

УДК 621.791.11:693

ВПЛИВ СКЛЯНОГО ПОРОШКУ ЯК ЧАСТКОВОЇ ЗАМІНИ ЦЕМЕНТУ НА ПОВЕДІНКУ АРМОВАНИХ БЕТОННИХ БАЛОК ПІД ЧАС ЗГИНУ ПІД ВПЛИВОМ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

EFFECT OF GLASS POWER AS A PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT ON THE FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO ELEVATED TEMPERATURE

Виговський С.В., аспірант, ORCID:0009-0003-5898-1200, (Київський національний університет будівництва і архітектури)

Vyhovskyi S. V. Postgraduate student at the Department of Building Structures and Products Technology, ORCID:0009-0003-5898-1200, (Kyiv National University of Construction and Architecture)

В роботі було розглянуто експериментальні дослідження впливу використання скляного порошку як часткової заміни цементу на поведінку при згині залізобетонних балок, що піддаються впливу підвищених температур. Результати досліджень показали, що початковий момент руйнування балок із заміщенням 5%, 10% і 20% зменшився, а з заміщенням 15% збільшився на 50% порівняно з контрольним зразком для балок, випробуваних при лабораторній температурі, що є перспективним напрямком сучасних досліджень.

Deformation and failure processes of reinforced concrete beams, in which cement is partially replaced by finely divided glass powder, under bending under thermal loading. The relevance of this work stems from the search for environmentally friendly methods of glass waste disposal and the improvement of the fire resistance of concrete structures. The study analyzes the physical and mechanical properties of modified concrete, in which glass powder acts as an active pozzolanic additive. Particular attention is paid to changes in the microstructure of the cement paste when heated to critical temperatures (300–600°C) and their effect on the adhesion of concrete to reinforcement. The nature of changes in the load-bearing capacity, stiffness, and crack resistance of beams under the influence of bending moments was experimentally determined. It was found that the optimal percentage of cement replacement with glass powder allows not only to preserve strength characteristics under normal conditions but also to slow down the thermal degradation of the

concrete structure due to denser particle packing and changes in the phase composition of hydration products. The scientific novelty lies in establishing quantitative relationships between the glass powder content and the residual strength of reinforced elements after a thermal cycle. The practical significance of the results lies in the development of recommendations for the use of recycled glass raw materials to create concretes with improved performance properties for structures at increased risk of thermal exposure. The results of the studies showed that the initial moment of failure for beams with 5%, 10%, and 20% replacement decreased, while for beams with 15% replacement, it increased by 50% compared to the control sample for beams tested at laboratory temperature, which is a promising direction for modern research.

Ключові слова. Властивості бетону, змішування, поведінка при згині, міцність на стиск, відходи скляного порошку, підвищена температура. Concrete Properties, Mixing, Flexural Behavior, Compressive Strength, Waste Glass Powder, Elevated Temperature.

Вступ. Галузь виробництва портландцементу зазнає змін, тому з метою покращення екологічності та експлуатаційних характеристик проводиться ряд досліджень для покращення основних властивостей бетонів. Бетон можна виготовляти більш екологічними методами, використовуючи перероблені матеріали або добавки, включаючи подрібнений, доменний шлак, золу та відходи скляного порошку.

Аналіз останніх досліджень. Багато дослідників продемонстрували поліпшення властивостей бетону, виготовленого з частковою заміною природних матеріалів або цементу на W.G.P. Результати Shao et al. [1] показали, що подрібнені частинки скла дрібніші за 38 мкм виявляли пуццоланові властивості та допомагали зменшити розширення на 50%. Значне поліпшення міцності на стиск та розтяг при 10% заміні цементу відходами скла було зазначено в роботах Keerio et al [2]. Результати досліджень [3] показали, що міцність бетону на стиск через 28 діб не знижувалася, коли цемент частково замінювався W.G.P. у відсотках нижче 30% і досягав високої продуктивності при 15%. Це було пов'язано з пуццолановою реакцією між W.G.P. і цементними продуктами. Мухедін та Ібрагім [4] дійшли того ж висновку, оскільки вони помітили значне поліпшення міцності на стиск, коли W.G.P. частково замінював цемент на 5%, 10 та 15%. Бетон може піддаватися впливу високих температур під час пожеж або бути матеріалом з яких виготовляють вогнетривкі печі. Під час впливу високих температур, механічні властивості та стабільність об'єму можуть зазнавати небажаних змін та погіршення властивостей залежно від складу бетонної суміші, теплового навантаження та інших умов навколишнього середовища. Наус виявив, що бетон може втрачати міцність при температурах від 20 °C до 200 °C. Будь-яка втрата міцності в діапазоні від 22 до 120°C спричинена тепловим розширенням

фізично обмеженої води. Це призводить до роз'єднаних тисків. При температурі вище 350°C міцність може швидко знижуватися. Згідно результатів досліджень було проаналізовано нестандартне використання відходів скла та їх вплив на довговічність і експлуатаційні характеристики бетону. Дослідники виявили, що скло є надзвичайно термостійким. Воно також значно знижує теплопровідність цементних розчинів. Gorospe довів, що скло має низьку теплопровідність, тому додавання скляних заповнювачів покращує загальну теплопровідність цементних матеріалів. Теплопровідність була підвищена на 13%, 26%, 40% та 51% відповідно при рівні заміщення скла 30%, 50%, 70% та 100% порівняно з контрольним розчином. Тести Li et al показали, що відходи скла мають тенденцію зменшувати пошкодження бетону, пов'язані з впливом високих температур. Слід зазначити, що існує мало досліджень, присвячених використанню властивостей бетону, виготовленого шляхом заміни частини заповнювача або цементу відходами скла, пов'язаних з його властивостями при впливі високих температур. У цьому дослідженні вивчаються характеристики бетону з W.G.P. після впливу температури до 600°C. Буде перевірено міцність на стиск, технологічність та поведінку при згині залізобетонних балок

Постановка мети і задач досліджень. Метою роботи є створення новітніх матеріалів з застосуванням скляного порошку в будівельних сумішах.

Методика досліджень. Програма випробувань складається з лиття та випробування десяти балок розміром 150 мм x 180 мм x 1550 мм. Всі секції балок були армовані двома поздовжніми стрижнями діаметром 12 мм у верхній частині, двома стрижнями діаметром 10 мм у нижній частині та стрижнями діаметром 8 мм для хомутів, розташованих на відстані 7,5 см від центру до центру. Після 27 діб витримки балки були розділені на дві однакові групи, і одна з них була піддана підвищеній температурі 600°C протягом однієї години. Всі зразки балок були випробувані на згин за допомогою чотириточкового випробування на згин для оцінки моменту руйнування, міцності на згин і прогину по центру прольоту. На рисунку 1 показані деталі армування та схема випробувань. Змінною величиною в кожній групі була пропорція бетонної суміші. Рецепт бетонної суміші була сформульована відповідно до стандарту для контролю бетону. Марка бетонної суміші C25. Було підготовлено п'ять бетонних сумішей з однаковою пропорцією цементу, дрібного та крупного заповнювача 1:1:2 за вагою, відповідно, з водоцементним співвідношенням (W/C) 0,57. Змінною була частка W.G.P., яка була прийнята за 0%, 5%, 10%, 15% і 20%, рисунок 3. У таблиці 1 наведено детальну інформацію про суміші. Всього було відито 30 кубічних зразків розміром 150 мм x 180 мм x 150 мм, які були випробувані на міцність на стиск. Після 27 діб твердіння кубики були розділені на дві однакові групи по 3 кубики для кожної суміші. Одна з груп була піддана впливу підвищеної температури, яка досягала 600°C, протягом однієї години перед випробуванням. Вплив підвищеної

температури відбувався на 27-му добу після випробування, як показано на рисунку 2. Після впливу зразки готували до випробування наступного дня.

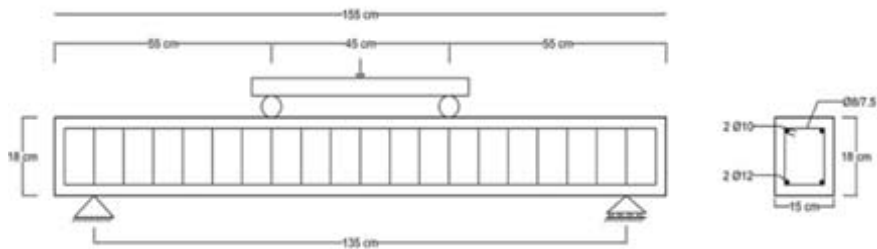


Рис. 1. Деталі армування та схема випробувань балок

Таблиця 1

Детальна інформація про кількості бетонної суміші в кг/м³

Позначення суміші	Цемент	Порошок	Вода	Пісок	Агрегат
Контрольний	539	0	307,2	577,5	1078,0
Скло 5%	512,1	27,0	291,9	577,5	1078,0
Скло 10%	485,1	53,9	276,5	577,5	1078,0
Скло 15%	458,2	80,9	261,2	577,5	1078,0
Скло 20%	431,2	107,8	245,8	577,5	1078,0



Рис. 2. Зразок, підданий впливу підвищеної температури

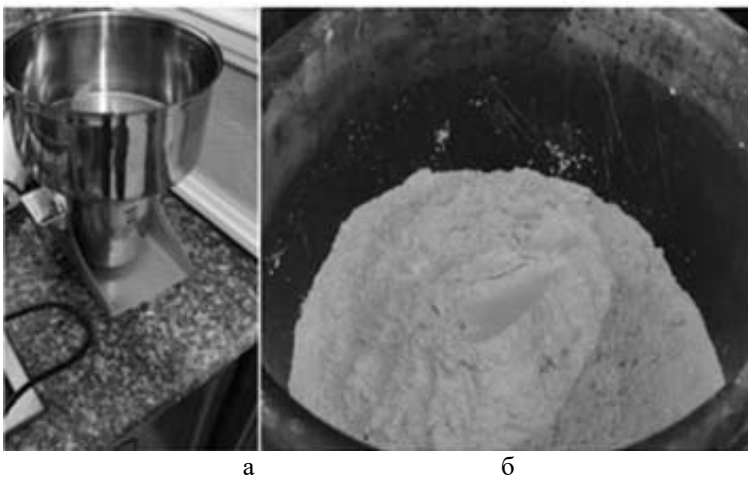


Рис. 3. Шліфувальний верстат (а). Скляний порошок (б)

Результати досліджень. *Випробування на осадку конуса.* Результати, показані на рисунку 4, свідчать про те, що додавання скляного порошку значно вплинуло на обробку бетонних сумішей. Контрольний зразок, який не містив скляного порошку, мав осадку конуса 10 см. Однак із збільшенням відсотка скляного порошку обробка зразку значно знизилася. Зразки з 5%, 10%, 15% та 20% вмістом скляного порошку мали зменшену оброблюваність на 30%, 40%, 60% та 80% відповідно. Це було пов'язано з збільшенням кількості дрібних частинок у сумішах, що призвело до збільшення загальної поверхні, яку покриває вода.

Міцність на стиск. У таблиці 2 та на рисунку 5 наведено результати випробувань на міцність та стиск. Як можна бачити, міцність на стиск сумішей, затверділих і випробуваних при лабораторній температурі, зменшувалася у відсотках із збільшенням вмісту W.G.P. у порівнянні з контрольною сумішшю. З іншого боку, всі суміші, випробувані після впливу підвищеної температури, демонстрували збільшення міцності на стиск із збільшенням вмісту W.G.P., за винятком 5% у порівнянні з контрольною сумішшю. У порівнянні з кубами, затверділими і випробуваними при лабораторній температурі, всі суміші, випробувані після впливу підвищеної температури, показали зниження з максимумом 27,02% у контрольній суміші і мінімумом 14,94% у суміші з 15% заміщенням.

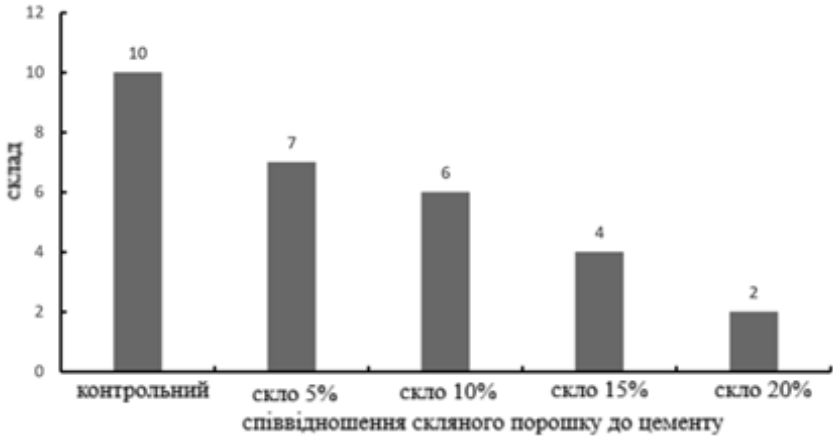


Рис. 4. Вплив вмісту скляного порошку на показники осадки конуса

Таблиця 2

Вплив W.G.P. як заміника цементу на міцність бетону на стиск, випробуваного при лабораторній температурі та після впливу підвищеної температури

Позначення суміші	Відсоток W.G.P.	міцність на стиск при лабораторній температурі (МПа)	Відхилення у відсотках при лабораторній температурі	міцність на стиск при підвищеній температурі (МПа)	Відсоток зміни при підвищеній температурі	Відсоток відхилення між підвищеною температурою та температурою в лабораторії
С-В	0%	40,77	0	29,44	0	-27,02
С-G5%	5%	33,56	-17,68	26,22	-10,11	-21,93
С-G10%	10%	36,88	-9,54	29,67	1,54	-19,66
С-G15%	15%	38,89	-4,61	33,11	12,47	-14,94
С-G20%	20%	40,78	0	33,33	13,21	-18,28

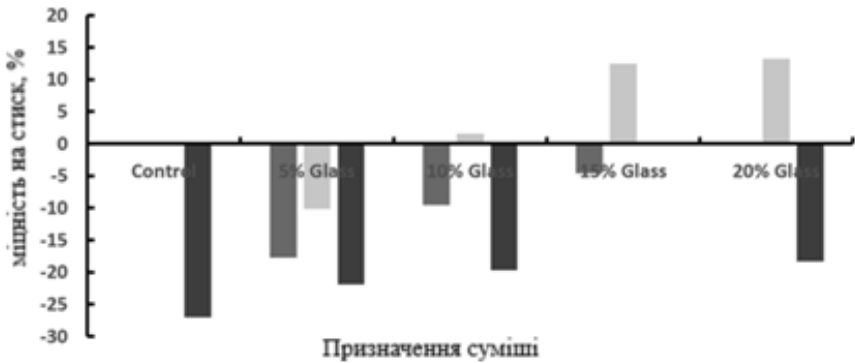


Рис. 5. Вплив W.G.P як заміника цементу на міцність бетону на стиск, випробуваного в лабораторних умовах при кімнатній температурі та після впливу підвищеної температури

Міцність на згин і момент руйнування. Міцність на згин усіх випробуваних зразків була порівняна до і після впливу високих температур, як показано на рисунку 6 контрольний зразок, який не містив скляного порошку, мав зниження міцності на згин на 6,37%. Однак зразки з 15% і 20% вмістом скляного порошку мали збільшення згинального моменту на 15,58% і 21,24% відповідно. З іншого боку, зразки з 5% і 10% вмістом скляного порошку мали зменшення згинального моменту на 31,44% і 7,88% відповідно. Було виявлено, що вплив Е.Т. впливає на момент руйнування деяких зразків бетону, а момент руйнування контрольного зразка збільшився на 20,71% після впливу Е.Т. Для порівняння, зразки, що містили 5% і 20% скляного порошку, мали збільшення моменту руйнування на 31,17% і 102,73% відповідно, порівняно з моментом руйнування до впливу Е.Т. З іншого боку, зразки, що містили 10% і 15% скляного порошку, зазнали зменшення моменту руйнування на 28,05% і 56,91% відповідно після впливу Е.Т. Ці результати свідчать про те, що вплив Е.Т. на момент руйнування бетонних зразків, що містять скляний порошок як часткову заміну цементу, може варіюватися залежно від кількості використаного скляного порошку.

Поведінка бетонних зразків під навантаженням. Результати досліджень, представлені на рисунках 7 і 8, демонструють вплив додавання скляного порошку як часткової заміни цементу на поведінку бетонних балок під навантаженням. На рисунку 5 показано, що використання скляного порошку збільшує згин при збільшенні навантаження в нормальних умовах. Однак на рисунку 8 показано, що після впливу Е.Т. додавання скляного порошку призводить до зменшення прогину при збільшенні навантаження. Дані в таблицях 3 і 4 підтверджують це спостереження, оскільки прогин бетонних балок, що містять різний відсоток скляного порошку, мав вищі середні

значення порівняно з контрольною балкою за нормальних умов навантаження, тоді як після впливу Е.Т. було зафіксовано нижче середнє значення. Прогин балок, що містять 5%, 10%, 15% і 20% скляного порошку збільшився на +44,0%, +24,7%, +11,6% і +20,3% відповідно за нормальних умов навантаження, а зменшився на -23,0%, +0,7%, -24,3% і -15,85% відповідно після впливу Е.Т.

В цілому, ці результати свідчать про те, що використання скляного порошку як часткової заміни цементу в бетонних балках може мати значний вплив на поведінку матеріалу під навантаженням, особливо в умовах Е.Т.

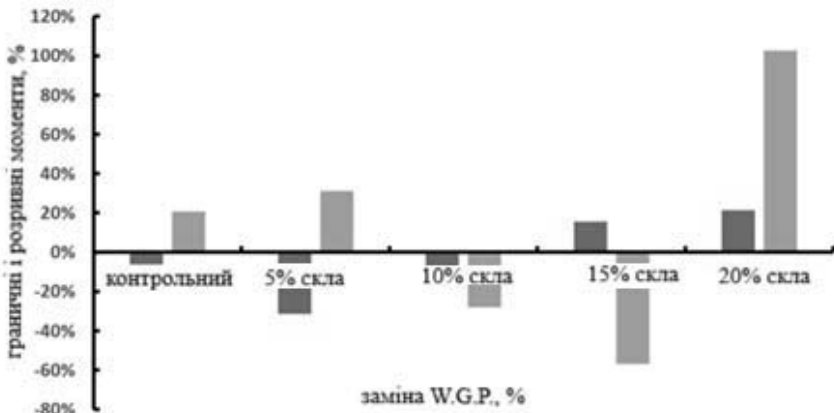


Рис. 6. Варіація граничних моментів і моментів розриву до і після впливу підвищеної температури

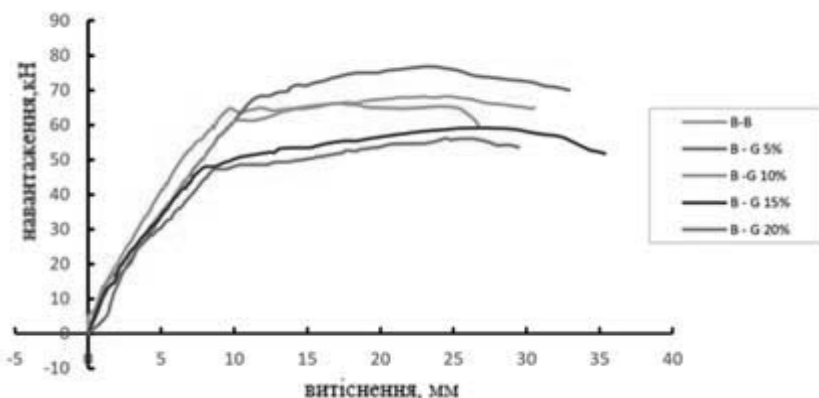


Рис. 7. Криві навантаження-прогину для балок, випробуваних перед впливом Е.Т.

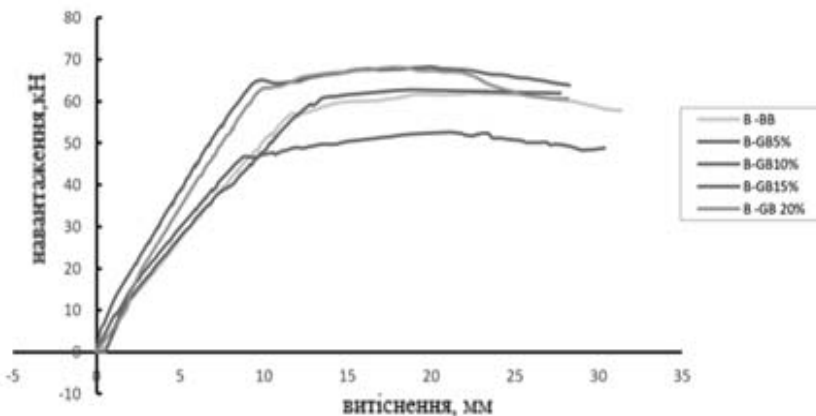


Рис. 8. криві навантаження-прогину для балок, випробуваних після впливу Е.Т.

Жорсткість при робочому навантаженні Згідно з дослідженнями, жорсткість при робочому навантаженні (SL) означає здатність конструкції або матеріалу протистояти деформації під дією навантаження, що становить 70% від руйнівного навантаження. SL визначається як відношення робочого навантаження, що діє на конструкцію або матеріал, до отриманої деформації. На жорсткість конструкції або матеріалу можуть впливати різні фактори, включаючи її геометрію, властивості матеріалу та тип навантаження. У таблиці 3 та таблиці 4 показано вплив вмісту скляного порошку на жорсткість випробуваних балок при робочому навантаженні до та після впливу підвищеної температури. Результати показують, що жорсткість зразків, що містять скляний порошок (5%, 10%, 15% і 20%) в експерименті, зменшилася на 19,70%, 17,52%, 20,16% і 29,69% відповідно в порівнянні з жорсткістю зразків з 0% вмістом скла вміст порошку. Однак після впливу Е.Т. жорсткість цих зразків збільшилася. Величина цього збільшення варіювалася залежно від кількості скляного порошку, використаного в зразках. Жорсткість зразків, що містили 5%, 10%, 15% і 20% скляного порошку, збільшилася на 10,23%, -4,90%, 45,23% і 30,34% відповідно. Варто зазначити, що жорсткість зразків, що містили 10% скляного порошку, дещо зменшилася після впливу Е.Т., тоді як жорсткість інших зразків значно збільшилася. Контрольний зразок, який не містив скляного порошку, мав зменшення жорсткості на 35,75% при робочому навантаженні. Однак зразки з 15% і 20% вмістом скляного порошку мали збільшення жорсткості при експлуатації на 16,74% і 19,01% відповідно. З іншого боку, зразки з 5% і 10% вмістом скляного порошку мали зменшення жорсткості на 11,82% і 25,91% жорсткість при експлуатації, відповідно. Усі відсотки скла демонстрували зниження жорсткості при експлуатації після

впливу Е.Т., але це зниження було меншим, ніж у контрольного зразка.

Характер тріщин і режими руйнування. На рисунку 9 і 10 показано характер тріщин балок, випробуваних до руйнування до і після впливу Е.Т. Незважаючи на збільшення початкового утворення тріщин в умовах Е.Т., використання порошкового скла як часткової заміни цементу не мало істотного впливу на характер тріщин, спостережуваний у випробуваних балках. Ці тріщини мали

розгалужену та дифузну структуру, простягалися від нижньої поверхні до центру опорної плити та демонстрували пластичний режим руйнування з чистою структурою тріщин від згину в середині прольоту з найвищим моментом згину. У заключенні, використання порошкового скла як часткової заміни цементу в бетоні може вплинути на поведінку початкового розтріскування матеріалу. Проте, це може не суттєво змінити загальні характеристики розтріскування.

Таблиця 3

Підсумок результатів щодо впливу жорсткості до впливу Е.Т.

Позначення балки	Позначення суміші	Навантаження (кН)	Відхилення при навантаженні (мм)	Жорсткість при навантаженні (кН/мм)	Нижні граничні межі
V-BB	контрольний	46,38	5,80	8,00	-
V-GB5%	Скло 5%	53,73	8,36	6,43	19,70
V-GB10%	Скло 10%	47,75	7,23	6,60	17,52
V-GB15%	Скло 15%	41,35	6,47	6,39	20,16
V-GB20%	Скло 20%	39,26	6,98	5,63	29,69

Таблиця 4

Підсумок результатів щодо впливу жорсткості

Позначення балки	Позначення суміші	Навантаження (кН)	Відхилення при навантаженні (мм)	Жорсткість при навантаженні (кН/мм)	Нижні граничні межі
V-BB	контрольний	43,43	8,45	5,14	-
V-GB5%	Скло 5%	36,83	6,50	5,67	10,23
V-GB10%	Скло 10%	44,00	9,00	4,89	-4,90
V-GB15%	Скло 15%	47,78	6,40	7,46	45,23
V-GB20%	Скло 20%	47,61	7,11	6,70	30,34



(а) позначення балки В-В



(б) позначення балки В-G5%



(с) позначення балки В-G10%



(д) позначення балки В-G15%



(е) позначення балки В-G20%

Рис. 9. Схеми тріщин для балок, випробуваних до впливу Е.Т.



(а) позначення балки В-ВВ



(б) позначення балки В-GB5%



(в) позначення балки В-G10%



(г) позначення балки В-G15%



(е) позначення балки В-G20%

Рис. 10. Схеми тріщин для балок, випробуваних після впливу Е.Т.

Висновки та рекомендації. На основі результатів експерименту зроблено наступні висновки:

1. Використання скляного порошку як часткової заміни цементу знизило технологічність бетонних сумішей.

2. У порівнянні з кубами, витриманими та випробуваними при лабораторній температурі, всі суміші, випробувані після впливу підвищеної температури, показали зниження міцності на стиск з максимальним значенням при 0% заміщенні відходів скла та мінімальним при 15% заміщенні суміші.

3. Усі суміші, випробувані після впливу підвищеної температури, показали збільшення міцності на стиск зі збільшенням відсотка заміщення склопорошку відходів, за винятком 5% порівняно з 0% заміщенням суміші.

4. Межа міцності на згин бетонних балок з 5% і 10% вмістом скляного порошку збільшилася при нормальній температурі, але зменшилася для бетонних балок з 15% і 20% вмістом скляного порошку в порівнянні з контрольною сумішшю з 0% вмістом.

5. Межа міцності на згин бетонних балок з 10%, 15% і 20% вмістом скляного порошку збільшилася після впливу підвищеної температури, тоді як для бетонних зразків з 5% вмістом скляного порошку вона зменшилася порівняно з контрольною сумішшю з 0% вмістом.

6. Після впливу високих температур бетонні контрольні балки показали зменшення згинального моменту, тоді як бетонні балки з 15% і 20% вмістом скляного порошку показали збільшення згинального моменту. Однак бетонні зразки з 5% і 10% вмістом скляного порошку показали зменшення згинального моменту, міцність.

7. Балки, витримані та випробувані при лабораторній температурі, додавання скляного порошку до бетонної суміші зменшило початкове навантаження на розрив для концентрацій 5%, 10% та 20%. Концентрація 15% призвела до

початкового навантаження на розрив, яке було на 50% вищим, ніж у контрольної суміші.

8. Підвищена температура має різний вплив на початкове навантаження на бетонні балки, що призводить до утворення тріщин. Контрольна балка показала зменшення початкового навантаження, що призводить до утворення тріщин, тоді як зразки з 5% і 15% вмістом скляного порошку показали збільшення, а балки з 10% і 20% вмістом скляного порошку показали зменшення.

9. Прогин бетонних балок, що містять різний відсоток склопорошку, показав вищу середню величину, ніж контрольна балка за нормальних умов навантаження. Але нижчу середню величину після впливу підвищеної температури.

10. Жорсткість бетонних балок, що містять скляний порошок (5%, 15% і 20%), зменшилася в ході експерименту. Однак після впливу підвищеної температури жорсткість цих зразків збільшилася. Жорсткість бетонних балок,

що містять 10% скляного порошку, дещо зменшилася після впливу підвищеної температури в порівнянні з контрольною балкою.

11. Жорсткість контрольних бетонних балок зменшилася при високих температурах, тоді як бетонні балки з 15% і 20% вмістом скляного порошку продемонстрували збільшення жорсткості. Однак бетонні балки з 5% і 10% вмістом скляного порошку продемонстрували зменшення жорсткості за тих самих умов.

1. P.Chindaprasrt, T.Cao Setting, segregation and bleeding of alkali-activated cement, mortar and concrete binders / Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, WP, 2015, p.p.113-131.

2. Krivenko P., Petropavlovskii O., Vozniuk H., Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures / Procedia Engineering 195 (2017), p.p. 142-146.

3. ДСТУБВ.2.7-185:2009 "Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму".DSTU B V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu.

DSTUBV.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu".DSTU B V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu.

4. Berdnyk O Yu, Lastivka O V, Maystrenko A A, Amelina N O. Processes of structure formation and neoformation of basalt fiber in an alkaline environment. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 020). – Vol. 907. – 012036. (Scopus) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	11.03.2026	Received	11.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	19.03.2026	Received in revised form	19.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.