

М. С. Стечишин, М. А. Саницький, О. Р. Позняк, Г. Г. Бігун
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельного виробництва,
кафедра автомобільних шляхів

ФІБРОАРМОВАНІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ БЕТОНИ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ

© Стечишин М. С., Саницький М. А., Позняк О. Р., Бігун Г. Г., 2016

Показано можливість одержання самоущільнювальних бетонів, що містять велику кількість додаткових цементувальних матеріалів, зокрема золи винесення. Наведено результати досліджень реологічних властивостей фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з високим вмістом золи винесення та добавками, що регулюють текучість та в'язкість бетонних сумішей. Встановлено, що заміна 55, 70 та 85 мас. % в'язучого золю винесення дає змогу одержувати самоущільнювальні бетонні суміші з класом за розпливом конуса $SF2$, умовною в'язкістю $T_{500} = 5$ с та повітрязахопленням 0,4 %. Показано, що заміна 55 мас. % цементу золю винесення та введення 0,5 % базальтової фібри дає змогу одержати самоущільнювальний бетон з міцністю 41,8 МПа через 28 діб тверднення в нормальних умовах, а бетони з вмістом 85 мас. % золи винесення у складі в'язучого характеризуються міцністю 25,4 МПа. Результати досліджень показали позитивний вплив армування базальтовими волокнами самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення, зокрема підвищення міцності, зменшення відносних деформацій за сталого напруження, збільшення призмової міцності та зменшення коефіцієнта Пуассона. Технологія самоущільнювального бетону дає можливість швидше і безпечніше надавати форму будівельним об'єктам порівняно з використанням бетону із звичайними властивостями.

Ключові слова: самоущільнювальний бетон, базальтова фібра, зола винесення, міцність, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона.

The possibility of obtaining Self-Compacting Concrete with a large amount of supplementary cementitious materials, including fly ash is shown in this article. Research results of rheological properties of fiber reinforced Self-Compacting Concretes with high volume of fly ash and chemical admixtures, which regulate fluidity and viscosity of concrete mixes, are shown. It was established that the replacement of 55, 70 and 85 wt. % of binder with fly ash allows to obtain Self-Compacting Concrete mixes with the consistency class $SF2$, viscosity $T_{500} = 5$ s and the volume of entrained air 0,4 %. It is shown that the replacement of 55 wt. % of cement with fly ash and addition of 0,5 % of basalt fiber allows to obtain Self-Compacting Concrete strength of 41,8 MPa after 28 days of hardening in normal conditions and concrete containing 85 wt. % of fly ash in binder composition which characterizes by strength of 25,4 MPa. The results showed a positive effect of basalt fiber reinforcement of Self-Compacting Concrete with high volume of fly ash especially on strength increase, relative deformation reduction at constant stress, increase prism strength and reduce of Poisson coefficient. The technology of Self-Compacting makes it easier and safer to shape construction sites compared with the use of conventional concrete properties.

Key words: Self-Compacting Concrete, basalt fiber, fly ash, strength, Poisson coefficient.

Вступ

Одним з основних завдань сучасного будівництва є виконання проектів у гармонії з природою та дотриманням концепції сталого розвитку, пов'язаної зі застосуванням високофункціональних екологічно чистих матеріалів. У контексті бетону, який є найбільш застосовуваним будівельним матеріалом, необхідно визначити менш дорогі заміники цементу. В останні роки багато досліджень присвячено використанню додаткових цементувальних матеріалів (supplementary cementitious materials (SCM)), таких як зола винесення, мікрокремнезем, метаколін та ін., для покращення властивостей

бетонів та зниження витрат на будівництво [1]. Однією з інноваційних галузей технології бетону є технологія самоущільнювальних бетонів (Self-Compacting Concrete (SCC)). Використання цього матеріалу дає змогу відмовитися від віброущільнення, що, своєю чергою, зменшує енерговитрати й економить час, покращуючи санітарно-гігієнічні умови праці.

Постановка проблеми

Фундаментальними елементами екологічних технологій бетону для підтримки навколишнього середовища відповідно до стратегії сталого розвитку є збереження первинних матеріалів, підвищення довговічності бетонних конструкцій і цілісний підхід до технології [2]. Самоущільнювальний бетон – інноваційний матеріал, який здатний ущільнюватися під дією власної ваги, повністю заповнюючи форму навіть у густоармованих конструкціях, з одночасним збереженням рухливості та здатності до самовільного звільнення від бульбашок повітря, захопленого під час приготування суміші. Самоущільнювальний бетон містить велику кількість додаткових цементуючих матеріалів, суперпластифікатора та добавки, що регулює в'язкість бетонної суміші. Характеристики цього бетону (великий вміст цементного тіста та мінеральних наповнювачів, співвідношення крупного та дрібного заповнювача близьке до 1), пов'язані з умовами його укладання, можуть змінити його механічну поведінку, порівняно з традиційним бетоном, який вкладається вібруванням. Використання мінеральних добавок, таких як зола виносення, може призвести до збільшення деформацій зсідання такого бетону [3, 4]. На основі наведеного вище, актуальними є дослідження впливу золи виносення як додаткового цементувального матеріалу та фібри на властивості самоущільнювальних бетонних сумішей та бетонів на їх основі. Застосування такого композиту дасть можливість успішно забезпечити влаштування промислових бетонних підлог та ін.

Аналіз останніх джерел і публікацій

Під час розроблення нових рецептур бетонних сумішей, крім класичних вимог, все більшого значення набуває довговічність бетону та споживання енергії на його виробництво. Для підтримання екологічного балансу вирішальну роль відіграє вміст портландцементного клінкеру в складі бетонної суміші. Для сучасних бетонів підвищуються вимоги щодо текучості і можливості їх самоущільнення, тому в складі бетонної суміші потрібно використати дрібнодисперсний наповнювач. Особливу увагу в цьому разі необхідно звернути на такий матеріал, як зола виносення, який у певний час розцінюється як відходи виробництва [5].

Зола виносення переважно використовується в бетоні в кількості 15–25 мас. %, хоча її вміст може варіюватися в широких межах залежно від властивостей золи та умов експлуатації бетону. За високого вмісту золи виносення спостерігається сповільнення набору ранньої міцності і затримка темпів будівництва. Для кожного конкретного випадку обирається оптимальна кількість золи виносення, яку можна використати в бетонній суміші і максимально забезпечуватиме технічні, екологічні та економічні переваги від її використання без істотного впливу на темпи будівництва та зниження довговічності конструкцій [3].

Технологія самоущільнювального бетону дає змогу швидше і безпечніше надавати форму будівельним об'єктам порівняно з використанням бетону із звичайними властивостями. У випадку з самоущільнювальним бетоном надання форми бетонним елементам виконується набагато простіше, а результат розширює свободу дій під час використання затверділого бетону. Однією з модифікацій такого композиту є додавання в бетонну масу різних волокон як дисперсного армування, що дає змогу збільшити міцність цементної матриці на розтяг, її тріщиностійкість, ударну в'язкість та забезпечує його надійну експлуатацію [5].

Механічні властивості фіброармованих цементних композицій є результатом синергічної взаємодії між властивостями бетонної матриці й ефектом їх підсилення, що надає дисперсне армування. Ефект підсилення залежить від розмірів, геометрії і дозування волокон, їх міцності, розподілу й орієнтації відносно прикладеного навантаження та зв'язків волокно-матриця [6]. Схематичне зображення структури фіброармованого бетону подано на рис. 1.

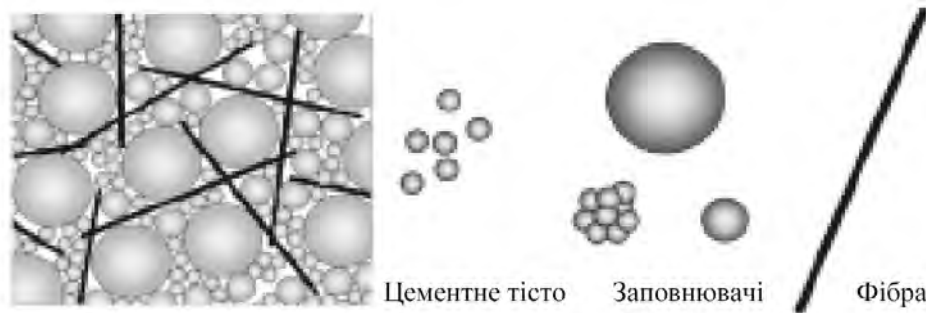


Рис. 1. Структура фіброармованого бетону

Різке збільшення цін на традиційну сталеву арматуру на міжнародних ринках зумовлює необхідність пошуку рішень, які обмежували б використання сталі. Фібра може ефективно замінити армування стержневою арматурою в плитних конструкціях промислових підлог, покриттях автомобільних доріг та згинальних елементах. Аналітики ринку вказують на значне зростання споживання сталі в Китаї та Індії як важливий чинник у зростанні цін на сталеву продукцію на міжнародних ринках. Вагомим аргументом використання синтетичної дисперсної арматури є простота її використання.

На цей час стримувальними чинниками під час впровадження армування бетонних виробів скляним, полімерним, металевим волокнами є низька хімічна стійкість цих волокон у середовищі твердого цементного тіста, висока вартість синтетичних волокон за їхньої низької ефективності, дефіцит металеві фібри. Усі перераховані вище недоліки повністю відсутні у базальтової фібри. За широкого застосування залізобетону особливої уваги заслуговують композиційні матеріали, в яких роль матриці виконує цементний камінь, одержаний на базі портландцементу, а як арматуру використовують базальтові волокна. Використання базальтової фібри дає змогу великою мірою компенсувати головні недоліки бетону – низьку міцність під час розтягування і крихкість руйнування. Під час застосування базальтової фібри підвищується морозостійкість, теплостійкість, стійкість до стирання, вологостійкість матеріалу, забезпечується тримірне армування, знижуються усадкові деформації, значно зростає тріщиностійкість, ударна в'язкість, діелектричність та ін. [7, 8].

Метою роботи є розроблення фіброармованих самоущільнювальних бетонів з базальтовою фіброю та високим вмістом золи винесення, дослідження технологічних властивостей бетонних сумішей та експлуатаційних характеристик затверділого бетону.

Методи досліджень і матеріали

Для приготування фіброармованих самоущільнювальних бетонів під час проведення експериментальних досліджень використовували портландцемент ПЦ II/A-III-500 виробництва ВАТ “Волинь-цемент” з такими характеристиками: питома поверхня $S_{\text{пит}} = 395 \text{ м}^2/\text{кг}$, залишок на ситі № 008 – 1,2 мас. %, початок тужавіння – 2 год 30 хв, кінець – 4 год 00 хв, границя міцності на стиск через 2; 7 та 28 діб – 18,5; 29,1 та 52,5 МПа відповідно.

Армувальним елементом слугувала базальтова фібра РБР-18-Т10/24 ТзОВ “Технобазальт-Інвест” (м. Київ) довжиною волокна 24 мм, діаметром 18 мкм, виготовлена з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009, яка забезпечує тримірне армування суміші.

Як дрібні заповнювачі до самоущільнювального бетону використовували кварцовий пісок Жовківського родовища Львівської області з модулем крупності $M_{\text{кр}} = 1,77$ та щебвідсів фракції 2–5 мм з модулем крупності $M_{\text{кр}} = 4,97$. Крупним заповнювачем для приготування бетонів слугував гранітний щебінь Віровського родовища фракції 5–20 мм з насипною густиною – $1480 \text{ кг}/\text{м}^3$, пустотністю – 43,5 %, істинною густиною – $2,62 \text{ г}/\text{см}^3$, дробимістю $D_r = 8 \%$, без глинистих та пилюватих домішок.

Як додатковий цементувальний матеріал використовували золу-винесення Бурштинської ТЕС з такими властивостями: істинна густина – $2,21 \text{ г}/\text{см}^3$, насипна густина – $870 \text{ кг}/\text{м}^3$, залишок на ситі № 008 – 8,7 мас. %, хімічний склад, мас. %: $\text{SiO}_2 - 54$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 23,75$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} - 13,8$; $\text{MgO} - 1,91$; $\text{CaO} - 4,98$; $\text{SO}_3 - 0,53$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - 0,25$.

З метою надання бетонним сумішам високих показників рухливості та її збереження в часі до їх складу вводили суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі Basf Glenium ACE 430 (ПК).

Технологічні та будівельно-технічні властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонів визначали згідно зі спеціальними методами оцінювання їхньої якості, чинних стандартів та загальноприйнятих методик.

Результати досліджень

Дослідження впливу золи виносення проводили на самоущільнювальних бетонах, склад яких подано масовим співвідношенням компонентів 1:1,1:2,2, В/В = 0,32, загальна витрата в'язучої речовини на 1 м³ бетону становила 520 кг. Під час проведення досліджень вміст золи виносення у складі в'язучого приймали 55, 70 та 85 мас. %. Результати впливу золи виносення та базальтової фібри на властивості самоущільнювальних бетонних сумішей подано в табл. 1.

Таблиця 1

Вплив золи виносення на властивості самоущільнювальних бетонних сумішей

Вміст золи виносення, мас. %	Вміст фібри, %	Розплив конуса, мм	Умовна в'язкість, T_{500} , с	Повітрязахоплення, %
55	–	720	5,0	0,4
70	–	700	5,0	0,4
85	–	680	6,0	0,4
55	0,5	730	6,0	0,35
70	0,5	700	5,5	0,35
85	0,5	730	5,5	0,4

Як видно з табл. 1, розплив конуса самоущільнювальних бетонних сумішей з добавкою золи виносення становить 680–720 мм, введення 0,5 % базальтової фібри практично не впливає на зміну легкоукладальності самоущільнювальної бетонної суміші. Такі самоущільнювальні бетонні суміші за розпливом конуса можна зарахувати до класу *SF2* (Slump-flow 660–750 мм). Крім високої текучості, суміш повинна мати достатню в'язкість, щоб уникнути розшарування. Умовну в'язкість самоущільнювальних бетонних сумішей оцінювали за часом розтікання до розпливу конуса 500 мм (T_{500}). Умовна в'язкість самоущільнювальних бетонних сумішей з різним вмістом золи виносення та базальтової фібри знаходиться в межах 5–6 с, що відповідає вимогам до самоущільнювальних бетонів і дає змогу зарахувати такі суміші до класу за умовною в'язкістю *VS2* ($T_{500} \geq 2$ с). Треба зазначити, що введення базальтової фібри не спричиняє значної зміни повітрязахоплення бетонних сумішей, середня густина одержаних самоущільнювальних бетонів знаходиться в межах 2320–2340 кг/м³.

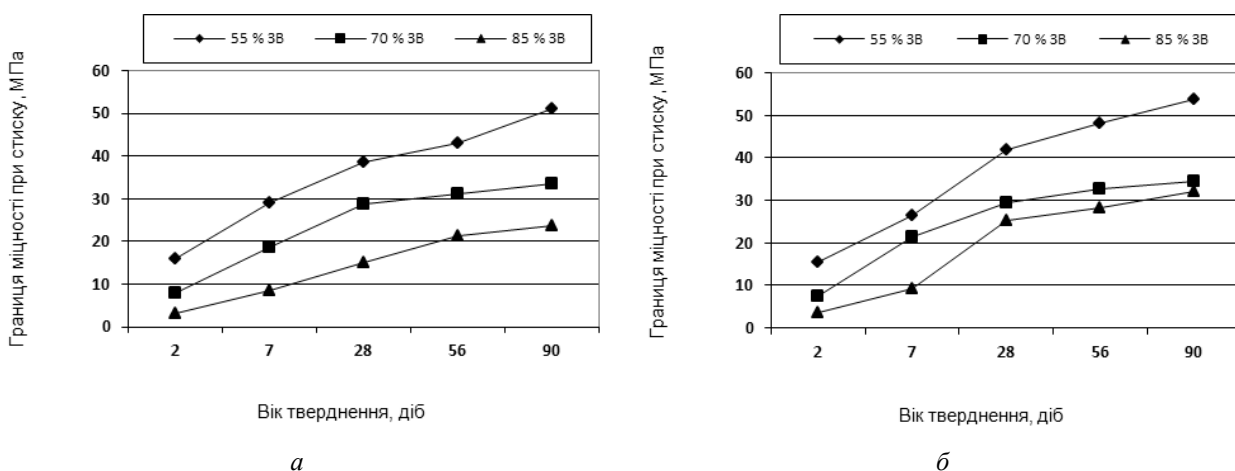


Рис. 2. Міцність самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення:
а – без фібри; б – з 0,5 % базальтової фібри

Заміна 55 мас. % цементу золою винесення дає змогу одержати самоущільнювальний бетон з міцністю 38,7 МПа через 28 діб тверднення в нормальних умовах, введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зростання міцності такого бетону до 41,8 МПа ($\Delta R = 10,8 \%$) (рис. 2). Для бетонів з вмістом 85 мас. % золи винесення через 28 діб тверднення в нормальних умовах міцність становить 15,0 МПа, введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зростання міцності до 25,4 МПа ($\Delta R = 69 \%$).

Підвищений вміст розчинової частини, характерний для самоущільнювальних бетонів, зумовлює підвищену їх деформативність. Традиційно бетони з литих сумішей характеризуються меншими величинами модуля пружності, підвищеними значеннями коефіцієнта Пуассона, поздовжніх та поперечних деформацій порівняно з самоущільнювальними бетонами. Деформативні та фізико-механічні властивості визначали під час випробування шести серій призм $100 \times 100 \times 400$ мм та кубів $100 \times 100 \times 100$ мм самоущільнювальних бетонів з вмістом золи винесення 55, 70 та 85 мас. % без фібри та з базальтовою фіброю через 90 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження $\sim 0,6 P_p$ (P_p – руйнівне навантаження). Як показали результати досліджень, призмova міцність самоущільнювальних бетонів через 90 діб досягає 80–90 % кубикової (табл. 2). Визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетонів проведено за рівня навантаження 30 % від руйнівного ($\sigma = 0,3P_p/S$).

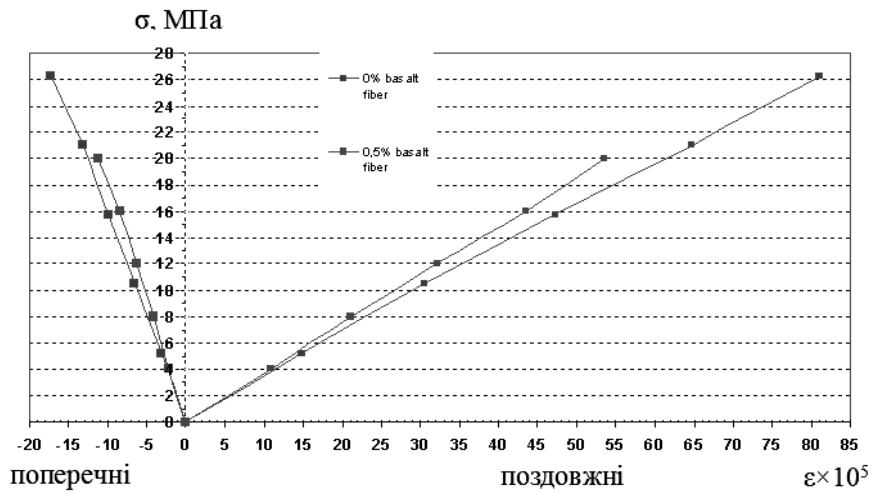
Таблиця 2

Показники деформативності самоущільнювальних бетонів
(після 90 діб тверднення зразків у нормальних умовах)

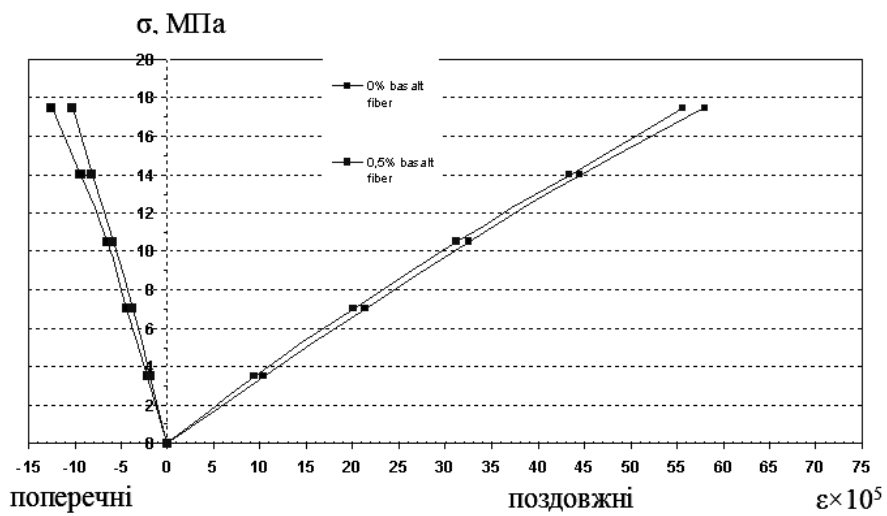
Вміст золи винесення, мас. %	Вміст фібри, %	Призмova міцність, $f_{ck, prism}$, МПа	Кубикова міцність, $f_{cm, cube}$, МПа	Модуль пружності, E_{cm} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, ν
55	–	42,9	51,1	35,7	0,20
70	–	30,8	33,4	32,5	0,21
85	–	20,0	23,8	22,8	0,22
55	0,5	43,5	53,8	38,6	0,19
70	0,5	31,5	34,5	35,7	0,14
85	0,5	21,0	28,3	23,0	0,14

Дослідження деформативних властивостей самоущільнювальних бетонів свідчать, що призмova міцність бетонів з вмістом золи винесення 55, 70 та 85 мас. % становить відповідно 42,9, 30,8 та 20,0 МПа, тоді як під час введення 0,5 % базальтової фібри вона зростає до 43,5, 31,5 та 21,0 МПа відповідно. Модуль пружності самоущільнювальних бетонів з вмістом золи винесення 55, 70 та 85 мас. % під час введення 0,5 % базальтової фібри зростає від 35,7, 32,5 22,8 до 38,6, 35,7, 23,0 ГПа відповідно, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,20, 0,21, 0,22 до 0,19 та 0,14 відповідно.

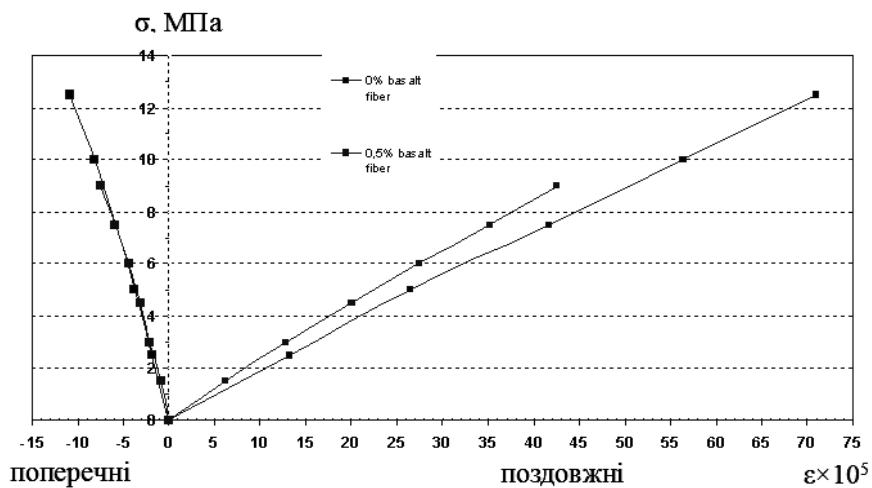
На рис. 3 наведено залежність поздовжніх та поперечних деформацій бетонів від прикладеного навантаження через 90 діб тверднення в нормальних умовах. Самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи винесення без фібри характеризуються підвищеними деформаціями під дією навантаження порівняно із самоущільнювальними бетонами з добавкою базальтового волокна. Як відомо [6], використання базальтової фібри покращує механічні властивості самоущільнювальних бетонів. Дослідженнями впливу базальтової фібри на властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з високим вмістом золи виносу встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ за сталого значення відносних деформацій ϵ . Так, під час заміни 55 мас. % цементу золою винесення та введенні 0,5 % базальтової фібри за значення відносних деформацій $\epsilon = 10 \dots 50 \cdot 10^{-5}$ забезпечується збільшення напружень σ на 7,3–10,1 % порівняно з бетонами без фібри. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 70 мас. % золи винесення цей показник знаходиться в межах 0,9–5,6 %. За заміни 85 мас. % цементу золою винесення під час введення 0,5 % базальтової фібри збільшення напружень на 4,5–13,1 % становить за значення відносних деформацій $\epsilon = 10 \dots 35 \cdot 10^{-5}$.



a



b



v

Рис. 3. Діаграма залежності між напруженнями і деформаціями в самоущільнювальних бетонах з вмістом золи виносення:
 а – 55 мас.%; б – 70 мас.%, в – 85 мас.%

На графіках можна виділити прямолінійні ділянки, що свідчить про роботу бетону в пружній стадії. Зі зростанням навантаження в бетоні розвиваються пластичні деформації, що характеризується на графіках криволінійною залежністю. Так, базальтова фібра забезпечує зростання внутрішніх напружень за сталих відносних деформаціях самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення.

Висновок

Дослідженнями реологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей з високим вмістом золи виносення встановлено, що заміна 55, 70 та 85 мас. % в'язучого золю виносення дає змогу одержувати бетонні суміші з класом за розпливом конуса $SF2$ (680–730 мм), умовною в'язкістю $T_{500} = 5$ с (клас за умовною в'язкістю $VS2$) та повітрязахопленням 0,4 %. Заміна 55 мас. % цементу золю виносення та введення 0,5 % базальтової фібри дає змогу одержати самоущільнювальний бетон з міцністю 41,8 МПа через 28 діб тверднення в нормальних умовах, а бетони з вмістом 85 мас. % золи виносення у складі в'язучого характеризуються міцністю 25,4 МПа. Армування самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення базальтовими волокнами забезпечує зростання напружень за сталого значення відносних деформацій порівняно із самоущільнювальними бетонами без добавки базальтового волокна. Розроблені фіброармовані самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи виносення можна застосовувати під час влаштування промислових підлог, що дасть змогу одержувати якісну поверхню із меншими енергетичними затратами.

1. Szwabowski J. *Technologia betonu samozageszczalnego* / J. Szwabowski, J. Golaszewski. – Krakow : Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2010. – 160 p. 2. Dinakar P. *Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes* / P. Dinakar, K. G. Babu, Manu Santhanam // *Cement & Concrete Composites*. – 2008. – № 30. – P. 880–886. 3. Thomas M. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete* / *Portland Cement Association* – 2014. – № 2. – P. 1–24. 4. Пути создания самоуплотняющихся бетонов / [С. В. Коваль, Д. М. Поляков, М. Ситарски, М. Цуак] // *Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб.* – К. : НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 232–238. 5. Поляков Д. М. *Самоуплотняющийся бетон с карбонатным наполнителем. Автореф. дисс. канд. техн. наук.* – Одесса : ОГАСА, 2010. – 17 с. 6. Khayat K. *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete.* / Kamal Khayat, Geert De Schutter. – Springer Science & Business Media, 2014 – 290 p. 7. Corinaldesi V. *Durable fiber reinforced self-compacting concrete* // Corinaldesi V., Moriconi G. / *Cement and Concrete Research*. – 2004. – № 34. – P. 249–254. 8. Ghanbari A. *Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete* / A. Ghanbari, B. L. Karihaloo // *Cement and Concrete Research*. – 2009. – № 39. – P. 1209–1216. 9. Poznyak O. R. *Properties of self-compacting concrete with basalt fiber* / O. R. Poznyak, I. I. Kirakevych, M. S. Stechyshyn // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва”*. – 2014. – № 781. – С. 149–153. 10. Поникиевский Т. *Реологические свойства свежего самоуплотняющегося бетона, армированного стальным волокном* / Томаш Поникиевский // *Международное бетонное производство*. – 2010. – № 5. – С. 42–50.