



УДК 691.327.32



КРОВЯКОВ С.О.

Канд. технічних наук, доц., докторант, Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна, e-mail: skrovyakov@ukr.net, тел. +38 (067) 922 18 90, ORCID: 0000-0002-0800-0123



МІШУТИН А.В.,

Д-р технічних наук, проф., зав. каф., Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна, e-mail: mishutin52@ukr.net, тел. + 38 (050) 501-67-74, ORCID: 0000-0001-9512-6084

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ БЕТОНІВ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ І ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД ШЛЯХОМ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ПОРИСТОГО ЗАПОВНЮВАЧА

АНОТАЦІЯ. Для гідротехнічних і транспортних споруд ефективним є використання бетонів на легких пористих заповнювачах. Зокрема, легкі бетони широко використовують для плавучих залізобетонних споруд, таких як нафтовидобувні платформи, плавучі доки, готелі та будинки. Україна є однією з небагатьох країн, що володіють технологією залізобетонного суднобудування.

Проаналізовано поведінку пористого заповнювача в структурі бетону. Відомо, що при твердінні бетону відбувається активний обмін речовиною між заповнювачем і матрицею. Крім того, на властивості бетону впливає адгезія матриці до заповнювача і усадка-набухання заповнювача. При твердінні бетону в його структурі утворюються тріщини і внутрішні поверхні поділу. По цих тріщинах, поверхнях поділу і порам у матриці та заповнювачі передаються рідина і газ. Відповідно, для підвищення довговічності бетону гідротехнічних і транспортних споруди необхідно зменшити його проникність.

Запропоновано два методи оброблювання поверхні пористого заповнювача. Перший – гідрофобізація поверхні кремнійорганічною рідиною оптимальної концентрації. Недоліком цього методу є необхідність виконання додаткової технологічної операції. Було встановлено оптимальну концентрацію кремнійорганічної складової в емульсії. Другий метод – оброблення поверхні заповнювача цементною суспензією. Цей метод простіше першого, тому що оброблення здійснюють безпосередньо під час приготування бетонної суміші. Обидва методи знижують проникність структури, зарахунок чого підвищують міцність та довговічність бетону. Перший метод більш ефективний для керамзитобетонів плавучих та інших гідротехнічних споруд, для яких важлива експлуатаційна вологість бетону. Другий метод більш ефективний для бетонів на природних пористих заповнювачах, тому що підвищує однорідність бетону.

У цілому, завдання підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах має вирішуватися комплексно. Крім оброблення заповнювача необхідно застосовувати хімічні добавки, зокрема комплексні модифікатори, що включають суперпластифікатор і кольматуючу добавку або суперпластифікатор і мікрокремнезем. Отримано модифіковані бетони на легких заповнювачах з водонепроникністю до W14.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: легкі бетони, пористі заповнювачі, довговічність, корозійна стійкість, морозостійкість, водонепроникність, модифікатори, оброблення заповнювача

КРОВЯКОВ С.А.

Канд. техн. наук, доц., докторант, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: skrovyakov@ukr.net, тел. +38 (067) 922 18 90, ORCID: 0000-0002-0800-0123

МИШУТИН А.В.

Д-р техн. наук, проф., зав. каф., Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: mishutin52@ukr.net, тел. + 38 (050) 501-67-74, ORCID: 0000-0001-9512-6084



ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

АННОТАЦИЯ. Для гидротехнических и транспортных сооружений эффективным является использование бетонов на легких пористых заполнителях. В частности, легкие бетоны широко используют для плавучих железобетонных сооружений, таких как нефтедобывающие платформы, плавучие доки, отели и дома. Украина является одной из немногих стран, обладающих технологией железобетонного судостроения.

Проанализирована работа пористого заполнителя в структуре бетона. Известно, что при твердении бетона происходит активный обмен веществом между заполнителем и матрицей. Кроме того, на свойства бетона влияет адгезия матрицы к пористому заполнителю и усадка-набухание заполнителя. При твердении бетона в его структуре образуются трещины и внутренние поверхности раздела. По данным трещинам, поверхностям раздела и порам в матрице и заполнителе передается жидкость и газ. Соответственно для повышения долговечности бетона гидротехнических и транспортных сооружения необходимо уменьшить его проницаемость.

Предложено два метода обработки поверхности пористого заполнителя. Первый метод – гидрофобизация поверхности кремнийорганической жидкостью оптимальной концентрации. Недостатком данного метода является необходимость выполнения дополнительной технологической операции. Была установлена оптимальная концентрация кремнийорганической жидкости в эмульсии от 0.6 до 0.7%. Второй метод – обработка поверхности заполнителя цементной суспензией. Данный метод менее сложный, так как обработка производится непосредственно при приготовлении бетонной смеси. Оба метода снижают проницаемость структуры, за счет чего повышается прочность и долговечность бетона, а также повышают его прочность. Первый метод более эффективен для керамзитобетонов плавучих и других гидротехнических сооружений, для которых важна эксплуатационная влажность бетона. Второй метод более эффективен для бетонов на природных пористых заполнителях, так как обработка поверхности заполнителя повышает однородность бетона.

В целом задача повышения долговечности бетонов на пористых заполнителях должна решаться комплексно, т.е. помимо обработки заполнителя необходимо использовать химические добавки. Установлено, что для бетона гидротехнических и транспортных сооружений эффективны комплексные модификаторы, включающие суперпластифи-

катор и кольматирующую добавку или суперпластификатор и микрокремнезем. Получены модифицированные бетоны на легких заполнителях с водонепроницаемостью до W14.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: легкие бетоны, пористые заполнители, долговечность, коррозионная стойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, модификаторы, обработка заполнителя.

KROVIAKOV S.O.

PhD, Ass. Prof., doctoral student, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine,
e-mail: skrovyakov@ukr.net,
tel. +38 (067) 922 18 90,
ORCID: 0000-0002-0800-0123

MISHUTIN A.V.

Dr., Prof., head of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine,
e-mail: mishutin52@ukr.net,
tel. + 38 (050) 501-67-74,
ORCID: 0000-0001-9512-6084

INCREASING THE DURABILITY OF LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE FOR HYDRAULIC ENGINEERING AND TRANSPORT STRUCTURES BY TREATING THE SURFACE OF A POROUS AGGREGATE

ABSTRACT. Concretes on lightweight porous aggregates are effective for some hydraulic engineering and transport structures. In particular, lightweight concretes are often used for floating reinforced concrete structures (oil platforms, floating docks, hotels, houses). Ukraine is one of the few countries that have the technology of reinforced concrete shipbuilding.

The work of the porous aggregates in the concrete structure was analyzed. It is known that the active substance exchange occurs between the aggregate and the matrix when the concrete hardens. Also on the properties of concrete affects the adhesion of the matrix to the porous aggregate and shrinkage-swelling of the aggregate. When concrete is hardened, cracks are forming in its structure. Liquid and gas are transferred through these cracks and pores in the aggregate. To increase the durability of concrete hydraulic engineering and transport structures it is necessary to reduce its permeability.

Two methods for treating the surface of a porous aggregate have been proposed. The first method is the hydrophobization of the surface by a silicon-organic fluid of optimum concentration. However, this method requires an additional technological operation. The optimal concentration of silicone fluid in the emulsion as 0,6-0,7% was found. The second



method is surface treatment with cement slurry. This method is simpler than the first method, since the processing is done in the preparation of a concrete mix. Both methods reduce the permeability of the structure, thereby increasing the durability of the concrete. Also, the treatment of the porous aggregate increases the strength of the concrete. The first method is more effective for expanded clay concrete of floating and other hydraulic structures, for which the operating humidity of concrete is important. The second method is more effective for concrete on natural porous aggregates, since the treatment makes the filler more homogeneous.

The task of increasing the durability of concrete with porous aggregates must be solved comprehensively. In addition to the treatment of aggregate, complex additives should be used. There is established that complex additives are effective for concrete for hydraulic engineering and transport structures, which include superplasticizer and colmatizing additive or superplasticizer and silica fume. Modified concrete on lightweight aggregates with water resistance up to W14 is obtained.

KEY WORDS: lightweight concretes, porous aggregates, durability, corrosion resistance, frost resistance, water resistance, modifiers, aggregate treatment.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для цілого ряду споруд, зокрема гідротехнічних і транспортних, ефективним є застосування бетонів на легких пористих заповнювачах. Наприклад, у керамзитобетоні вигідно поєднуються велика міцність при малій середній густині і низькій теплопровідності, що обумовлює високу конструктивну ефективність і довговічність. Якщо у цивільному будівництві обсяги застосування керамзитобетону знизились через появу ефективних ніздрюватих бетонів, то в галузі залізобетонного суднобудування керамзитобетон залишається безальтернативним матеріалом. Для залізобетонних плавучих споруд використання керамзитобетону дозволяє знизити вагу судна і підвищити його вантажопідйомність. Застосування легких бетонів також дозволяє значно поліпшити комфортність перебування людей та обладнання в приміщеннях залізобетонного судна. Тому актуальною є задача підвищення довговічності суднобудівних керамзитобетонів завдяки застосуванню сучасних модифікаторів і технологій.

Крім того у світовій практиці бетони на легких заповнювачах все частіше застосовують для прогонних конструкцій, зокрема при будівництві мостів та шляхопроводів. З розвитком будівельних технологій відкривається перспектива отримання ефективних і довговічних бетонів на міс-

цевих легких заповнювачах, що забезпечують необхідну конструктивну міцність. Таким чином, завдання підвищення довговічності конструкційних бетонів на пористих заповнювачах є актуальними.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

Бетони на легких заповнювачах мають декілька істотних переваг, а саме [1]: зменшена маса конструкцій, що забезпечує зниження навантажень на фундаменти, підвищення вантажопідйомності залізобетонних плавучих споруд і зниження маси від повного навантаження конструкцій, які працюють на згин; підвищення стійкості до динамічних навантажень і вогнестійкості конструкції, підвищення продуктивності праці завдяки використанню більш простих механізмів для монтажу конструкцій.

Властивості матеріалу обумовлені його структурою. При цьому модель структури, що розглядається дослідником, має бути у відповідності до конкретного виробу або конструкції [2]. Наприклад, для легких бетонів пористість регулюють як на рівні заповнювача, так і на рівні розчинної складової, що дозволяє отримувати матеріали, які мають сприятливу для формування мікроклімату сорбційну вологість. При правильному призначенні складу бетони на пористих заповнювачах забезпечують первинний захист арматури від корозії без додаткових витрат і високу водонепроникність. В основі цього ефекту лежить протидія просуванню вологи, породжена стисненням повітрям у порах і капілярах заповнювача: чим глибше в товщу зерна проникає вода, тим сильніше протидія повітря (при забезпеченні необхідної структури). Таким чином, при певній глибині насичення подальше проникнення води в зерно пористого заповнювача припиняється [1]. Наприклад, у роботі [3] показано, що введення попередньо насиченого пористого заповнювача до складу високорухливого легкого бетону знижує капілярний підсос матеріалу і його проникність іонами хлору. Сам рівень водонепроникності легкого бетону є рівним до проникності важкого бетону з аналогічної кількістю в'язучого.

Одним із найбільш розповсюджених пористих заповнювачів для бетону є керамзит. У ньому поєднуються достатня міцність при малій середній густині, що обумовлює високу конструктивну ефективність і довговічність при низькій теплопровідності [4]. Для залізобетонного суднобудування у всьому світі сьогодні застосовують саме різні види керамічних заповнювачів. Зокрема, з легкого бетону класу по міцності LC-60 та марки за середньою густиною D1950 збудована плавуча нафтова платформа Heidun, яка працює в норвезькому секторі Північного моря [5]. До складу бетону для побудованої у 1998 році нафтової платформи Hibernia (Канада) частково входив спуче-



ний сланець Stalite: 255 кг/м³ у суміші з 430 кг/м³ гранітного щебеню, що складало майже 50% від об'єму крупного заповнювача. Щільність такого «напівлегкого» бетону – 2160 кг/м³, міцність – більше 70 МПа. Платформу експлуатують на глибині до 80 м а її корпус розрахований на 30 років роботи без ремонту [6]. Першою арктичною плавучою спорудою з бетону на пористих заповнювачах вважається кесонний острів Tarsiut island для моря Бофорта (Канада), який був збудований для видобутку піску у 1982 році та експлуатується і сьогодні [7]. Для цієї споруди застосовано бетон щільністю 2240 кг/м³, з якого було вироблено конструкції з попередньо напруженою арматурою. Легкий бетон класу LC55 (на основі заповнювача Liarog 8) застосовано для виробництва понтонів і головного прогону плавучого мосту Nordhordland Bridge у Норвегії [8]. Завдяки зниженню ваги конструкцій та улаштуванню водонепроникних переділок плавучість мосту забезпечується навіть при затопленні двох відсіків понтону. Конструкційний легкий бетон із щільністю біля 2000 кг/м³ і міцністю 35 МПа було застосовано для конструкцій плавучих воріт дамби Braddock на річці Мононгієла (Пенсільванія, США). Зниження щільності бетону дозволило знизити осадку плавучої споруди понад 3 м, що було важливо для конкретних умов експлуатації [9]. Одним із новітніх проектів споруд із легкого бетону у відкритому морі є спуско-підйомний комплекс MPU Heavy Lifter [10]. Його застосовували для демонтажу знятих із експлуатації платформ видобувних свердловин і для монтажу важких фундаментів вітрових установок у Північному морі. Вперше для морської споруди було використано легкий бетон, який частково включав легкий пісок для отримання бетону класу LC35/38 при середній густині менше 1600 кг/м³, що було необхідно для плавучості та міцності понтонів. Міжнародна федерація бетону і залізобетону (fib) ще у 1995 році сформулювала рекомендації щодо повного переходу на застосування в конструкціях нафтових платформ високоміцного легкого бетону спочатку класів LC40-50, а потім і класів LC60-70 [11]. При цьому для такого бетону рекомендовано використовувати природні пористі заповнювачі з вулканічних або осадових гірських порід, а також штучні пористі заповнювачі, зокрема на основі продуктів переробки за екологічно чистими і низькоенергоємними технологіями великих техногенних утворень металургії, паливної енергетики та хімічної промисловості.

В Україні також існує досвід застосування суднобудівного керамзитобетону. На Херсонському заводі залізобетонного суднобудування «Паллада» в 70-ті роки минулого століття було побудовано кілька керамзитобетонних плавучих доків [12]. Обстеження даних плавучих споруд показало довговічність конструкцій з керамзитобетону при експлуатації в Баренцевому, Каспійсько-

му та інших морях [13]. Більшість із цих доків експлуатується і зараз [14]. Сьогодні Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування.

Проведений аналіз досвіду застосування бетонів на основі легких заповнювачів у гідротехнічному і транспортному будівництві показав, що при проектуванні їх складу подібні матеріали мають високу довговічність та необхідні фізико-механічні характеристики при забезпеченні зниження ваги конструкцій. При цьому одним із найперспективніших напрямків застосування легкого конструкційного бетону є залізобетонне суднобудування. Для більш ефективного застосування подібних матеріалів у вітчизняній і світовій практиці необхідне опрацювання наукових основ підвищення їх довговічності, а також створення технологій їх виробництва.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвиток теоретичних основ і створення практичних прийомів підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд (зокрема плавучих залізобетонних) за рахунок оброблення поверхні пористого заповнювача та застосування модифікаторів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Бетон гідротехнічних і транспортних споруд зазнає одночасного впливу різних експлуатаційно-кліматичних факторів, які викликають руйнування його структури. Це зміна температури, заморожування відтаювання, зволоження та висушування, хімічні впливи, обростання водоростями й живими організмами, а також тиск і динамічний вплив рідини та льоду. Г.П. Вербецьким встановлено [15], що основною умовою довговічності бетону у водному середовищі є його непроникність, яка забезпечується зниженням наскрізної пористості. Однак при одночасній дії знакозмінних температур також не менш важливою можна вважати морозостійкість бетону, яку найбільш ефективно підвищити за рахунок створення системи замкнених пор. Тому з усіх характеристик бетону, що впливають на його довговічність, слід виділити його морозостійкість і непроникність.

За параметрами пористості матеріалу можна лише приблизно судити про ступінь його проникності. Для капілярно-пористого матеріалу зі сполученими капілярами змінного перерізу проникність характеризується найменшим діаметром каналів, а не середніми розмірами сполучених пор, тому, що великі пори, що визначають величину пористості матеріалу, можуть з'єднуватися мікрокапілярами, які і визначатимуть проникність матеріалу [16]. У бетонах на легких пористих заповнювачах капілярно-пористу структуру має не тільки цементний камінь, а й сам заповнювач. На відміну від важких бетонів, значний вплив на



властивості матеріалу має процес міграції води як у заповнювачі, так і з нього. В роботі [17] встановлено, що подібні процеси протікають по закону маятника. Тобто, пориста структура заповнювача є причиною доволі складних тепломасообмінних процесів, що проходять у суміші з моменту її змішування з водою і продовжуються тривалий час при твердінні бетону і експлуатації бетонної конструкції. Ці процеси в різній мірі впливають на структуру під час приготування, укладання, ущільнення суміші та при наборі міцності бетону. І.А. Іванов [1] зазначав, що при оцінюванні структури бетону, особливо легкого, необхідно звертати увагу на два її основні критерії: однорідність і злитість. Також він звертає увагу на те, що важливою особливістю структури бетонів на пористих заповнювачах є підвищене зчеплення його цементно-піщаної частини із заповнювачем, яка у 1,7-2,5 рази вища порівняно зі зчепленням із щільним щебенем.

Для бетонів характерні три можливі варіанти руйнування під впливом навантажень [18]: по розчинній частині при незруйнованому заповнювачі; по розчинній частині та по контактній зоні між розчинної частиною і заповнювачем; по заповнювачу і розчинній частині. Для бетонів на пористих заповнювачах найбільш характерним є другий і третій варіанти. Тобто сила зчеплення розчинної частини з заповнювачем є важливою особливістю структури легких бетонів, яка зумовлює іншу схему руйнування, ніж у важкого бетону. Відповідно технологічні методи, спрямовані на підвищення міцності та покращення інших фізико-механічних показників легких бетонів, доволі суттєво відрізняються від аналогічних методів для важких бетонів.

Відомо, що фізичні сили взаємодії між цементної матрицею і крупним заповнювачем обумовлені, насамперед, стягуванням цементного каменю при його усадці, а також наявністю ділянок хімічного зчеплення і донорно-акцепторної взаємодії. Для кращої реалізації сил адгезії і тертя необхідно забезпечити щільний контакт поверхонь в'язучого і заповнювача як визначальних міжфазних поверхонь для даного композиційного матеріалу [19]. Більшість дослідників однією з причин досить щільного прилягання в'язучого до заповнювача і арматури називають наявність стягуючих сил, обумовлених усадковими деформаціями. Проте, у роботі [20] не підтвердили існування обтискаючих заповнювач напружень ні при усадці, ні при дії зовнішнього пресуючого тиску, а також після тверднення бетону впродовж 21 доби. Вони пояснювали це явище наявністю контракції цементного каменю в процесі його твердіння, яка нівелює тиск на заповнювач до кінця процесу формування структури бетону.

У дослідженнях наукової школи В.М. Вирового [2, 21] показано, що на границі матричного ма-

теріалу з заповнювачем відбуваються структурні процеси різної спрямованості. Залежності від співвідношення величин когезійної і адгезійної міцностей в матричному матеріалі при твердінні виникають різноспрямовані деформації різної величини. Це веде до зміни щільності в локальних ділянках матриці та провокує зміну форми поверхонь поділу та виникнення нових поверхонь. За рахунок цього виникають порожнини як тріщини на границі з заповнювачем та у матричному матеріалі. При когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача тріщини на внутрішній поверхні поділу утворюються переважно на границі з заповнювачем. При когезії меншій за адгезію структурні елементи утворюються переважно у цементній матриці. Найбільш складними є деформації матриці, що твердне, при її вибірковій адгезії до заповнювача, що, наприклад, характерно для гранітного щебеню [21].

У роботі [22] показано, що при мікроруйнуванні в структурі бетону найбільша кількість тріщин спостерігається саме в контактній зоні заповнювач – цементна матриця, причому тріщини по межі зчеплення частіше всього є відкритими і безперервними. Тріщини зчеплення виникають як результат водовідділення і диференціальних об'ємних деформацій, тобто є різновидом технологічних тріщин [2, 21]. Такі тріщини в цементній матриці проходять через пори та в більшості випадків – по нижній межі зерен крупного заповнювача. Невеликі нерівності зерен не впливають на безперервність тріщин зчеплення. Тонкі тріщини в цементній матриці зазвичай поширювалися між сусідніми зернами великого заповнювача. По подібним структурним елементам у бетоні може переноситися рідина та газ. При цьому на загальну проникність композиту буде впливати не лише геометрія цих тріщин і порожнин, а і проникність заповнювача.

У бетоні з заповнювачем обкатаної форми залежно від способу ущільнення зерен на їх стижах утворюються порожнини з цементної матриці, які мають трикутну або чотирикутну форму з гострими кроями. Через те, що у даних порожнинах власні деформації розтягування і напруження будуть більші, ніж у прошарках між двома зернами заповнювача, в них відбувається зародження і розвиток найбільшої кількості усадочних мікро- і макротріщин. Відповідно однією з причин зниження міцності бетону при зменшенні витрат розчинної складової, тобто зниженні товщини цементно-піщаної оболонки навколо частинок крупного заповнювача, є зменшення тріщиностійкості цього кільця через надмірне зростання тангенціальної складової власних деформацій і напружень при усадці. У роботі [23] зроблено висновки, що негативний вплив зменшення товщини цементної оболонки на стійкість бетону залежить від усадки цементної матриці.



Проте, одночасно з процесами, які охарактеризовано вище і які є спільними для бетонів на різних типах заповнювача, у бетонах на пористих заповнювачах активно проходять процеси масообміну між розчинною складовою і крупним заповнювачем. Важливим є те, що глибина, інтенсивність і навіть напрям цього масообміну на різних етапах формування та існування структури залежать від властивостей як заповнювача, зокрема його поверхні, так і від властивостей цементно-піщаної матриці. З одного боку, зерна пористого заповнювача адсорбують воду з навколишнього розчину, що поліпшує зчеплення заповнювача з розчином, перешкоджає утворенню седиментаційних пустот і сприяє формуванню навколо зерен шару зі зміщеного розчину. Такий процес прийнято називати «самовакуумуванням». Проте протікання цього процесу суттєво залежить від розмірів і пористості заповнювача та від ступеня його попереднього зволоження в процесі приготування бетонної суміші. При достатньому ступені заповнення вологою порожнин заповнювача в процесі його попереднього перемішування з водою в бетонозмішувачі подальша адсорбція води з розчину буде мінімальною і обумовленою насамперед повільним поступовим проникненням вологи вглиб зерна заповнювача. Тобто при використанні більш крупного заповнювача процес адсорбції вологи буде протікати довше, ніж при використанні більш дрібних його фракцій (гранул).

Із часом у процесі структуроутворення (твердіння бетону), як відомо, буде проходити зворотній процес міграції вологи із заповнювача до розчинної частини, що зменшує усадку останньої і сприяє кращій гідратації цементу. Протікання цього процесу також залежить від капілярно-пористої структури і крупності заповнювача. Також необхідно враховувати набухання і усадку самого зерна заповнювача. Тобто в міру зволоження, яке відбувається в процесі приготування і укладання бетонної суміші, пористі заповнювачі більшою чи меншою мірою збільшуються в об'ємі. При втраті вологи проходить зворотній процес – усадка зерен заповнювача.

Залежно від адгезійних властивостей поверхні заповнювача змінюється вплив його крупності на міцність бетону. При забезпеченні достатньої адгезії заповнювача до цементної матриці при підвищенні його крупності міцність бетону зменшується. У випадку незначної адгезії зерен навпаки – зростає при використанні більш крупного заповнювача [24]. Крім того, при підвищенні крупності зерен заповнювача зменшується однорідність бетону за міцністю, відношення міцності на згин до міцності при стисканні, а також границі мікротріщиноутворення [25].

Для бетонів на пористих заповнювачах, які з одного боку мають гарну адгезію до цементної матриці, а з іншого – змінюють свій об'єм через

набухання і висушування, корисними є як технологічні операції, спрямовані на зменшення водопоглинання заповнювача, так і спрямовані на покращення його адгезії. Для конструкційних легких бетонів високої міцності також актуальною є завдання підвищення міцності заповнювача. Це пов'язано з тим, що для таких матеріалів значною мірою саме цей показник, а не витрата в'язучого, обмежує їх максимальну міцність. Обидва окреслених вище завдання було запропоновано вирішити двома методами, кожен із яких має свої особливості.

Перший метод – гідрофобізація поверхні пористого заповнювача. Це дозволяє знизити адсорбцію води з цементної матриці (розчинної частини), за рахунок чого підвищити водоцементне відношення суміші без погіршення її технологічності, а також зменшити зміни об'єму зерен заповнювача та матриці в процесі структуроутворення [26]. Крім того, гідрофобізація пористого заповнювача сприяє перетворенню значної частини його пор на замкнуті, що знижує проникність композиту в цілому і сприяє підвищенню його довговічності. Для бетонів гідротехнічних і транспортних споруд гідрофобізація заповнювача також дозволяє знизити експлуатаційну вологість матеріалу (в першу чергу – самого заповнювача), що підвищує міцність у вологих умовах експлуатації а для закритих приміщень також підвищує комфортність експлуатації. Важливо зазначити, що ступень гідрофобізації має бути оптимальною для кожного типу бетону залежно від властивостей заповнювача і цементної матриці. Тобто, необхідно зберігати певний баланс між зниженням водопоглинання заповнювача і його адгезією до цементної матриці.

Експериментальні дослідження суднобудівного керамзитобетону із застосуванням гідрофобізації поверхні гравію показали [27], що даний технологічний прийом дозволяє підвищити водонепроникність легкого бетону на 1 марку (2 атм.). Також він приблизно на 50 циклів підвищує морозостійкість керамзитобетону та на 10-12% його міцність при стисканні. Ще досить важним ефектом було зниження приблизно на 20% експлуатаційної вологості легкого конструкційного бетону в умовах постійного контакту з водою. Гідрофобне оброблення проводили емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М (стара назва ГКЖ-94) різної концентрації. Було встановлено оптимальну концентрацію гідрофобізатора в емульсії – 0,6-0,7%. Подальше підвищення концентрації кремнійорганічної рідини неефективно. Основним недоліком такого прийому модифікації є необхідність проведення додаткової технологічної операції при виробництві бетону.

Другий метод – оброблення пористого заповнювача цементною суспензією. Його проводили безпосередньо при змішуванні, тобто цей прийом технологічно є простішим. Для оброблення у змі-



шувач подають всю необхідну воду з 30% від необхідної на заміс кількості портландцементу. Далі протягом хвилини готується суспензія (проводиться перемішування), у яку потім подають пористий заповнювач. Після ще приблизно однієї хвилини перемішування заповнювача у цементній суспензії для здійснення безпосередньо оброблення, у змішувач подають решту компонентів легкобетонної суміші. Оптимальну кількість цементу у суспензії було визначено за результатами попередніх експериментів при кількості в'язучого у бетоні від 400 до 500 кг/м³. Зазначений технологічний прийом відрізняється від класичної технології приготування легкобетонної суміші лише тим, що у змішувачі пористий заповнювач насичується не водою, а цементною суспензією, через це загальний час перемішування збільшується приблизно на 1 хвилину.

Оброблення цементною суспензією зміцнює поверхневий шар крупного пористого заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону. Тобто підвищує адгезію заповнювача до матриці. Справедливо відзначити, що ступінь як зміцнення заповнювача, так і зміни адгезії залежить від структури зерен заповнювача. Також важливим ефектом оброблення є те, що вона дозволяє покращити однорідність заповнювача завдяки заповненню його тріщин, пор та інших порожнин цементним тістом. Останній ефект є найбільш важливим при використанні природних пористих заповнювачів, які зазвичай є досить різномірними за щільністю та міцністю навіть у межах однієї партії. Більш пористі та тріщинуваті зерна, які є слабкішими і, відповідно, руйнуються при меншому навантаженні та є більш проникними для рідини і газу, завдяки насиченню в'язучим менше відрізняються від більш щільних зерен, що робить структуру бетону більш однорідною.

Було проведено дослідження ефективності технологічного прийому оброблення цементною суспензією заповнювача суднобудівних керамзитобетонів і бетонів на щебені з перекристалізованого вапняку. Було встановлено, що для суднобудівних керамзитобетонів, у яких використовували керамзитовий гравій крупністю до 10 мм, попереднє оброблення дозволяє підвищити міцність при стисканні на 5-10% і водонепроникність матеріалу на одну марку. Для бетонів на вапняковому заповнювачі (фракція щебеню 5-20 мм, насипна густина 1200 кг/м³, марка за міцністю 600) оброблення цементною суспензією підвищує міцність при стисканні на 10-15% і водонепроникність у середньому на одну марку. При цьому максимальна водонепроникність модифікованого суперпластифікатором і мікрокремнеземом керамзитобетону та бетону на обробленому щебені становила марку W14 [28, 29]. Таким чином, метод оброблення цементною суспензією є більш ефективним для бетонів на природних пористих заповнювачах, є

також ефективним для підвищення довговічності конструкційних керамзитобетонів.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цілому обидва проаналізовані методи модифікації поверхні пористого заповнювача дозволяють підвищити довговічність конструкційних бетонів на легких заповнювачах для гідротехнічних і транспортних споруд завдяки підвищенню водонепроникності та міцності матеріалу. При цьому метод гідрофобізації поверхні є більш раціональним при виробництві бетонів конструкцій, для яких важливою є експлуатаційна вологість. Зокрема, це конструкції плавучих доків, готелів, домів та споруд для освоєння континентального шельфу. Метод оброблення пористого заповнювача цементною суспензією є більш ефективним для бетонів на природних пористих заповнювачах завдяки підвищенню їх однорідності. Також він досить ефективно підвищує довговічність конструкційних керамзитобетонів завдяки сприянню утворення замкнутої пористості у заповнювачі. Обидва проаналізовані методи позитивно впливають на міцність заповнювача, проте по-різному на його адгезію до цементної матриці. Відповідно від співвідношення величин когезійної і адгезійної міцності компонентів у композиті, а також від крупності заповнювача, можна рекомендувати той чи інший спосіб модифікації його поверхні для досягнення підвищення довговічності бетону.

Також важливо відзначити, що завдання підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах для гідротехнічних і транспортних споруд має вирішуватися комплексно. Тобто склад бетону необхідно проектувати з врахуванням забезпечення мінімальної проникності і високої морозостійкості, для чого мають бути застосовані сучасні модифікатори. Зокрема, представлені дослідження показали високу ефективність комплексних добавок, які складаються з суперпластифікатора і кольматуючої добавки або з суперпластифікатора і мікрокремнезему.

Таким чином, проведені дослідження дозволили розвинути теоретичні основи отримання бетонів на легких заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для гідротехнічних і транспортних споруд. Запропоновано практичні технологічні прийоми, які дозволяють знизити проникність бетонів і забезпечити замкнуту пористість заповнювача, за рахунок чого підвищити довговічність композиту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. - М.: Стройиздат, 1993. 182 с.



2. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. - Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.
3. Liu X., Chia K.S., Zhang M.-H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration – Cement and Concrete Composites, 2010, Vol. 32, Iss. 10. P. 757-766.
4. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Керамзит: опыт и перспективы развития производства и применения // Строит. материалы, 2004. № 8. С. 19-20.
5. Helland S., Aarstein R., Maage M. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance – Structural Concrete (J. of fib). 2010, vol. 11, no. 1. P. 15-24.
6. Aitcin P.-C. High performance concrete (Modern concrete technology). – E & FN Spon: 2011. 624 p.
7. Fitzpatrick J. & Stenning D.G. Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea / J. Fitzpatrick // 15th Annual offshore technology conf., Houston, United States; J.Vol. 2; 2-5 May, 1983, Paper No. OTC 4517. P. 51-60.
8. Johnsen H., Helland S., Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge // Proc. of Intern. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Sandefjord, 1995. P. 373–379.
9. Tasillo C.L., Neeley B.D., Bombich A.A. Lightweight concrete makes a dam float. Special Publication 218 // High-Performance Structural Lightweight Concrete, Amer. Concrete Inst., Farmington Hills, MI, 2004. P. 101-130.
10. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology // Science press, Beijing, China, 2017. 280 p.
11. Lightweight aggregate concrete. Recommended extension to Model Code 90, Guide. Identification of research needs, techn. report. Case Studies, State-of-art report. fib Bull. No. 8, 2000. 118 p.
12. Мишутин В.А., Мишутин Н.В., Яковлева Р.В. Применение легких судостроительных бетонов для постройки морских железобетонных судов и плавучих доков // Технология судостроения, 1986. №8. С. 23–25.
13. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений. - Одесса: Эвен, 2011. 292 с.
14. Слуцкий Н.Г., Маломан В.Ф., Рашковский А.С. Строительство железобетонных плавучих сооружений в Украине // Рыбное хозяйство Украины. Специальный вып. «Морские технологии: проблемы и решения - 2004». - Керчь, 2004, № 7. С. 23–26.
15. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. – М.: Стройиздат, 1976. 128 с.
16. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. – М.: Энергия, 1968. 192 с.
17. Орендлихер Л.П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях. – М.: Стройиздат, 1988. 136 с.
18. Корнилович Ю.Е. Исследование прочности растворов и бетонов. - Киев: Госстройиздат УССР, 1960. 220 с.
19. Гладышев Б.М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетонов. - Харьков: Вища школа, 1987. 168 с.
20. Булатов А.И., Видовский А.Л. Обжатие цементным камнем заполнителей в бетоне // Бетон и железобетон, 1985. №3. С.24–26.
21. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. - Одесса: ТЕС, 2010. 176 с.
22. Ключко Б.Г., Кушвид А.А. Трещинообразование бетона в процессе эксплуатации конструкций // Вісн. Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 2004. Вип. 3. С. 124-126.
23. Тольпина Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей: дис. д-ра техн. наук: 05.23.05. - Белгород, БГТУ, 2014. 354 с.
24. Грушко И.М. Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение. - Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1973. 155 с.
25. Зошук Н.И. Влияние крупности заполнителя на прочность бетона // Бетон и железобетон, 1988. №1. С. 8-9.
26. Кучеренко А.А. О механизме гидрофобизации бетона // Вісн. Одеської державної акад. буд-ва та архітектури. Вип. 35. Одеса: Зовнішреклам-сервіс, 2009. С. 207-213.
27. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N. & Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. ICCS16. Proc. of the Second Intern. Conf. on Concrete Sustainability, held in Madrid, Spain on 13 – 15. June 2016. P. 741-747.
28. Мішутін А.В., Кров'яков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією // Вісн. ОДАБА. №67. Одеса: ОДАБА, 2017. С. 89-95.
29. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону / [Кров'яков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В. та ін.] // Матер. міжн. науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2016. С. 65-67.

REFERENCES

1. Ivanov I.A. Lightweight concretes on artificial porous aggregates. – Moscow: Stroyizdat, 1993. – 182 p. [in Russian].



2. Sukhanov V.G., Vyrovoy V.N. & Korobko O.A. Structure of the material in the structure of the constructions. – Odessa: Poligraf, 2016. – 244 p. [in Russian].
3. Liu X., Chia K.S. & Zhang M.-H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration - Cement and Concrete Composites, 2010, vol. 32, iss. 10. – P. 757-766.
4. Gorin V.M., Tokareva S.A. & Kabanova M.K. Expanded clay: experience and perspectives of production and application development - Building materials, 2004, № 8. – P. 19-20 [in Russian].
5. Helland S., Aarstein R. & Maage M. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance – Structural Concrete (J. of fib). 2010, vol. 11, no. 1 – P. 15-24.
6. Aitcin P.-C. High performance concrete (Modern concrete technology). – E & FN Spon: 2011 – 624 p.
7. Fitzpatrick J. & Stenning D.G. Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea - 15th Annual offshore technology conf., Houston, United States; J. Vol. 2; 2-5 May, 1983, Paper No. OTC 4517 – P. 51-60.
8. Johnsen H., Helland S. & Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge – Proc. of Intern. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Sandefjord, 1995. – P. 373-379.
9. Tasillo C.L., Neeley B.D. & Bombich A.A. Lightweight concrete makes a dam float / Special Publication 218: High-Performance Structural Lightweight Concrete, Amer. Concrete Inst., Farmington Hills, MI, 2004. – P. 101-130.
10. Liu G. & Li H. Offshore platform integration and floatover technology - Science press, Beijing, China, 2017. – 280 p.
11. Lightweight aggregate concrete. Recommended extension to Model Code 90, Guide. Identification of research needs, techn. report. Case Studies, State-of-art report. - fib Bull. No. 8, 2000. – 118 p.
12. Mishutin V.A., Mishutin N.V. & Yakovleva R.V. Application of lightweight shipbuilding concretes for construction of marine reinforced concrete vessels and floating docks. - Technology of shipbuilding, 1986, №8. – P.23-25 [in Russian].
13. Mishutin A.V. & Mishutin N.V. Increase of durability of concrete of marine reinforced concrete floating and stationary structures. – Odessa, Even, 2011. – 292 p. [in Russian].
14. Slutsky N.G., Maloman V.F. & Rashkovsky A.S. Construction of reinforced concrete floating structures in Ukraine - Fisheries of Ukraine. Special issue "Marine technologies: problems and solutions - 2004", Kerch, 2004, № 7. – P. 23-26 [in Russian].
15. Verbetzky G.P. Strength and durability of concrete in an aquatic environment. – Moscow: Stroyizdat, 1976. – 128 p. [in Russian].
16. Chekhovsky Yu.V. Reducing the permeability of concrete. – Moscow: Energia, 1968 – 192 p. [in Russian].
17. Orentlicher L.P. Concretes on porous aggregates in prefabricated reinforced concrete structures. – Moscow: Stroyizdat, 1988. – 136 p. [in Russian].
18. Kornilovich Yu.E. Investigation of the strength mortars and concretes. – Kiev: Gosstroyizdat of the Ukrainian SSR, 1960. – 220 p. [in Russian].
19. Gladyshev B.M. Mechanical interaction of structural elements and strength of concrete. – Kharkov: Vishcha shkola, 1987. – 168 p. [in Russian].
20. Bulatov A.I. & Vidovsky A.L. Compression by cement stone aggregates in concrete – Concrete and reinforced concrete, 1985, №3. – P. 24-26 [in Russian].
21. Vyrovoy V.N., Dorofeev V.S. & Sukhanov V.G. Composite building materials and structures. Structure, self-organization, properties. – Odessa, TES, 2010. – 176 p. [in Russian].
22. Klochko B.G. & Kushvid A.A. Cracking of concrete in the process of exploitation of structures – Bull. of the Dnipropetrovsk Nat. Univ. of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2004, Iss. 3. – P. 124-126 [in Russian].
23. Tolypin N.M. Increase of corrosion resistance of concrete by rational choice of binder and fillers. - Extended abstract of candidate's thesis: 05.23.05. – Belgorod: BSTU, 2014. – 354 p. [in Russian].
24. Grushko I.M., Ilyin A.G. & Rashevsky S.T. Strength of concrete for tension. – Kharkov: Kharkov University, 1973. – 155 p. [in Russian].
25. Zoshchuk N.I. Effect of aggregate size on the strength of concrete. - Concrete and reinforced concrete, 1988, №1. – P.8-9 [in Russian].
26. Kucherenko A.A. On the mechanism of hydrophobization of concrete. – Bull. of the Odessa State Acad. of Civil Engineering and Architecture. Vol. 35. – Odessa: Zovnisreklamservice, 2009. – P. 207-213 [in Russian].
27. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N. & Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. ICCS16. – Proc. of the Second Intern. Conf. on Concrete Sustainability, Madrid, Spain on 13 - 15 June 2016 – P. 741-747.
28. Mishutin A.V., Krovyakov S.O. & Poltorapavlov A.O. Durability of concrete on limestone crushed stone treated with a cement slurry – Bull. of the Odessa State Acad. of Civil Engineering and Architecture, vol. 67. – Odessa, OSACA, 2017. – P. 89-95 [in Ukrainian].
29. Krovyakov S.O., Mishutin A.V., Pishchev O.V. & Zavoloka M.V. Application of the methods of experiment planning in the study of the properties of expanded clay concrete - Materials of the intern, scientific and technical seminar "Modeling and optimization of building composites". – Odessa, OSACA, 2016. – P.65-67 [in Ukrainian].