УДК 691.327.32

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ СУДНОБУДІВНИХ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ

Мішутін А.В., д.т.н., професор,
Кровяков С.О., к.т.н., доцент,
Піщев О.В., аспірант,
Заволока М.В., к.т.н., професор,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
skrovyakov@ukr.net

Анотація. Досліджено вплив складу модифікованого керамзитобетону для тонкостінних плавучих і гідротехнічних споруд на його механічні властивості. Бетони виготовлялися з сумішей рівної рухливості П2. Міцність при стиску досліджених бетонів знаходилася у діапазоні від 32 до 43 МПа. Встановлено, що введення мікрокремнезему в кількості 30-35 кг/м^3 підвищує міцність при стиску керамзитобетонів на 5-7%, а міцність на розтяг при згині – на 6-8%. Модифіковані керамзитобетони можуть бути використані при будівництві тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих доків, будинків і готелів.

Ключові слова: залізобетонне суднобудування, керамзитобетон, мікрокремнезем, пластифікатор, експериментально-статистичне моделювання.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ

Мишутин А.В., д.т.н., профессор,
Кровяков С.А., к.т.н., доцент,
Пищев О.В., аспирант,
Заволока М.В., к.т.н., профессор,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
skrovyakov@ukr.net

Аннотация. Исследовано влияние состава модифицированного керамзитобетона для тонкостенных плавучих и гидротехнических сооружений на его механические свойства. Бетоны изготавливались из смесей равной подвижности П2. Прочность при сжатии исследованных бетонов находилась в диапазоне от 32 до 43 МПа. Установлено, что введение микрокремнезема в количестве 30-35 кг/м^3 повышает прочность при сжатии керамзитобетонов на 5-7%, а прочность на растяжение при изгибе – на 6-8%. Модифицированные керамзитобетоны могут быть использованы при строительстве тонкостенных гидротехнических сооружений, в частности плавучих доков, домов и отелей.

Ключевые слова: железобетонное судостроение, керамзитобетон, микрокремнезем, пластификатор, экспериментально-статистическое моделирование.

MECHANICAL PROPERTIES OF MODIFIED SHIPBUILDING EXPANDED CLAY CONCRETE

Mishutin A.V., Doctor of Engineering, Professor,
Kroviakov S.O., PhD., Assistant Professor,
Pishev O.V., graduate student,
Zavoloka M.V., PhD., Professor ,

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
skrovyakov@ukr.net

Abstract. The object of research is modified expanded clay lightweight concrete for thin-walled floating and hydraulic structures. Influence of composition expanded clay concrete on its mechanical properties has been found. Planned three-factor experiment was conducted. Such concrete composition were varied: the amount of cement (500-600 kg/m^3), silica fume (0-50 kg/m^3) and superplasticizer S-3 (0.5-1%). Silica fume is promising modifier waste Ukrainian Ferroalloy Plant. Concretes were made from equal mixtures mobility P2 (4-6 cm). W/C of mixture has varied depending on the concrete composition. Increasing the amount of additive S-3 reduces the W/C of mixture. When administered silica fume in amounts up to 30 kg/m^3 W/C of mixture hardly changes. When administered to 50 kg/m^3 silica fume W/ C is increases.

It is found that the compressive strength of concrete is in the range of 32 to 43 MPa. By increasing the amount of cement strength increases, but this increase is not linear type. Tensile strength of concrete was in the range of 5.6 to 7.0 MPa. When administered to 30-35 kg/m^3 silica fume of about 2 MPa increases compressive strength expanded clay lightweight concrete 0.3 MPa and the tensile strength increases with bending. By increasing the amount of additive S-3 is significantly increased compressive strength concrete. However, the introduction of additives increases tensile strength is less when bending.

The modified expanded clay lightweight concrete has a relatively low bulk density with high strength. They can be used in thin-walled construction of hydraulic structures, in particular floating docks, houses and hotels.

Keywords: shipbuilding reinforced concrete, expanded clay lightweight concrete, silica fume, plasticizer, experimental and statistical modeling.

Вступ. Керамзитобетон є добре відомим матеріалом, який має велику міцність при відносно малій середній густині. У залізобетонному суднобудуванні крім важких бетонів застосовуються високоміцні керамзитобетони, завдяки яким знижується вага судна, відповідно, підвищується його вантажопідйомність. Застосування легких бетонів також дозволяє поліпшити комфортність перебування людей в приміщеннях залізобетонного судна.

Для забезпечення необхідного рівня механічних властивостей і довговічності матеріалу конструкцій плавучих споруд зараз фактично використовуються лише модифіковані бетони, зокрема легкі. Основними видами модифікаторів для суднобудівних бетонів є пластифікатори і кольматуючі добавки. Переважна більшість якісних кольматуючих добавок на ринку України є імпортними, відповідно в новітніх економічних умовах їхня вартість значно зросла. Проте дослідження багатьох учених показують, що ефективним модифікатором для матеріалів на основі цементу, зокрема для легких бетонів, є мікрокремнезем, який є відходом вітчизняних феросплавних виробництв. Відповідно актуальним є дослідження впливу мікрокремнезему на властивості модифікованих суднобудівних бетонів.

Аналіз останніх досліджень. Багаторічний досвід застосування суднобудівного керамзитобетону довів його ефективність. У 1919 році було побудоване перше керамзитобетонне судно танкер SS «Selma», корпус якого задовільно зберігся по сьогодні у частково затопленому стані [1]. Всього за час першої світової війни з армованого легкого бетону було збудовано 12 суден загальною водотоннажністю 60000 т [2]. Масовим будівництво залізобетонних суден стає у період другої світової війни, за час якої було спущено на воду 104 подібних судна [3]. Проведені спеціалістами з США обстеження корпусів чотирьох керамзитобетонних суден у віці від 55 до 80 років показали високу довговічність матеріалу в агресивному морському середовищі. Легкий бетон мав міцність від 34 до 60 МПа, глибину карбонізації до 5 мм, а більшість дефектів конструкцій була пов'язана з порушенням захисного шару [4].

Крім довговічності спеціалісти вказують на гарну ремонтопридатність конструкцій з керамзитобетону і збереженість сухих вантажів [3]. Останній факт обумовлений набагато меншим ступенем конденсації вологи на корпусі судна з легкого бетону в порівнянні з металевим.

Високоміцний пористий керамічний заповнювач використовувався для виробництва бетону при будівництві плавучих нафтових платформ [5, 6]. Зокрема, з легкого бетону класу по міцності LC-60 збудована плавуча нафтова платформа Heidun, яка працює в норвезькому секторі Північного моря (рис.1) [7]. Бетони на пористих заповнювачах показали високу довговічність в суворих умовах експлуатації у водах з сульфатами і хлоридами та при дії заморожування і відтаювання [8]. Є позитивний досвід будівництва керамзитобетонних плавучих доків і в Україні на заводі залізобетонного суднобудування «Паллада» (м. Херсон) [9].

Рис.1. Плавуча нафтова платформа Heidun. Побудована з легкого бетону класу LC-60

Авторським колективом учених Одеської академії будівництва та архітектури були розроблені склади суднобудівних модифікованих керамзитобетонів з високим рівнем міцності, водонепроникності і морозостійкості, що забезпечило підвищення довговічності матеріалу. Розроблені керамзитобетони відповідають вимогам Морського регістру і можуть бути використані для будівництва стоянкових суден, що експлуатуються в різних кліматичних умовах [10, 11]. Результати досліджень впроваджено на практиці – розроблено і затверджено «Регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків» для заводу залізобетонного суднобудування «Паллада».

В якості основного модифікатора для покращення властивостей і довговічності суднобудівного керамзитобетону в розроблених складах застосовувався комплексний модифікатор Пенетрон А + С-3. Добавка Пенетрон А є імпортною і в останній час її вартість значно зросла. Тому викликає наукову цікавість дослідження можливості застосування альтернативних вітчизняних модифікаторів, зокрема мікрокремнезему. Представлений на ринку України мікрокремнезем – це відхід металургійного виробництва феросиліцію і його сплавів [12]. Застосування мікрокремнезема в якості активної мінеральної добавки є одним з найбільш перспективних напрямків у технології високоякісних композитів на основі портландцементів [13]. Зокрема, при виробництві легкого бетону для нафтової платформи Heidun в його склад додавався мікрокремнезем в кількості 20 кг/м^3 [7].

Мікрокремнезем здатний зменшити об'ємні зміни, викликані реакціями між лугами і заповнювачем, за рахунок чого знижується кількість мікротріщин в композиті [14]. Структуроутворююча роль мікрокремнезема проявляється також в якості мікронаповнювача. Проте ефективне застосування мікрокремнезема можливо лише в комплексі з

суперпластифікатором, за рахунок якого нівелюється проблема підвищеної водопотреби даного компонента. При цьому утворюється органо-мінеральний комплекс, в результаті дії якого відбувається збільшення кількості коагуляційних контактів на стадії формування структури, збільшується в'язкість і пластична міцність, заповнюється поровий простір [13].

Метою роботи є дослідження механічних властивостей модифікованих суперпластифікатором С-3 і мікрокремнеземом керамзитобетонів для тонкостінних плавучих та гідротехнічних споруд.

Об'єкти і методи дослідження. Досліджувалися механічні властивості керамзитобетонів для тонкостінних плавучих та гідротехнічних споруд. В якості крупного пористого заповнювача використовувався керамзит виробництва Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм з насипною щільністю гравію 655 кг/м^3. В якості дрібного заповнювача – митий кварцовий пісок з Мкр=2.4. В якості в'яжучого – сульфатостійкій портландцемент марки 400.

За 15-ти точковим оптимальним планом був проведений 3-х факторний експеримент [15], у якому варіювалися наступні фактори складу керамзитобетону:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м^3;

X_2 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 50 кг/м^3;

X_3 – кількість добавки С-3, від 0.5 до 1.0% від маси цементу.

Всі суміші мали рівну рухомість П2 (ОК від 4 до 6 см), що досягалося підбором кількості води. Перемішування сумішей проводилося в гравітаційному змішувачі з попереднім насиченням гравію водою, яка враховувалася при розрахунках В/Ц. У віці 28 діб досліджувалися міцність при стиску і міцність на розтяг при згині дрібнозернистих керамзитобетонів при рівноважній вологості.

Результати досліджень. Як зазначено вище, водопотреба і, відповідно, В/Ц відношення сумішей залежало від складу керамзитобетону. За даними, які були отримані в 15-ти експериментальних точках, була побудована експериментально-статистична (ЕС) модель впливу факторів складу на В/Ц суміші рівної рухомості:

$$\begin{aligned} В/Ц_a = 0.318 &- 0.025x_1 + 0.022x_1^2 \pm 0\, x_1x_2 + 0.007x_1x_3 \\ &+ 0.012x_2 + 0.021x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\ &- 0.032x_3 + 0.009x_3^2 \end{aligned} \qquad (1)$$

За даною ЕС-моделлю була побудована діаграма у вигляді кубу, яка відображена на рис. 2. Її аналіз показує, що збільшення кількості портландцементу і добавки С-3 знижує В/Ц суміші рівної рухомості. Проте характер цього впливу є нелінійним. Відповідно зміна кількості в'яжучого від 500 до 550 кг/м^3 відчутно знижує В/Ц, а зміна від 550 до 600 кг/м^3 – вже несуттєво. Аналогічно, по мірі зростання кількості суперпластифікатору з 0.5 до 0.8% його вплив на В/Ц значно вищий, ніж при підвищені кількості С-3 від 0.8 до 1%. При введенні в керамзитобетонну суміш мікрокремнезему у кількості до 30 кг/м^3 її В/Ц несуттєво змінюється. Збільшення кількості мікрокремнезему до 50 кг/м^3 викликає необхідність підвищення В/Ц або кількості добавки С-3 для збереження рухомості суміші.

За ЕС-моделями, аналогічними (1), були побудовані діаграми у вигляді кубів, які показані на рис. 3 та які відображають вплив факторів складу суднобудівного керамзитобетону на його міцність при стиску (рис. 3, а) і на розтяг при згині (рис. 3, б). Аналіз даних діаграм дозволяє відмітити, що загальний характер впливу факторів, що варіювалися, на міцність при стиску і на розтяг при згині досліджених керамзитобетонів є аналогічним. Міцність при стиску бетонів знаходилася у діапазоні від 32 до 43 МПа, міцність на розтяг при згині – у діапазоні від 5.6 до 7.0 МПа. Тобто всі дані легкі бетони відповідають вимогам Морського регістру по міцності та можуть бути застосовані при будівництві плавучих споруд, а також інших тонкостінних гідротехнічних споруд. При цьому середня густина досліджених бетонів (при рівноважній вологості) складала від 1700 до 1840 кг/м^3, що дозволяє казати про їх високу ефективність.

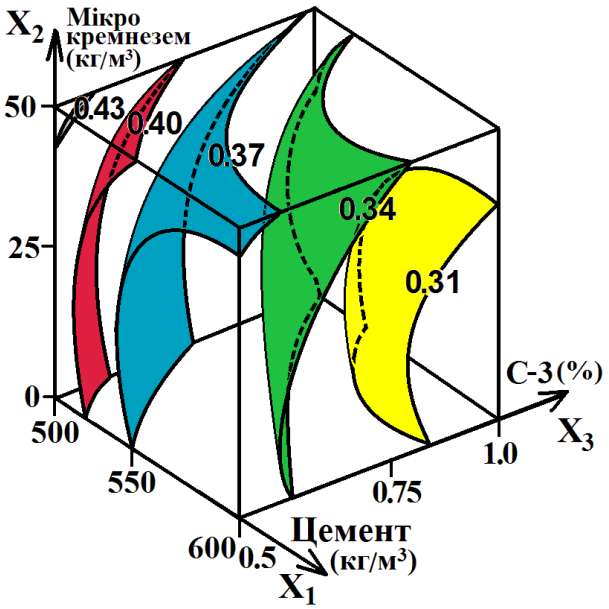

Рис. 2. Вплив факторів складу керамзитобетону на В/Ц сумішей рівної рухомості

По мірі збільшення кількості портландцементу міцність керамзитобетону зростає, при цьому це більш відчутно при зміні кількості в'яжучого з 500 до 550 кг/м^3.

Встановлено, що введення мікрокремнезему в кількості 30-35 кг/м^3 підвищує міцність при стиску керамзитобетонів в середньому на 2 МПа (5-7%), а міцність на розтяг при згині – на 0.3 МПа (6-8%). Подібний ефект є позитивним, проте доволі незначним. Специфіку саме такого впливу мікрокремнезему на механічні властивості суднобудівного керамзитобетону можна пояснити, по-перше, його впливом на В/Ц, а по-друге тим, що ця активна мінеральна добавка, як відомо, має пуцоланові властивості. Пуцолани більш ефективні для матеріалів на основі шлакових в'яжучих, а при виробництві суднобудівних бетонів застосовується чистоклінкерний сульфатостійкій портландцемент. Проте основною метою використання мікрокремнезему було підвищення довговічності бетону завдяки змінам у структурі.

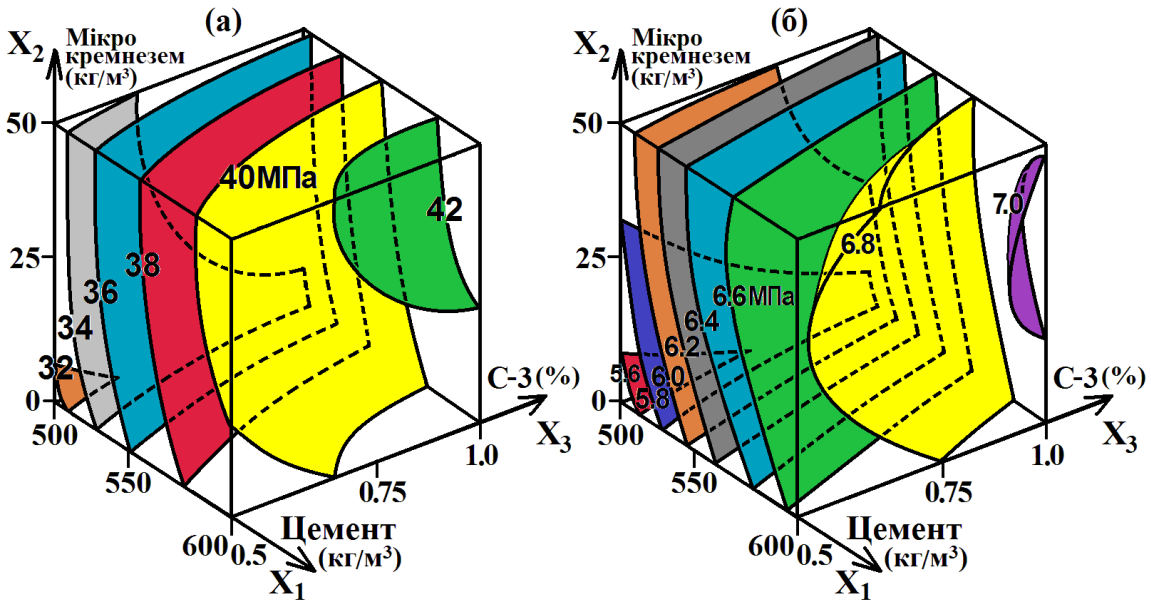

Рис. 3. Вплив факторів складу керамзитобетону на міцність суднобудівного керамзитобетону при стиску (а) і на розтяг при згині (б)

При збільшенні кількості добавки С-3 до 0.8-1% за рахунок зниження В/Ц міцність при стиску досліджених легких бетонів підвищується доволі істотно – на 2-2.5 МПа. Вплив

кількості суперпластифікатору на величину міцності на розтяг при згині є менш відчутним. Проте справедливо буде відмітити, що керамзитобетони відрізняються від важких бетонів набагато більшою міцністю на розтяг при згині за умови відносно рівних з важким бетоном величинах міцності при стиску. Зокрема завдяки цьому керамзитобетони є дуже ефективними для тонкостінних конструкцій, які експлуатуються в умовах різноспрямованих навантажень.

Висновки. Механічні властивості досліджених суднобудівних керамзитобетонів дозволяють рекомендувати подібні матеріали при будівництві тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих доків, будинків і готелів. Завдяки низькій середній густині у порівнянні з важкими бетонами такі матеріали дозволяють підвищити вантажопідйомність плавучої споруди та покращити умови перебування людей і обладнання у її приміщеннях.

Література

1. The S.S. Selma - Crystal Beach and Bolivar Peninsula [Электрон. ресурс]. – Режим доступу – http://www.crystalbeach.com/selma.htm
2. Сиверцев И.В. Железобетонное судостроение / И.В. Сиверцев – М.: Речной транспорт, 1959. – 291 с.
3. Chandra S. Lightweight aggregate concrete / Satish Chandra, Leif Berntsson. – Elsevier Science: 2008. – 450 p.
4. Evaluation of lightweight concrete performance in 55 to 80 year old ships / [R.D. Sturm, N. Mc Askill, R.G. Burg, D.R. Morgan] – AC ISP 189-7 on High-performance concrete: Research to Practice, 1999. – P. 101-120.
5. Harmon K.S. Recent research projects to investigate mechanical properties of high-performance lightweight concrete / K.S. Harmon // Theodore Bremner Symposium on High Performance Lightweight Concrete. – Thessalonika, Greece: 2003. – P. 131-150.
6. Карпенко Н.И. Конструкционные легкие бетоны для нефтедобывающих платформ в северных приливных морях и морях Дальнего Востока / Н.И. Карпенко, В.Н. Ярмаковский // Вестник инженерной школы Дальневосточного фед. Университета, 2015. – № 2 (23) – С. 85-99.
7. Helland S. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance / S. Helland, R. Aarstein, M. Maage. – Structural Concrete (J. of fib). 2010, Vol. 11, no. 1 – P. 15-24.
8. Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. State-of-the-art report – fib: 2015 – 191 p.
9. Офіційний сайт Херсонського державного заводу «Паллада»: [Електрон. ресурс] - Режим доступу: http://www.pallada-doc.com
10. Мішутін А.В. Модифіковані керамзитобетони для тонкостінних плавучих споруд / А.В. Мішутін, В.Л. Богуцький, С.О. Кровяков – Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті, 2014. – №2 – С. 104-110.
11. Мішутін А.В. Застосування модифікованих бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд / А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, В.Л. Богуцький // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. – Випуск 56. –2015. – С.68 – 74.+
12. Фесенко В.А. Микрокремнезем как активная минеральная добавка / В.А. Фесенко // Химические и минеральные добавки в бетон. Под. ред. А.Б. Ушерова-Маршака – Харьков: Колорит, 2005. – С.57-60.
13. Shetty M.S. Concrete technology. Theory and practice / M.S. Shetty. – New Delhi: S. Chand & company ltd, 2000. – 624 p.
14. Salomao R. Microsilica addition as an antihydration technique for magnesia-containing refractory castables / R. Salomao, V. Pandolfelli //American Ceramic Society Bulletin, 2007, Vol. 86, No. 6. – pp. 9301-9306.
15. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.