у зразках бетону, які зазнали впливу пожежі. Експериментально встановлено, що вміст сполук карбону (CO, CO₂) швидко зменшується, коли температура досягає 600–800 °C [23; 24].

Так, у термограмі на рис. 7, 8 можна побачити, що зразки бетону 3, 6 (1) та контроль мали в своєму складі CO та CO₂, тоді як в інших зразках бетону, отриманих на незначній відстані від пожежі, оксиди карбону не виділялись.

Випарування води (рис. 9) відбувалось більш інтенсивно зі зразку 3 бетону, менше – з контрольного та зразків 2 та 4. Зазначені дослідні зразки піддалися впливу високих температур, однак час нагрівання не був тривалим, і хімічно зв'язана вода залишилась в бетоні. Дослідники [25; 26] у своїй роботі зазначають, що вплив високої температури зневоднює гіпс, а наступна теплова енергія витрачається на випаровування води.

Аналіз термограми (рис. 9) показав, що сірка виділялась з усіх зразків бетону у незначній кількості, а SO₂ (рис. 10) та SO

(рис. 11) виділялись тільки під час нагрівання зразка 3 бетону. Отриманий результат вказує, що на поверхні цього зразка бетону мали місце органічні залишки зернових культур та мікроорганізмів, які в ході горіння утворили сульфур (II) та сульфур (IV) оксиди [27].

Дослідження [28] доводять, що під впливом високих температур змінюються фізичні та хімічні властивості бетону.

Обмеження дослідження полягає у тому, що весь експеримент був проведений на одному об'єкті, де склались специфічні умови під час пожежі після вибуху. Однак це дослідження дає можливість визначити зміни термохімічного та термомеханічного характеру, які відбуваються в бетоні під дією високих температур.

Недоліком дослідження є те, що дослідження базується на результатах неконтрольованого процесу пожежі після вибуху, тому важко точно визначити температури, за яких відбувались зміни у бетоні.

Напрямом подальших досліджень є пошук добавок в бетон, які збільшать його термохімічну та термомеханічну стійкість.

Висновки

1. Встановлено, що руйнування бетонної підлоги пов'язане з впливом високих температур внаслідок пожежі після влучання снаряду. Механізм руйнівного впливу на бетон був пов'язаний виникненням температурного градієнту під час швидкого

нерівномірного нагрівання, яке призводить до виникнення механічної напруги і розтріскування. До того ж, зразки бетону, які були отримані з епіцентру та на відстані 0.5–1 м від нього, мали оплавлену поверхню.

2. Дослідження структури бетону з використанням скануючої електронної мікроскопії показало, що зразки, відібрані з епіцентру пожежі від вибуху, на відстані 0.5 та 1 м мали оплавлену структуру, яка утворилась в результаті впливу температури близько 1200 °С, відбулось теплове розширення та розтріскування.

3. На термограмах, отриманих застосуванням методу TPD-MS, було встановлено, що вміст оксидів карбону (CO, CO₂) зменшується в бетоні під час нагрівання до 600 °С, що доводить термохімічне руйнування бетону. Оксиди карбону виділялись на термограмі тільки у

контрольному зразку бетону та зразках, отриманих на відстані 1.5 та 2 м від епіцентру пожежі. Сірка виділялась тільки зі зразка, який був розташований на відстані 1.5 м від епіцентру пожежі.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Use of artificial intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies when creating the current work.

References

- [1] Pozdjev, S. V., Otrosh, Ju. A., Omeljchenko, A. M., & Shhipej, S. D. (2014). [A method for assessing the fire resistance limit of reinforced concrete beams by interpreting the results of their fire tests]. *Zbirnyk naukovykh pracj Donbasjkogho derzhavnogho tekhnichnogho universytetu*, (1), 119–127. (In Ukrainian)
- [2] Ghyvljud, M. M. Parkhomenko V.-P. O., Brajchenko S. P. (2016). [Temperature dependence of strength properties of concrete based on composite cement]. *Vydavnytvo Ljvivsjka politekhnika*. 844, 47–52
- [3] Alhamad, A., Yehia, S., Lubl6y, 6., Elchalakani, M. (2022). Performance of Different Concrete Types Exposed to Elevated Temperatures: A Review. *Materials*, 15(14), 5032. <https://doi.org/10.3390/ma15145032>
- [4] Mohammed, H., Ahmed, H., Kurda, R., Alyousef, R., Deifalla, A. F. (2022). Heat-Induced Spalling of Concrete: A Review of the Influencing Factors and Their Importance to the Phenomenon. *Materials*, 15(5), 1693. <https://doi.org/10.3390/ma15051693>
- [5] Wyrzykowski, M., Terrasi, G., Lura, P. (2020). Chemical prestressing of high-performance concrete reinforced with CFRP tendons. *Composite Structures*, 239, 112031 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112031>
- [6] Wyrzykowski, M., Terrasi, G., Lura, P. (2018). Expansive high-performance concrete for chemical-prestress applications. *Cement and Concrete Research*, 107, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.018>
- [7] Chaojie Song, C., Zhang, G., Lu, Z., Li, X., Zhao, X. (2023) Fire resistance tests on polypropylene-fiber-reinforced prestressed concrete box bridge girders. *Engineering Structures*, 115800, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115800>
- [8] Liu, J. C., Tan, K. H., Yao, Y. (2018). A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construction and Building Materials*, 184, 581–590, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204>.
- [9] Miah, M. J., Kallel, H., Carr6, H., Pimienta, P., La Borderie, C. (2019). The effect of compressive loading on the residual gas permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 217, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.057>
- [10] Du, H., Zhang, M. (2020). Experimental investigation of thermal pore pressure in reinforced C80 high performance concrete slabs at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 260, 120451, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120451>
- [11] Choe, G., Kim, G., Yoon, M., Hwang, E., Nam, J., Guncunski, N. (2019). Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cement and Concrete Research*, 116, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.021>.
- [12] Li, Y., Pimienta, P., Pinoteau, N., Tan, K. H. (2019). Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, 99, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.016>
- [13] Bilir, T., Kockal, N. U., Khatib, J. M. (2020). *Properties of SCC at elevated temperature. In Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*, Woodhead Publishing <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00008-8>.
- [14] Xu, L., Wang, J., Li, K., Lin, S., Li, M., Hao, T., Ling, Z., Xiang, D., Wang, T. (2022). A systematic review of factors affecting properties of thermal-activated recycled cement. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106432>.
- [15] Maier, M., Saxer, A., Bergmeister, K., Lackner, R. (2020). An experimental fire-spalling assessment procedure

- for concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 232, 117172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117172>.
- [16] Murphy, C. J., Ardy Nugroho, F. A., Härelind, H., Hellberg, L., Langhammer, C. (2021). Plasmonic Temperature-Programmed Desorption. *Nano letters*, 21(1), 353–359. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c03733>.
- [17] Bozhokin, M. S., Bozhkova, S. A., Rubel, A. A., Sopova, J. V., Nashchekina, Y. A., Bildyug, N. B., & Khotin, M. G. (2021). Specificities of Scanning Electron Microscopy and Histological Methods in Assessing Cell-Engineered Construct Effectiveness for the Recovery of Hyaline Cartilage. *Methods and protocols*, 4(4), 77. <https://doi.org/10.3390/mps4040077>.
- [18] Sundin, M., Hedlund, H., Cwirzen, A. (2023). Eco-Concrete in High Temperatures. *Materials*, 16(12), 4212. <https://doi.org/10.3390/ma16124212>
- [19] Sodal, K. A., Kaczmarek, Ł., Szer, J. (2020). Fire-Temperature Influence on Portland and Calcium Sulfoaluminate Blend Composites. *Materials*, 13(22), 5230. <https://doi.org/10.3390/ma13225230>
- [20] Wróblewska, J., Kowalski, R. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, 254, 119122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119122>.
- [21] Shumuye, E. D., Zhao, J., Wang, Z. (2021). Effect of the curing condition and high-temperature exposure on ground-granulated blast-furnace slag cement concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15, 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00437-6>.
- [22] Reddy, V. G. P., Tadepalli, T., Pancharathi, R. K. (2022). Surface imaging based non-destructive assessment of concrete deterioration using hue-saturation-intensity colour space. *Measurement*, 197, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111311>.
- [23] Shkromada, O., Ivchenko, V., Chivanov, V., Tsyhanenko, L., Tsyhanenko, H., Moskalenko, V., Kyrchata, I., Shershenuik, O., Litsman, Y. (2021). Defining patterns in the influence exerted by the interrelated biochemical corrosion on concrete building structures under the conditions of a chemical enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(6(110)), 52–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226587>.
- [24] Shkromada, O., Fotina, T., Petrov, R., Nagorna, L., Bordun, O., Barun, M., Babenko, O., Karpulenko, M., Tsarenko, T., Solomon, V. (2021). Development of a method of protection of concrete floors of animal buildings from corrosion at the expense of using dry disinfectants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6(112)), 33–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236977>
- [25] Raghav, M., Park, T., Yang, H. M., Lee, S. Y., Karthick, S., Lee, H. S. (2021). Review of the Effects of Supplementary Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical, Mechanical and Durability Properties of Hydraulic Concrete. *Materials*, 14(23), 7270. <https://doi.org/10.3390/ma14237270>.
- [26] Shkromada, O., Ivchenko, V., Chivanov, V., Shvets, O., Moskalenko, V., Kochenko, A., Babenko, O., Kharchenko, Y., Pikhtirova, A., Yurchenko, O. (2022). Determining changes in the mineral composition of concrete due to chemical corrosion in a sulfate environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6(120)), 42–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268627>.
- [27] Pasztetnik, M., Wróblewski, R. (2021). A Literature Review of Concrete Ability to Sustain Strength after Fire Exposure Based on the Heat Accumulation Factor. *Materials*, 14(16), 4719. <https://doi.org/10.3390/ma14164719>
- [28] Chai, L., Chen, B., Guo, L., Ren, B., Chen, Z., Huang, T. (2023). Effect of Ambient Temperature on the Mechanical Properties of High Ductility Concrete. *Materials*, 16(6), 2465. <https://doi.org/10.3390/ma16062465>