

ЗАСТОСУВАННЯ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО БЕТОНУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТІВ

Бугасівський С. О., Назаренко І. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто вимоги до складу компонентів самоущільнювальної бетонної суміші та їх вплив на забезпечення заданих експлуатаційних характеристик СУБ. Здійснено аналіз класифікації СУБС. Наведено відмінності самоущільнювальної бетонної суміші від звичайної. Запропоновано спосіб улаштування монолітної залізобетонної плитної прогонової будови полегшеного типу, який дозволяє значно прискорити процес бетонування завдяки укладанню самоущільнювальної бетонної суміші в один етап, а також принципові конструктивні рішення прогонових будов із вкладками-порожнинуутворювачами з пінополістиролу. Використання вкладишів дає змогу зменшити витрату бетону та власну вагу прогонової будови до 30–45 %.

Ключові слова: самоущільнювальна бетонна суміш, самоущільнювальний бетон, фізико-механічні властивості, вкладки-порожнинуутворювачі, плитні прогонові будови, пінополістирол, монолітний залізобетон.

Вступ

Ми живемо в епоху, коли науковий та технічний прогрес стрімко розвивається. Сучасний технологічно розвинений світ стає все більш досконалим, а нові тренди в будівництві орієнтовані на низьку ціну, екологічність, швидкість та простоту монтажу. Саме тому будівельні матеріали нового покоління здійснюють одну з основних функцій під час будівництва.

Бетоном нового покоління з високими технологічними й експлуатаційними властивостями в сучасному інноваційному будівництві є самоущільнювальний бетон. Такі бетони визначаються швидкими темпами набору міцності, високими фізико-механічними характеристиками, вони належать до класу «високофункціональних бетонів» (High Performance Concretes), але їх застосування в процесі будівництва та відновленні залізобетонних мостів, зокрема прогонових будов, в Україні ще не розповсюджено.

Аналіз публікацій

У європейських спеціалізованих журналах кожного року з'являється велика кількість публікацій, в яких аналізують самоущільнювальний бето це свідчить про те, що дослідження бетону є актуальним питанням для вчених багатьох країн світу [1–5]. Використовуються різноманітні назви та скорочення для визначення поняття самоущільнювальний бетон [6–8, 9], деякі з них наведено на рис. 1. Впровадження самоущільнювальних бетонних сумішей (СУБС) та самоущільнювальних бетонів (СУБ) здійснюється

завдяки науковцям та фахівцям-будівельникам Японії, США та країн Європейського Союзу В Україні застосування самоущільнювального бетону в будівництві різноманітних залізобетонних конструкцій і споруд тільки починає розвиватися.

Розроблення теоретичних і технологічних основ отримання самоущільнювальних бетонів із покращеними експлуатаційними властивостями, теоретичне й експериментальне дослідження самоущільнювального бетону є темою великої кількості наукових робіт [10–14, 15, 16].

Переваги та особливості СУБ нами наведено в табл. 1. Завдяки цим особливостям СУБ застосовують під час таких видів робіт [17, 18]:

- для підсилення залізобетонних будівель і споруд, а також мостів;
- для залізобетонних конструкцій з якісною поверхнею (наприклад, фасадні поверхні прогонових будов мостів), на якій не потрібне додаткове оброблення;
- для будівництва високоміцних залізобетонних конструкцій із мінімальною загальною вагою (конструкції з армуванням попередньо напруженою арматурою);
- під час бетонування залізобетонних споруд великої висоти (наприклад, хмарочосів) або розташованих посеред водної перешкоди (наприклад, пілони підвісних мостів), коли процес ущільнення ускладнений, потребує значних технологічних засобів і небезпечний для персоналу;
- під час бетонування густоармованих конструкцій (наприклад, прогонові будови

мостів), де рухливість товарного бетону не є достатньою для заповнення всього об'єму опалубки, що може призвести до появи дефектів і передчасної корозії арматури;

- під час бетонування архітектурних залізобетонних конструкцій складної геометричної форми.

Окремого нормативного документа щодо рекомендацій виготовлення СУБ, а також

методів визначення властивостей самоущільнювальних сумішей та бетонів для бетонування залізобетонних мостів в Україні не існує. Тому під час здійснення досліджень та виробництва СУБ найчастіше користуються нормативними документами, які розроблені в інших країнах, деякі з них наведено в табл. 2 [6–9].

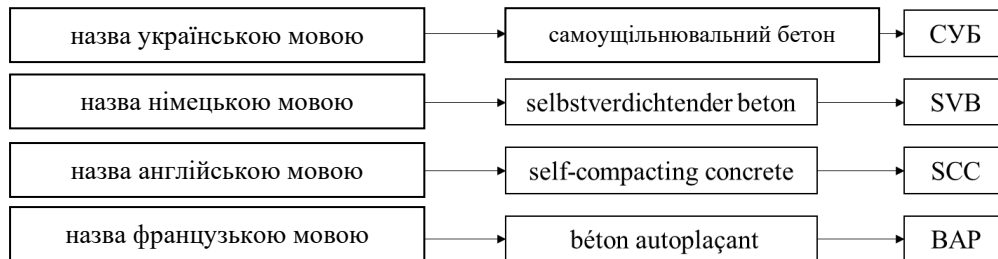


Рис. 1. Приклади назви само ущільнювального бетону в країнах Європи

Таблиця 1 – Особливості самоущільнювального бетону

Особливості СУБ	Вплив на технологію бетонування	Наслідки застосування СУБ
Застосування безвібраційної технології бетонування; можливість роботи персоналу в більш безпечних умовах під час процесу бетонування	Самостійне розтікання бетонної суміші вздовж всієї опалубки забезпечує формування конструкції без застосування інтенсивних механічних впливів	Знижує рівень шумового впливу на людину та на навколишнє середовище, як порівняти зі звичайним бетонуванням, що є актуальним для процесу бетонування в населених пунктах; спрощення технології бетонування
Зменшення трудових витрат; збільшення швидкості бетонування конструкцій або споруди	Зменшення часу на укладання бетонної суміші та відсутність технологічних процесів її ущільнення	Більш висока ефективність капіталовкладень; скорочення кількості персоналу, що бере участь у процесі бетонування конструкцій; скорочення тривалості будівництва загалом
Зменшення можливості розшарування бетонної суміші; збільшення часу на транспортування	Достатня в'язкість для запобігання розшаруванню; повна відсутність водовідділення	Можливість транспортувати бетонну суміш на великі відстані від бетонного заводу до будівельного майданчика
Більш висока міцність на стискання (до 100 МПа та більше); швидкий набір розпалубної міцності; більш висока щільність бетону	Визначений склад бетонної суміші має більш щільну структуру, яка дозволяє отримати конструкції з повною відсутністю великих пор	Отримання конструкцій з високою міцністю бетону; можливість раннього навантаження конструкцій; скорочення виробничого циклу; збільшення оборотності опалубки
Висока адгезія бетонної суміші до арматури	Висока рухливість бетонної суміші та зчеплення між окремими частинками суміші	Можливість отримувати конструктивні елементи різної геометрії
Модуль пружності на 15 % нижче за модуль пружності звичайного бетону	Через підвищений вміст дрібних пилоподібних частинок у бетонній суміші та знижений вміст щебню, як порівняти зі звичайним бетоном	Необхідно враховувати під час розрахування конструкцій на міцність та деформативність
Більш висока якість зовнішньої поверхні, яка дозволяє отримати ідеально гладку й рівну поверхню	Бетон повторює поверхню опалубки і не має порожнин та каверн	Великий вибір форм конструкцій і можливості надання певного зовнішнього вигляду

Таблиця 2 – Європейські нормативні документи щодо отримання самоущільнювальних бетонів

Назва нормативу	Зміст	Розробник	Примітка
«Specification & Guidelines for Self-Compacting concrete» (Специфікація та посібник з самоущільнювального бетону)	Міститься вся необхідна інформація про бетон для виробників, будівельників та проєктувальників	Компанія EFNARC, 2002 р.	
DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) (Європейський нормативний документ щодо застосування самоущільнювального бетону)	Наведені терміни та зв'язки з іншими європейськими нормативними документами, а також методи діагностики самоущільнювального бетону	«Німецький комітет із залізобетону», Берлін, листопад 2003 р.	Після прийняття цього нормативного документа СУБ офіційно дозволений до використання в Європі (без необхідності будь-яких додаткових дозволів і погоджень)
«The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use» (Європейське керівництво з самоущільнювального бетону)	Наведені узгоджені специфікації бетонних сумішей для виробництва СУБ, методи їх випробування, інформацію про матеріали	П'ять європейських організацій: BIBM, SEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC, 2004 р.	Визначені особливості експлуатації СУБ і вперше здійснена їх класифікація (за розпливанням конуса, за в'язкістю, за здатністю долати перешкоди, за стійкістю до розшарування)
EN 206-9:2010 Concrete - Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC).	Класифікація та методи, які дозволяють визначити в'язкість, здатність заповнювати форму, оцінювати однорідність та схильність до розшарування	2010 р.	

Мета та постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу складових компонентів самоущільнювальної бетонної суміші на забезпечення експлуатаційних властивостей СУБ з огляду на технологію бетонування конструкцій залізобетонних мостів. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати залежність галузі застосування СУБ і класифікації СУБС згідно з аналізом європейських нормативних документів та визначити основні вимоги до складових компонентів СУБС і технології бетонування монолітних залізобетонних прогнових будов мостів.

Вплив складових компонентів СУБС на забезпечення експлуатаційних властивостей СУБ

У сучасному інноваційному будівництві завдяки високим технологічним і експлуатаційним властивостям самоущільнювальний бетон є будівельним матеріалом нового покоління.

Самоущільнювальна бетонна суміш – це бетонна суміш, яка самостійно, тобто без впливу зовнішніх сил ущільнення (вібравання), під впливом власної ваги тече, звільня-

ється від повітря та заповнює простір між опалубкою конструкції та арматурними стрижнями.

СУБС повинна мати такі мінімальні показники:

- розпливання конуса (розтікання) – більше ніж 550 мм;
- час розтікання до діаметра 500 мм – не більше ніж 20 с;
- час витікання бетонної суміші із V-подібної воронки має становити 10–20 с.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон» [19], самоущільнювальна бетонна суміш відповідає марці F5 та F6 (визначається розпливанням стандартного конуса в діапазоні від 560 мм до 640 мм і більше). Тому розглянемо основні показники СУБС і сфери застосування за [7], де наведена класифікація СУБС за розпливанням конуса (рис. 2), за в'язкістю (рис. 3), за здатністю долати перешкоди (рис. 4), за стійкістю до розшарування (рис. 5), а також використання класифікації бетонних сумішей під час вибору сфери застосування СУБ.

На рис. 6 наведено зв'язок між різними властивостями СУБС та сферою застосування (конструкції для бетонування).

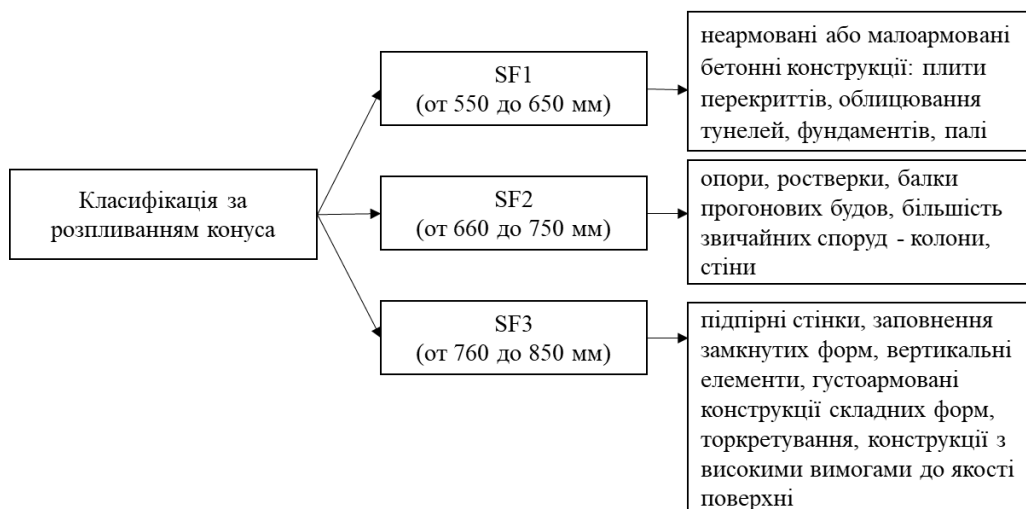


Рис. 2. Класифікація СУБС за розпливанням конуса

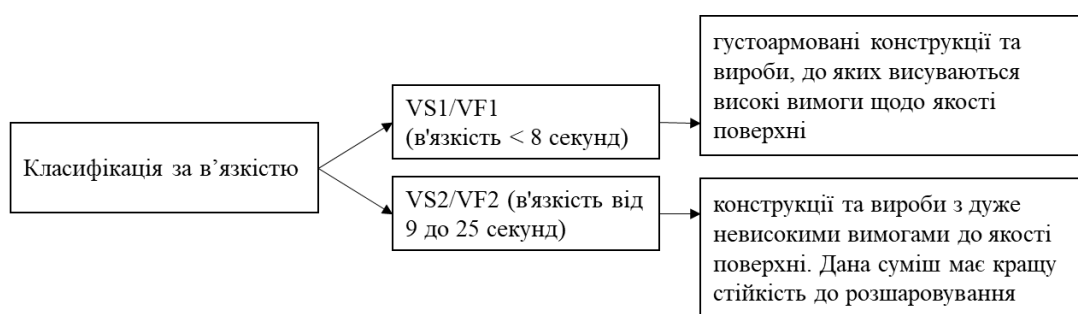


Рис. 3. Класифікація СУБС за в'язкістю

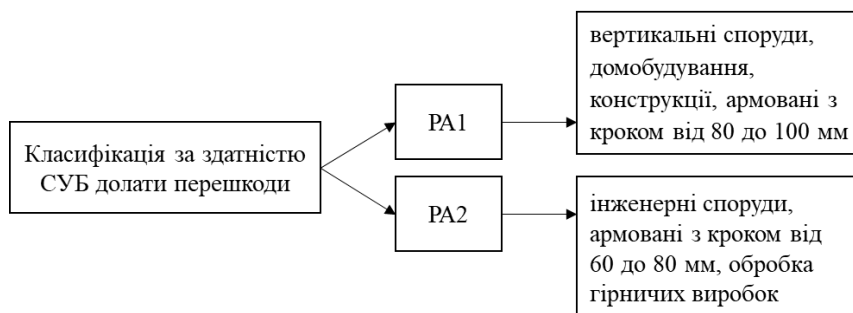


Рис. 4. Класифікація СУБС за здатністю долати перешкоди

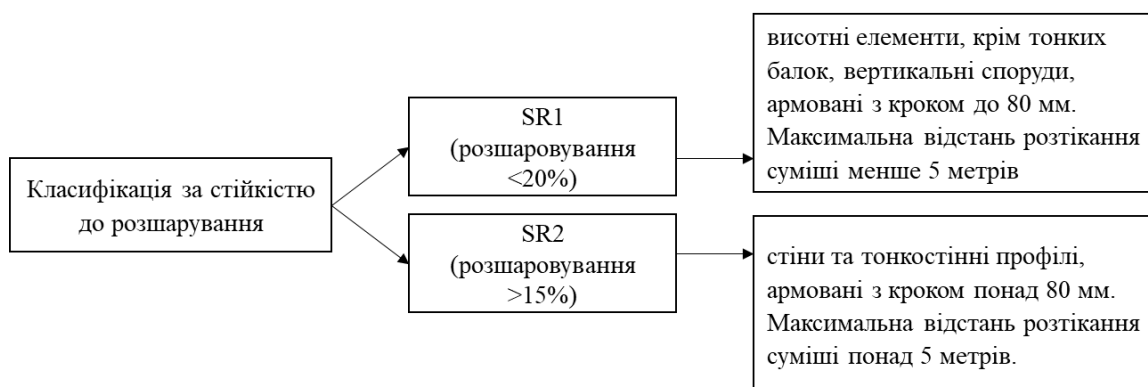


Рис. 5. Класифікація СУБС за стійкістю до розшарування

В'язкість	Сфера застосування			Стійкість до розшарування / здатність долати перешкоди
VS2 VF2	неармовані, малоармовані бетонні конструкції			РА для SF1,SF2
VS1 або VS2 VF1 або VF2 або цільове призначення	більшість звичайних споруд - колони, стіни вертикальні елементи, густоармовані конструкції складних форм			SR для SF3
VS1 VF1	плити перекриттів, опори, ростверки, балки прогонових будов			SR для SF2,SF3
	SF1	SF2	SF3	
	Розплив конуса			

Рис. 6. Зв'язок між різними властивостями СУБС та сферою застосування

СУБС називають п'ятикомпонентною бетонною сумішшю, тому що, на відміну від звичайної трикомпонентної, вона має два додаткові компоненти: перший – це високо-ефективний суперпластифікатор; другий – тонкомолотий наповнювач (завдяки яким досягається ефект самоущільнення бетонної суміші) (рис. 7, а, б).

Вперше склад і технологія самоущільнювального бетону були запропоновані 1986 р. професором Токійського університету Н. Окамура.

Проектування складу самоущільнювального бетону розглянуто в роботах [10, 13, 17, 20–23].

Склад самоущільнювальної бетонної суміші відрізняється від рецептури, що використовується для виготовлення звичайної бетонної суміші. Відмінність полягає в гранулометрії та співвідношенні матеріалів, а також у використанні спеціальних ефективних домішок мінерального та хімічного типів, завдяки яким виготовляють бетони плинної консистенції, а після твердіння під-

вищеної міцності. Основні відмінності наведені на рис. 8.

Ще однією важливою відмінністю є дозування та вид пластифікатору (зазвичай це гіперпластифікатор), доза якого вище (1,4–2,0 %) за стандартні витрати (0,2–0,3 % від витрати цементу) для звичайного бетону. Рекомендоване дозування домішки-суперпластифікатору для виготовлення СУБС наведено в табл. 3.

Кожен виробник пропонує свою рецептуру. Під час розроблення складів СУБС та в процесі їх техніко-економічного аналізу визначається призначення та сфера застосування СУБС, а також враховуються параметри складності та відповідальності конструкції. Виникає необхідність скористатися класифікацією бетонних сумішей та вимог до них.

Склад і види самоущільнювального бетону постійно змінюються. Наведемо приклад складів бетонної суміші для СУБС, що застосовуються в різних країнах (табл. 4).

Властивості бетону суттєво зумовлюють його компоненти [12, 15].



Рис. 7. Склад звичайної бетонної суміші без домішки (а) й СУБС (б) та співвідношення (в): 1 – звичайна бетонна суміш; 2 – СУБС



Рис. 8. Відмінності СУБС від звичайної бетонної суміші

Таблиця 3 – Рекомендоване дозування домішки-суперпластифікатору від маси цементу для отримання СУБС

Найменування фірми	Найменування суперпластифікатору	Дозування
«BASF», Німеччина	MasteGlenium 116	0,8–2,0 %
«MC-Bauchemie», Німеччина	MC-PowerFlow 2695	1,0–5,0 %
«Stachema», Чехія	Stacheplast 156	0,9–1,5 %
ООО Будіндустрія ЛТД, Україна	Релаксол-Супер ПК	0,5–1,0 %
«Coral», Україна	Coral Maestro	0,5–1,0 %
«SIKA», Швейцарія	Sika ViscoCrete 5-600 UA	1,0–2,0 %

Таблиця 4 – Порівняльний аналіз складу бетонної суміші для СУБС різних країн

Компоненти бетонної суміші	Витрати на 1 м ³ бетонної суміші	Компоненти бетонної суміші	Витрати на 1 м ³ бетонної суміші
Японія		США	
Вода, кг	175	Вода, кг	180
Портландцемент зі зниженим тепловиділенням, кг	530	Портландцемент, кг	357
Зола-винесення, кг	70	Гранульований шлак, кг	119
Дрібний заповнювач, кг	751	Дрібний заповнювач, кг	936
Крупний заповнювач, кг	789	Крупний заповнювач, кг	684
Домішка-суперпластифікатор, кг	9	Домішка-суперпластифікатор, кг	2,5
Європейський Союз		Індія	
Вода, кг	190	Вода, кг	163
Портландцемент, кг	280	Цемент, кг	330
Вапняний наповнювач, кг	245	Зола висококальцієва, кг	150
Дрібний заповнювач, кг	865	Крупний заповнювач 10 мм, кг	309
Крупний заповнювач, кг	750	Крупний заповнювач 20 мм, кг	455
Домішка-суперпластифікатор, кг	4,2	Дрібний заповнювач, кг	917
		Домішка-суперпластифікатор, кг	2,4

Матеріали, що використовуються для виготовлення СУБС не відрізняються від матеріалів, що використовуються для виготовлення традиційних бетонів. Відрізняється лише їхнє співвідношення (рис. 7, в), а також використання спеціальних ефективних домішок.

Основні вихідні матеріали для підбору складу СУБС:

- цемент;
- великий та дрібний заповнювач;
- мінеральний наповнювач;

- домішки.

Забезпечення заданих експлуатаційних властивостей самоущільнювального бетону можливе лише в разі дотримання необхідних вимог до вихідних компонентів бетонної суміші (табл. 5). До них належать гранулометрія дрібного та крупного заповнювача, дисперсність інертних або активних мінеральних домішок тощо. Розглянемо кожен компонент і проаналізуємо, як вони впливають на бетонну суміш загалом (табл. 6).

Таблиця 5 – Вимоги до компонентів СУБС

Пластифікатор	Великий заповнювач	Дрібний заповнювач	Мінеральні добавки	Цемент
1,4–2,0 % від витрати цементу (0,2–0,3 % для звичайних бетонних сумішей)	Об'єм гранітного щебню не має перевищувати 50 % від сумарного об'єму бетонної суміші (оптимально від 28 до 35 %)	Об'ємна частка дрібного заповнювача має становити не менше ніж 40 %	Загальний вміст дисперсних матеріалів (цемент, мінеральна домішка, фракції піску дрібніше ніж 0,125 мм) – 400–600 кг/м ³	Підвищена витрата цементу – 350–450 кг/м ³
Використовують імпорتنі та вітчизняні суперпластифікатори четвертого покоління на полікарбосилатній основі.	Фракція 2–16 мм, фракції 5–20, 3–10, 5–10 мм або суміші фракцій (3–5) 10 мм і 10–20 мм. Обов'язково фракціонується за розмірами 10–16 мм і 16–20 мм.	Модуль крупності від 1,7 до 2,5 мм. Можна використовувати дрібний заповнювач у (суміш з двох або більше фракцій піску).	Крупність мінеральної домішки становить не більше ніж 0,125 мм, 70% з яких має розмір 0,063 мм.	Проблема сумісності цементу та модифікаторів.
Технічні лігносульфонати, нафталісульфонати, меламісульфонати, сополімери вінілу, полікарбосилати.	Необхідно використовувати щебінь із щільних вивержених або метаморфічних гірських порід. Форма крупного заповнювача подібна до кубічної.	Як дрібний заповнювач рекомендується застосовувати кварцовий, кварцевополевошпатовий пісок.	Інертні (вапнякові або доломітові порошки), пуцоланові (зола-винесення, мікрокремнезем) і гідралічні (доменний шлак).	Вибір цементу залежить від призначення конструкції.

Перспективні конструкції плитних залізобетонних прогонових будов

Для будівництва та відновлення мостів малих і середніх прогонів ДержДорНДІ ім. М. П. Шульгіна пропонує компонування поперечного перерізу прогонової будови з монолітною залізобетонною плитою з постнапруженням [24]. Основним недоліком цих конструкцій є суцільна плита, висотою 1,2 м, яка суттєво збільшує згинальний момент у плиті від постійної ваги (рис. 9).

Для зменшення ваги залізобетонних мостів із плитними прогоновими будовами пропонується конструктивно-технологічне рішення, яке дозволяє виготовити полегшені конструкції [25, 26]. Полегшена конструкція – це плоска зверху і знизу залізобетонна плита прогонової будови, в якій розташо-

вані вкладки-порожниноутворювачі з легких і дешевих матеріалів із пінополістиролу (рис. 10). Використання вкладок дає змогу зменшити власну вагу прогонової будови мосту на 30–45 %.

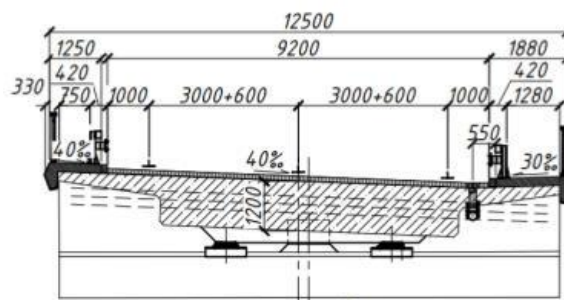


Рис. 9. Схема поперечного перерізу прогонової будови мосту з монолітною залізобетонною плитою

Таблиця 6 – Вплив компонентів само ущільнювальної бетонної суміші на властивості СУБС

Розплив конуса	
Великий заповнювач	Форма гранітного щебню за інших умов сприяє зростанню рухливості бетонної суміші та збільшенню розпливу її конуса
Цемент	Витрата цементу більше ніж 500 кг/м ³ може збільшити усадку і повзучість бетону; витрата менше ніж 350 кг/м ³ може бути прийнятною лише за умови використання інших дрібнодисперсних мінеральних наповнювачів або пуцоланових домішок
Здатність долати перешкоди досягається завдяки:	
Дрібний заповнювач	збільшенню витрати дрібного заповнювача
Великий заповнювач	зменшенню витрати великого заповнювача, обмеженню максимального розміру зерен великого заповнювача
Цемент	збільшенню вмісту цементної пасти, забезпечуючи цим обмазування зерен для зниження тертя
Пластифікатор	підвищенню деформованості цементної пасти, що досягається застосуванням ефективних суперпластифікаторів
Мінеральні домішки	використанню мінеральних домішок (наповнювачів) із безперервною гранулометриєю
Водоцементне співвідношення	оптимальному об'ємному співвідношенню вода/дисперсний матеріал (цемент, мінеральна домішка, фракції піску дрібніше ніж 0,125 мм) – від 0,80 до 1,10
Рухливість	
Дрібний заповнювач	Підвищена кількість дрібного заповнювача може знизити здатність до самоущільнення сумішей, що зумовлюється зменшенням товщини цементного тіста, яке окутує зерна
Великий заповнювач	Вирішальний вплив на рухливість бетонної суміші має витрата крупного заповнювача, який підвищує тертя між складниками суміші і збільшує опір текучості
Пластифікатор	Велика кількість суперпластифікаторів в розчині уповільнює схоплювання покладеної суміші; у процесі перевезення цементного розчину протягом години та більше, ефективність суперпластифікатору знижується, тому знижується рухливість розчину
Міцність	
Дрібний заповнювач	Використання дрібних заповнювачів з модулем 2,5–3,2 є оптимальним для високоміцного бетону
Великий заповнювач	Одержання високих реологічних властивостей бетонної суміші та високої міцності затверділого бетону можливе в разі зменшення розміру крупного заповнювача, що забезпечить найвищу міцність на одиницю маси цементу. Для виготовлення СУБС використовують заповнювачі з максимальним розміром 16 мм. Використання заповнювача більшого розміру збільшує модуль еластичності, зменшує деформації повзучості й усадки
Стабільність	
Дрібний заповнювач Великий заповнювач	Важливим фактором забезпечення стабільних властивостей бетону є щільність упакування заповнювачів. Чим щільніше упакування агрегатів на початковій стадії, тим краща легкоукладальність, а також інженерні властивості за достатнього вмісту в'язучого

Поперечні перерізи вкладок можуть бути різної форми: круглими, квадратними, прямокутними, овальними тощо. Через динамічний тип навантажень, що рухаються вздовж мосту форма вкладок квадратного та прямокутного перерізу повинна мати зрізи для формування вутів у місцях примикання внутрішніх ребер із верхньою та нижньою обшивками плити прогонової будови. Одними з найпростіших у виготовленні є трубчасті вкладки-порожниноутворювачі, але вони майже не зменшують загальну вагу конструкції (рис. 10, а).

Більше формування внутрішніх порожнин забезпечують вкладки квадратного або прямокутного перерізів (рис. 10, б). Ще більший об'єм внутрішніх порожнин, а отже, і зменшення власної ваги забезпечують вкладки розвинутих за шириною форм (рис. 10, в), але вони потребують армування обшивки над ними. Більш складними у виготовленні, проте ефективними за армуванням верхньої обшивки є вкладки, які формують внутрішню поверхню обшивки у вигляді склепінчастої конфігурації (рис. 10, г).

У конструктивно-технологічних рішеннях монолітної залізобетонної плитної прогоно-

вої будови з вкладками відсутні недоліки, притаманні збірним, монолітним і збірно-монолітним конструкціям, найсуттєвішими з яких є такі [26]:

- малий захисний шар і недоуцільнення бетону в місцях значної концентрації пакета арматури в тонкостінних ребрах збірних таврових балок;
- втомне руйнування стрижнів пакета поздовжньої робочої арматури в місцях їх з'єднання;
- зміщення діафрагм у плані внаслідок відхилення від проєктного положення, що зумовлює ненадійне стикування та з'єднання діафрагм одна з одною;
- корозія закладних деталей і з'єднувальних пластин та їх втомне руйнування;
- відсутність або пошкодження шпонових стиків між порожнистими плитами прогонових будов;
- сколювання та інші механічні пошкодження поздовжніх і поперечних балок та ребер;
- значна загальна площа відкритої поверхні залізобетонних конструкцій балкових мостів, що зазнають тривалого атмосферного

впливу під час експлуатації (зволоження, заморожування, розморожування тощо).

Крім того, монолітна залізобетонна плита прогонова будова зі вкладками має низку інших переваг.

Так, перериваючи вкладки за довжиною, отримуємо поперечні балки, тобто внутрішні ребра-діафрагми жорсткості, які є важливими конструктивними елементами для забезпечення просторової роботи прогонової будови (рис. 11).

Через те, що крайні балки прогонової будови більш завантажені відповідно до коефіцієнта поперечного розподілу, їх можна улаштувати більшими за шириною перерізу з додатковими арматурними каркасами з більшою кількістю поздовжньої робочої арматури, не змінюючи ширину перерізу самих вкладок (рис. 12, а). Використовуючи вкладки різної ширини, можна забезпечити зміну кроку внутрішніх поздовжніх ребер за шириною прогонової будови, збільшуючи крок в середині, а на краях зменшуючи (рис. 12, б). Важливими є також можливість і доцільність використання запропонованих полегшених конструкцій у нерозрізних мостах внаслідок симетричності перерізу основної конструкції прогонової будови з вкладками.

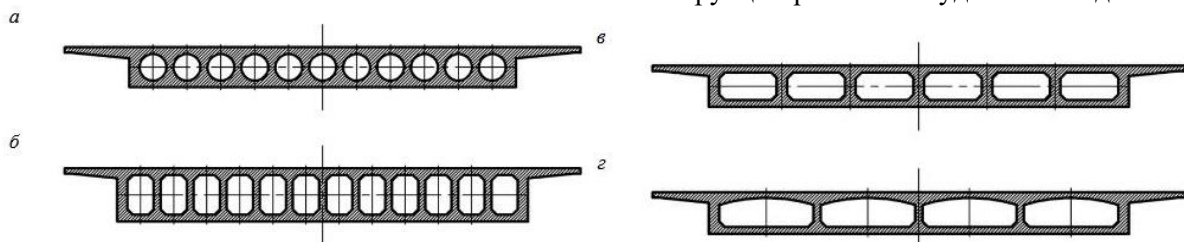


Рис. 10. Поперечні перерізи полегшених конструкцій прогонових будов мостів: а–г – варіанти [26]

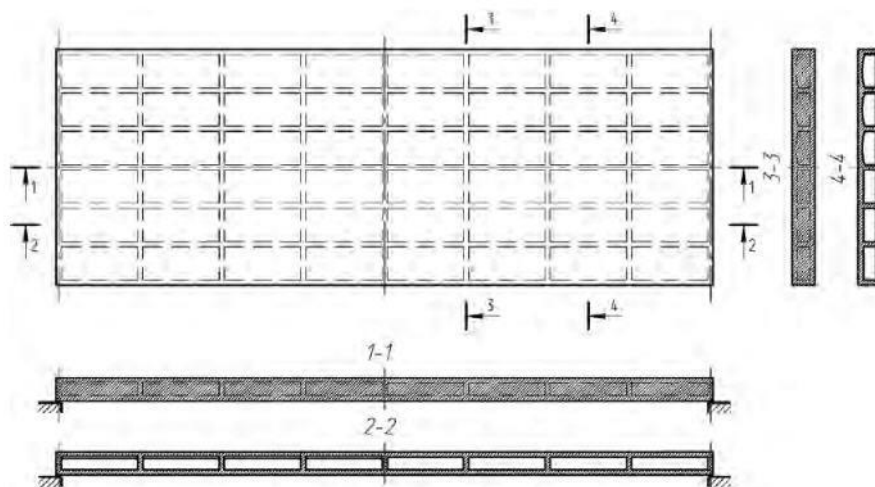


Рис. 11. Монолітна залізобетонна плита прогонова будова зі складною внутрішньою геометрією [26]

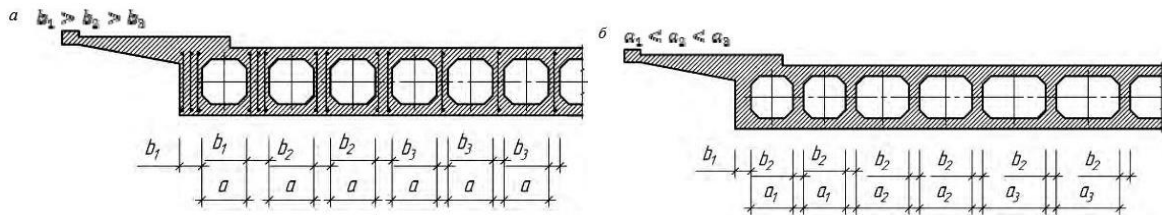


Рис. 12. Поперечні перерізи зі зміною товщиною поздовжніх балок (а) або шириною вкладок (б) [26]

Технологічні рішення зведення полегшених конструкцій монолітних залізобетонних плитних прогонових будов із застосуванням самоущільнювального бетону

Для зведення монолітних залізобетонних плитних прогонових будов мостів раціональним є застосування самоущільнювальних бетонів, зокрема для зведення полегшених конструкцій, тому що воно дозволяє значно прискорити процес бетонування завдяки відсутності технологічних перерв, властивих для традиційного бетонування [27–30].

Одними з найбільш домінантних переваг є відмова від ущільнення бетонної суміші на підставі її високої рухливості, що забезпечує розтікання й ущільнення під дією власної ваги, а також заповнення бетонною сумішшю всього об'єму під вкладками-порожниноутворювачами, що не виймаються. Внаслідок цього знижуються витрати часу на формування верхньої поверхні прогонової будови через здатність СУБС до самовирівнювання. У зв'язку з цим запропонована технологія зведення полегшених залізобетонних конс-

трукцій способом застосування СУБС (рис. 13, 14).

Зведення полегшеної конструкції залізобетонної плитної прогонової будови, армованою напруженою арматурою, складається з таких процесів: монтаж опалубки, облаштування нижньої арматурної сітки й арматурних каркасів внутрішніх ребер, розкладка попередньо напруженої арматури з гофрованими каналоутворювачами, облаштування вкладок з їх фіксацією в проектному положенні, облаштування верхньої арматурної сітки й укладання СУБС, натягнення попередньо напруженої арматури на бетон за допомогою гідравлічних домкратів або насосних станцій, ін'єктування каналоутворювачів бетонним розчином.

Товщина захисного шару забезпечується завдяки розміру фіксаторів арматури. Вкладки з пінополістиролу або мінеральної вати кріплять до арматурних елементів конструкції металевими або неметалевими фіксаторами, які забезпечують утримання вкладок від спливання під час укладання бетонної суміші й їх фіксацію в проектне положення в горизонтальній площині (рис. 13, а).

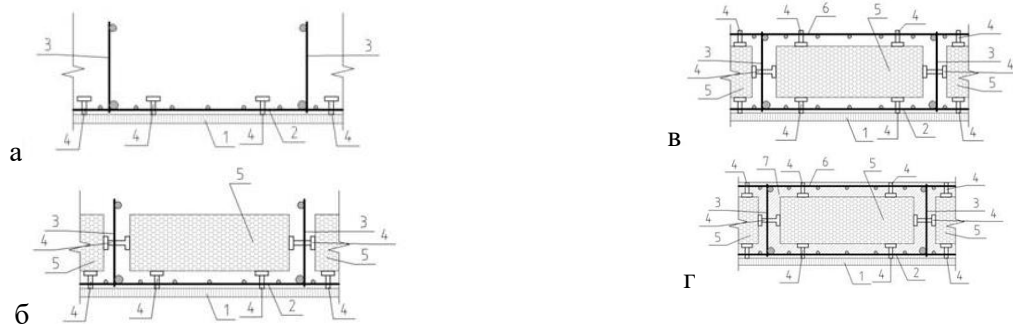


Рис. 13. Технологія улаштування полегшеної конструкції залізобетонної плитної прогонової будови із застосуванням СУБС: а–г – технологічні операції; 1 – опалубка; 2 – арматура нижньої сітки; 3 – арматурні каркаси; 4 – фіксатори вкладки; 5 – вкладки; 6 – арматура верхньої сітки; 7 – СУБС [29]

Технічна реалізація запропонованої технології улаштування полегшених конструкцій із застосуванням СУБС можлива тільки в разі вирішення найважливішого завдання – утримання усього арматурного каркаса про-

гонової будови з вкладками з пінополістиролу від спливання під дією сили виштовхування. Це завдання вирішується трьома основними способами (рис. 14).

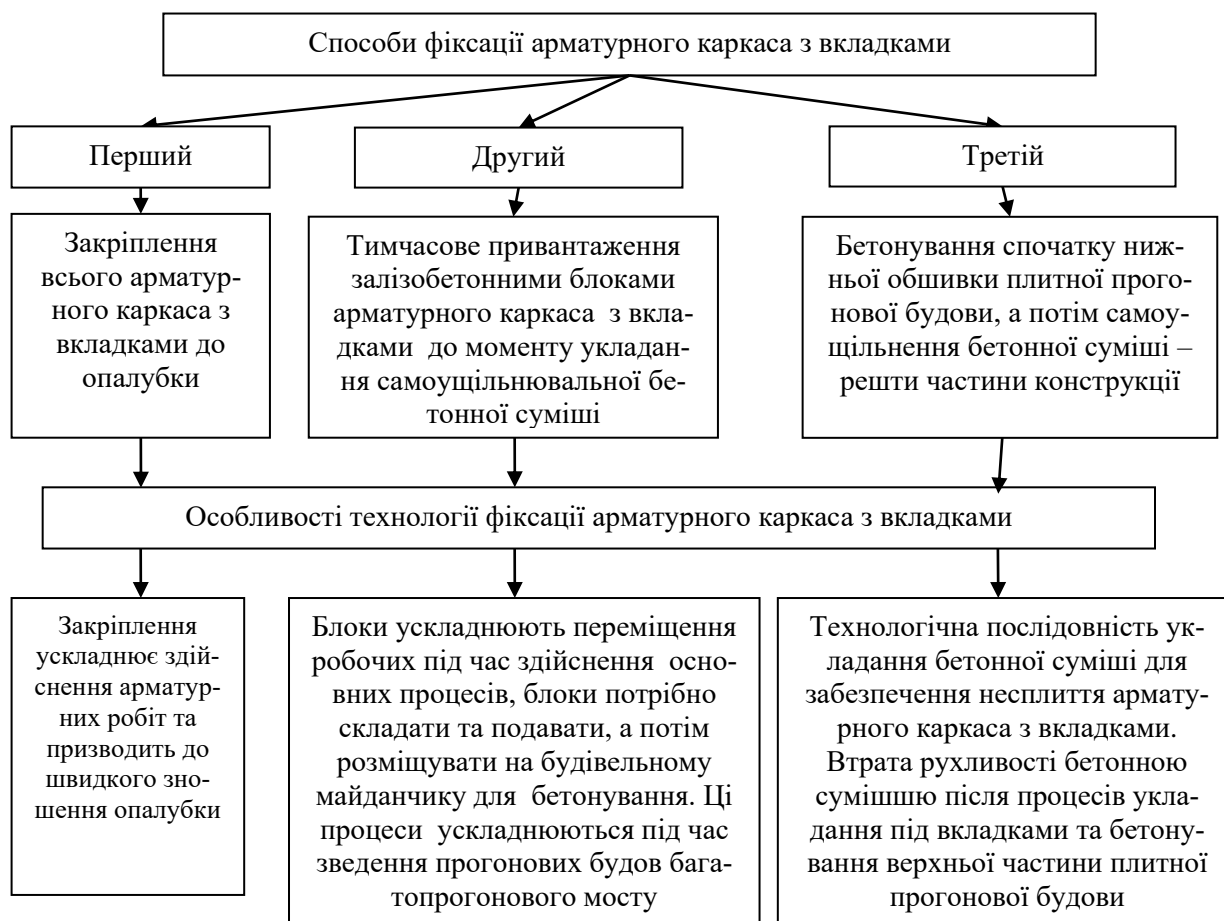


Рис. 14. Варіанти фіксації арматурного каркаса з вкладками під час бетонування плитної прогонової будови

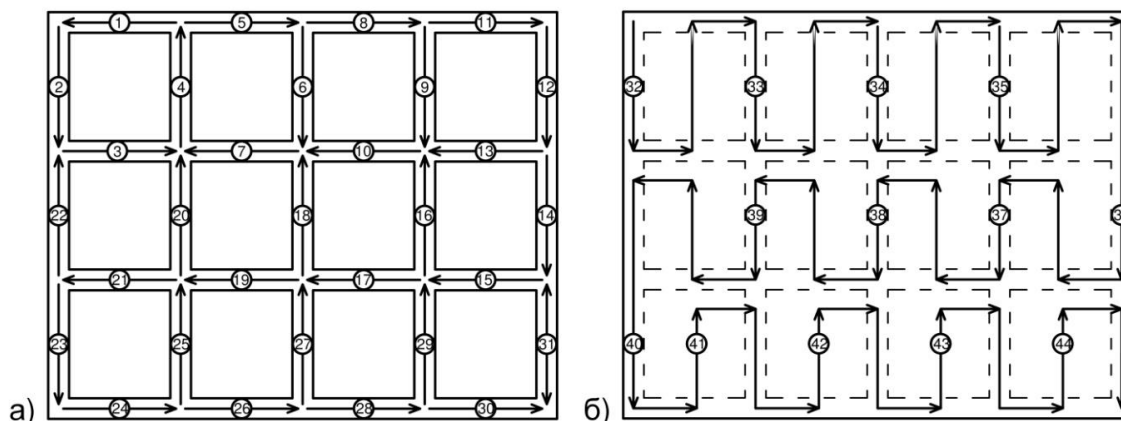


Рис. 15. Технологічна послідовність безперервного бетонування плитної прогонової будови у випадку застосування СУБС: а – етапи бетонування нижньої обшивки; б – етапи бетонування решти частини прогонової будови; 1–44 – послідовність укладання СУБС [29]

Перший спосіб потребує конструктивного рішення щодо можливості закріплення арматурного каркаса без додаткових робіт із доопрацювання залізобетонних поверхонь перекриття після розпалубки (рис. 14).

Другий спосіб більш раціональний для виготовлення збірних та збірно-монолітних конструкцій (рис. 14). Третій спосіб потребує

більш детального дослідження показників, які дозволять визначити інтервал між укладанням бетонної суміші в нижню обшивку плитної прогонової будови та решту частини конструкції, а також приладів та методів, необхідних для їх визначення (рис. 14).

Якщо інтервал є незначним завдяки укладанню СУБС, товщиною 5–6 см, що дорів-

ное нижній обшивці прогонової будови, то спочатку бетонується вся нижня частина, а потім без перерви продовжується бетонування в тій самій послідовності решти частин (рис. 15).

Висновки

Улаштування монолітної залізобетонної плитної прогонової будови полегшеного типу запропонованим способом дозволяє значно прискорити процес бетонування завдяки укладанню бетонної суміші в один етап без перерви в бетонуванні для набору міцності бетону нижньою обшивкою та встановлення верхньої арматурної сітки, тому що вона має високу рухливість, що забезпечує розтікання та ущільнення під дією власної ваги. Знижуються витрати часу для формування верхньої поверхні прогонової будови через здатність СУБС до самовирівнювання. Відсутній технологічний шов між шарами бетону, укладеного за дві стадії.

Запропоновано принципові конструктивні рішення монолітних залізобетонних плитних прогонових будов із вкладками-порожниноутворювачами з пінополістиролу. Використання вкладок дає змогу зменшити витрату бетону, а отже, і власну вагу прогонової будови до 30–45 %.

Крім суттєвого зменшення ваги, монолітна залізобетонна плитна прогонова будова з вкладками має низку технологічних, конструктивних й експлуатаційних переваг, зокрема це простота виготовлення з використанням опалубки, загальна цільність конструкції, значна крутна жорсткість, забезпечення просторової роботи, відсутність стиків, мала площа відкритих ділянок бетону тощо.

Література

- Experimental investigation of selfcompacting concrete containing coir fibres / Lakhiar M. T., Lakhiar M. T., Abdullah A. H., Mohamad N. *Civil and environmental engineering reports*. 2021. 31 (2). Pp.163–178.
- Tiago Barroqueiro, Pedro R. da Silva and Jorge de Brito. High-performance self-compacting concrete withrecycled aggregates from the precast industry: durability assessment. *Buildings*, 2020. 10 (6). Pp. 113–135.
- Ayub T., Mahmood W., Khan A.-u.-R. Durability Performance of SCC and SCGC Containing Recycled Concrete Aggregates: a Comparative Study. *Sustainability*, 2021. 13(15). 8621.
- Tawfiq Al-Mughanam, Theyazn H. H. Aldhyani, Belal Alsubari and Mohammed Al-Yaari. Modeling of Compressive Strength of Sustainable Self-Compacting Concrete Incorporating Treated Palm Oil Fuel Ash Using Artificial Neural Network. *Sustainability*. 2020. 12 (22). 9322.
- Mohd Raizamzamani Md Zain, Oh Chai Lian, Lee Siong Wee, Norrul Azmi Yahya and Anizahyati Alisibramulisi. Crack Behaviour of Self-Compacting Concrete (SCC) Beams Containing Eggshell in Flexural. *Science & Technology*. 2021. 29 (4). 3059–3080.
- EFNARC. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. February 2002. 32 p.
- The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Specification, Production and Use*. May 2005. 68 p.
- DAfStb-Richtlinie. *Selbsverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*. Berlin. September 2003. 18 p.
- EN 206-9:2010. *Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC)*. 2013.
- Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності / Кіракевич І. І., У. Д. Марущак У. Д., Саницький М. А., Стечишин М. С. *Вісник НУЛП. Сер. Теорія і практика будівництва*. 2012. № 737. С.153–158.
- Марущак У. Д. Наномодифіковані надшвидкотверднучі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.05. Львів, 2019. 39 с.
- Дубов Т. М. Бетони з використанням цементної суспензії, активованої в електромагнітному полі: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05. Дніпро, 2020. 153 с.
- Стечишин М. С. Самоущільнювані бетони армовані дисперсними волокнами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Львів, 2016. 176 с.
- Гаращенко Д. П. Дисперсно-армований самоущільнюючий бетон на механоактивованому портландцементі: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05. Одеса, 2021. 159 с.
- Руденко Д. В. Особливості формування експлуатаційних властивостей модифікованого бетону для споруд спеціального призначення. *Вісник ДНУЗТ. Сер. Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77).
- Крошка Ю. В. Удосконалення організаційно-технологічних рішень вимірювальних робіт при зведенні монолітно-каркасних будівель: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08. Харків, 2020. 289 с.
- Solovyev A. K., Solovyov K. A., Stekolnikov N.V. Self-Compacting Concrete in Architectural Structures. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. No. 2(43). Pp. 171–184.
- Болотських О. М., Шаповал С. В. Переваги самоущільнювального бетону і перспективи його застосування в Україні. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Т. 103. № 1.
- ДСТУ Б В.2.7-176: 2008. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови. EN 206-1:2000, NEQ.
- Дослідження складів самоущільнюючих бетонів для виготовлення мостових балок / Кабусь

- О. В., Буцька Л. М., Латорець К. В., Гуркаленко В. А. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 2. № 2 (96).
21. ДСТУ-Н Б В.2.7-299: 2019. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Мін-регіон України, 2014. 87 с.
 22. Okamura H., K. Ozava. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of the JSCE*, 1995. № 25. Pp. 107–120.
 23. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. April 2003. No. 15. P. 11.
 24. Рекомендації щодо конструктивних рішень для відбудови пошкоджених мостів і труб. Київ: ДерждорНДІ, 2022. 167 с.
 25. Мельник І. В. Оптимізація залізобетонних прогонових будов мостів. *Вісник ЛНАУ. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2014. № 15. С. 130–136.
 26. Мельник І. В., Бачкай О. С. Принципові конструктивні вирішення монолітних плоских залізобетонних прогонових будов мостів з полегшувальними вставками. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Сер. Теорія і практика будівництва*. 2015. №823 [56]. С. 229–235.
 27. Бабаєв В. М. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування і зведення конструктивних систем: монографія / Бугаєвський С. О. та ін. Київ: Видавництво Сталь, 2017. 404 с.
 28. Патент України на корисну модель № 102097, МПК E04C 2/00, E04B 5/00, E04G 21/00. Спосіб улаштування залізобетонного перекриття полегшеного типу / Шмуклер В. С., Бабаєв В. М., Бугаєвський С. О., Науменко Ю. А. Заявл. 18.05.2015; опубл. 12.10.2015 р.; Бюл. № 19.
 29. Бугаєвський С. О. Теоретико-методологічні основи формування організаційно-технологічних рішень зведення полегшених залізобетонних конструкцій: дис. ...доктора технічних наук: 05.23.08. Харків: ХНУБА, 2021. 458 с.
 30. Cast Reinforced Concrete Frame of Buildings and Methods of Its Erection / Babaev V., Shmukler V., Bugayevskiy S., Nikulin V. *Journal of Civil Engineering and Construction*. September 2016. Vol. 5. N. 2. Pp. 143–156.
 31. Ayub T., Mahmood W., Khan A.-u.-R. Durability Performance of SCC and SCGC Containing Recycled Concrete Aggregates: a Comparative Study. *Sustainability*, 2021. 13(15). 8621.
 32. Tawfiq Al-Mughanam, Theyazn H. H. Aldhyani, Belal Alsubari and Mohammed Al-Yaari. Modeling of Compressive Strength of Sustainable Self-Compacting Concrete Incorporating Treated Palm Oil Fuel Ash Using Artificial Neural Network. *Sustainability*. 2020. 12 (22). 9322.
 33. Mohd Raizamzamani Md Zain, Oh Chai Lian, Lee Siong Wee, Norrul Azmi Yahya and Anizahyati Alisibramulisi. Crack Behaviour of Self-Compacting Concrete (SCC) Beams Containing Eggshell in Flexural. *Science & Technology*. 2021. 29 (4). 3059–3080.
 34. EFNARC. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. February 2002. 32 p.
 35. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Specification, Production and Use*. May 2005. 68 p.
 36. DAFStb-Richtlinie. *Selbsverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*. Berlin. September 2003. 18 p.
 37. EN 206-9:2010. *Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC)*. 2013.
 38. Samoushchilniuvalni be-tony zi shvydkym narostanniam mitsnosti [Self-compacting concretes with rapid strength growth] / Kirakevych I. I., Marushchak U. D., Sanytskyi M. A., Stechyshyn M. S. *Teoriia i praktyka budivnytstva: Visnyk NULP- Theory and practice of construction: Bulletin of NULP*. 2012. № 737. Pp.153–158.
 39. Marushchak U. D. Nanomodyfikovani nadshvyd-kotverdnuchi tsementuiuchi systemy ta vysoko-funktsionalni betony na yikh osnov: avtoref. dis. na zdobuttia nauk. stupenia d-ra tekhn. nauk. [Nanomodified ultra-quick-hardening cementing systems and highly functional concretes based on them. Cand. tech. sci. diss.]. Lviv, 2019. 39 p.
 40. Dubov T. M. Betony z vykorystanniam tsementnoi suspenszii, aktyvovanoi v elektromahnitnomu poli: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. [Concretes using a cement suspension activated in an electromagnetic field. Cand. tech. sci. diss.]. Dnipro, 2020. 153 p.
 41. Stechyshyn M. S. Samoushchilniuvani betony armovani dyspersnymi voloknamy: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. [Self-compacting concrete reinforced with dispersed fibers. Cand. tech. sci. diss.]. Lviv, 2016. 176 p.
 42. Harashchenko D. P. Dyspersno-armovanyi samoushchilniuiuchyi beton na mekhanoaktyvovanomu portlandtsementi: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. [Dispersion-reinforced self-compacting concrete on mechanically activated Portland cement. Cand. tech. sci. diss.]. Odesa, 2021. 159 p.
 43. Rudenko D. V. Osoblyvosti formuvannia ekspluatatsiinykh vlastyvostei modyfikovanoho

References

1. Experimental investigation of selfcompacting concrete containing coir fibres / Lakhiar M. T., Lakhiar M. T, Abdullah A. H., Mohamad N. *Civil and environmental engineering reports*. 2021. 31 (2). Pp.163–178.
2. Tiago Barroqueiro, Pedro R. da Silva and Jorge de Brito. High-performance self-compacting concrete withrecycled aggregates from the precast industry: durability assessment. *Buildings*, 2020. 10 (6). Pp. 113–135.

- betonu dlia sporud spetsialnoho pryznachennia [Peculiarities of formation of operational properties of modified concrete for special purpose structures]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT – Science and progress of transport. Herald of DNUZT*. 2018. № 5 (77).
16. Kroshka Yu.V. Udoshkonalennia orhanizatsiino-tehnolohichnykh rishen vymiriuvalnykh robot pry zvedenni monolitno-karkasnykh budivel: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. [Improvement of organizational and technological solutions of measuring works during the construction of monolithic frame buildings. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2020. 289 p.
 17. Solovyev A. K., Solovyov K. A., Stekolnikov N.V. Self-Compacting Concrete in Architectural Structures. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. No. 2(43). Pp. 171–184.
 18. Bolotskykh O. M., Shapoval S. V. Perevahy samoushchilniuvalnogo betonu i perspektyvy yoho zastosuvannia v Ukraini [Advantages of self-compacting concrete and prospects for its use in Ukraine]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific bulletin of construction*. 2021. T. 103. № 1.
 19. DSTU B V.2.7-176: 2008. Budivelni materia-ly. Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnich-ni umovy. EN 206-1:2000
 20. Doslidzhennia skladiv samo-ushchilniuiuchykh betoniv dlia vyhotovlennia mos-tovykh balok [Study of compositions of self-compacting concrete for the manufacture of bridge beams] / Kabus O. V., Butska L. M., Latores K. V., Hurkalenko V. A. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific bulletin of construction*. 2019. T. 2. № 2 (96).
 21. DSTU-N B V.2.7-299: 2019. Nastanova shchodo vyznachennia skladu vazhkoho betonu. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2014. 87 p.
 22. Okamura H., K. Ozava. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of the JSCE*, 1995. № 25. Pp. 107–120.
 23. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. April 2003. No. 15. P. 11.
 24. Rekomendatsii shchodo konstruktyvnykh rishen dlia vidbudovy poshkodzhenykh mostiv i trub [Recommendations for constructive solutions for the reconstruction of damaged bridges and pipes]. Kyiv: DerzhdorNDI, 2022. 167 p.
 25. Melnyk I. V. Optyimizatsiia zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv [Optimization of reinforced concrete span structures of bridges]. *Visnyk LNAU. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo – Architecture and agricultural construction*. Lviv, 2014. № 15. Pp. 130–136.
 26. Melnyk I. V., Bachkai O. C. Pryntsypovi konstruktyvni vyrishennia monolitnykh ploskykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv z polehshuvalnymy vstavkamy [Principle constructive solutions of monolithic flat reinforced concrete span structures of bridges with lightening inserts]. *Visnyk NU «Lvivska politekhnik». Teoriia i praktyka budivnytstva - Bulletin of Lviv Polytechnic University. Theory and practice of construction*. 2015. № 823 [56]. Pp. 229–235.
 27. Chyselni ta eksperymentalni metody ratsionalnoho proiektuvannia i zve-dennia konstruktyvnykh system [Numerical and experimental methods of rational design and summary of structural systems] monohrafiia / Buhaievskiy S. O., Yevel S. M., Yevzerov I. D., Lantukh-Liashchenko A. I., Shevetovskiy V. V., Shymanovskiy O. V., Shmukler V. S. Kyiv: Vydavnytstvo Stal, 2017. 404 p.
 28. Patent Ukrainy na korysnu model № 102097, MPK E04S 2/00, E04V 5/00, E04G 21/00. Sposib ulashtuvannia zalizobetonnoho perekryttia polehshenoho typu [The method of arranging a lightweight reinforced concrete floor] Shmukler V. S., Babaiev V. M., Buhaievskiy S. O., Naumenko Yu. A.; opubl. 12.10.2015 r.; Biul. №19.
 29. Buhaievskiy S. O. Teoretyko-metodolohichni osnovy formuvannia orhanizatsiino-tehnolohichnykh rishen zvedennia polehshenykh zalizobetonnykh konstruksii: dys. na zdo-buttia naukovooho stepenia doktora tekhnichnykh nauk [Theoretical and methodological foundations of the formation of organizational and technological solutions for the construction of lightweight reinforced concrete structures. Doc. tech. sci. diss.]. Kharkiv: KhNUBA, 2021. 458 p.
 30. Cast Reinforced Concrete Frame of Buildings and Methods of Its Erection / Babaev V., Shmukler V., Bugayevskiy S., Nikulin V. *Journal of Civil Engineering and Construction*. September 2016. Vol. 5. N. 2. Pp. 143–156.
- Бугаєвський Сергій Олександрович**, доктор технічних наук, завідувач кафедри мостів, конструкцій та будівельної механіки ім. В. О. Російського, bugaevskiysa@gmail.com, тел. +38 (050) 937 90 16;
- Назаренко Ірина Валентинівна**, аспірант, iryna379nazarenko@gmail.com, тел. +38 (066) 828 86 39.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
- Application of self-compacting concrete for the construction and restoration of reinforced concrete bridges**
Abstract. Problem. Nowadays, the cast reinforced concrete spans are widely used in the construction and rehabilitation of bridges. These structures are also proposed for small and medium spans by the DerzhDorNDI named after M.P. Shulgin. One of the disadvantages of the cast reinforced concrete slab spans is its heavy weight. Using polystyrene void foams allows to reduce the consumption of concrete and the own weight of the span structure to 30–45 %. Self-compacting concrete belongs to the new genera-

tion of concrete and can be used in modern innovative construction including bridge designing. The manufacturing of the cast reinforced concrete slab spans using self-compacting concrete allows to significantly speed up the concreting process due to its placing in one stage. **Goal.** The purpose of these research is to reflect on the light-weight constructions and concreting process of the cast reinforced concrete slab spans using self-compacting concrete. **Methodology.** Research is performed using the analysis of the scientific literature and European regulations, systematization and unification of the requirements to the self-compacting concrete components. **Results.** A method of manufacturing the cast reinforced concrete slab spans using self-compacting concrete and polystyrene void foams allows to significantly speed up the concreting process, reduce the time spent on forming the upper surface of the span structure, reduce the consumption of concrete and the own weight of the span structure to 30–45 %. **Originality.** He article presents the method of manufacturing the light-weight constructions using not only self-compacting concrete, but also polystyrene void foams. **Practical value.** The presented type of slab spans has a lot of the advantages: ease of manufacture using widespread formwork, overall integrity

of the structure, significant torsion stiffness, provision of spatial work, lack of joints, small area of open parts of concrete, etc. We are striving to familiarize a wide circle of bridge engineers with distinctive features and advantages of the light-weight constructions using self-compacting concrete and polystyrene void foams and getting developments into actual practical use.

Key words: self-compacting concrete mixture, self-compacting concrete, physical and mechanical properties, void formers, slab span, foamed polystyrene, cast reinforced concrete.

Buhaievskiy Serhii, Doct. of Science, Head of the Department of Bridges, Structures and Construction Mechanics named after V.O. Rosiiskiy, bugaevskiy@gmail.com, tel. +38 (050) 9379016;

Nazarenko Iryna, Postgraduate Student, iryna379nazarenko@gmail.com, tel. +38 (066) 828 86 39.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
