

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ СУДНОБУДІВНОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНУ ПІДВИЩЕНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

С.О.Кровяков, А.В.Мішутін, В.Л.Богуцький

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Відомо, що залізобетон вперше був застосований французом Жаном Луї Ламбо у 1848 році для будівництва човна. В наш час залізобетон продовжує використовуватися у суднобудуванні, переважно для стоянкових плавучих споруд: доків, причалів, готелів та будинків різного призначення. Основною перевагою залізобетонних корпусів перед металевими є їх у двічі-тричі більша довговічність, що особливо важливо з врахуванням складності постановки у док великогабаритних споруд. Досвід експлуатації показує, що залізобетонні плавучі споруди можуть працювати без капітальних ремонтів від 50 до 100 років [1].

Зараз в суднобудуванні переважно використовується важкий бетон, проте за багато років високу ефективність показав і легкий суднобудівний керамзитобетон. Першим відомим прикладом застосування керамзитобетону в суднобудуванні є споруджений у 1919 році танкера «Сельма» з товщиною корпусу близько 100 мм [1,2]. Найбільш масове будівництво суден з бетонів на легких заповнювачах припадає на період другої світової війни. Як описано у [3], обстеження корпусів чотирьох керамзитобетонних судів віку від 55 до 80 років показали високу схоронність матеріалу в агресивному морському середовищі.

Використання керамзитобетону як суднобудівного матеріалу дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучої споруди, а також значно поліпшити комфортність перебування людей і умови роботи технологічного обладнання у приміщеннях такої споруди [4]. При цьому розвиток технологій дозволяє значно збільшити довговічність і механічні властивості легких суднобудівних бетонів завдяки застосуванню нових модифікаторів і дисперсного армування.

Проводилися дослідження модифікованих суднобудівних керамзитобетонів. У 5-ти факторному експерименті, який виконувався за 27-ми точковим планом [5], варіювалися такі фактори складу: X_1 – сульфатостійкий портландцемент, від 400 до 600 кг/м³; X_2 – концентрація кремній-органічного гідрофобізатору при обробці керамзитового гравію (рідина 136-157м також відома як ГКЖ-94), від 0 до 1.6%; X_3 – кольматуюча добавка Пенетрон А (Адмікс), від 0 до 4%; X_4 – суперпласти-

фікатор С-3, від 0.5 до 0.9%; X_5 – поліпропіленова фібра Ваусон (діаметр волокон 18.7 мкм, довжина – 12 мм), від 0 до 1.2 кг/м³. Використовувався керамзитовий гравій з крупністю до 10 мм і насипною щільністю 570 кг/м³. Гідрофобізація гравію проводилася методом занурення в емульсію рідина 136-157м відповідної концентрації [6]. Всі суміші мали рухливість ОК = 2±0.5 см, що досягалося підбором кількості води. Тобто В/Ц суднобудівного керамзитобетону залежало від складу. Встановлено, що збільшення кількості портландцементу і С-3 знижує В/Ц в сумішах рівної рухливості, а застосування фібри незначно підвищує цей показник через утворення каркасу волокон. Гідрофобізація пористого заповнювача знижує В/Ц за рахунок зменшення водопоглинання гравієм [7].

Експериментально-статистична (ЕС) модель, яка описує вплив варіюваних факторів складу на міцність керамзитобетону має вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{ck.cube} \text{ (МПа)} = & 37.05 + 5.03x_1 \pm 0x_1^2 - 0.79x_1x_2 + 0.29x_1x_3 \pm 0x_1x_4 - 0.23x_1x_5 \\
 & - 3.13x_2 - 3.01x_2^2 + 0.31x_2x_3 - 0.36x_2x_4 \pm 0x_2x_5 \\
 & + 0.22x_3 \pm 0x_3^2 - 0.16x_3x_4 - 0.43x_3x_5 \\
 & + 0.78x_4 - 2.51x_4^2 + 0.40x_4x_5 \\
 & - 0.17x_5 - 0.36x_5^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

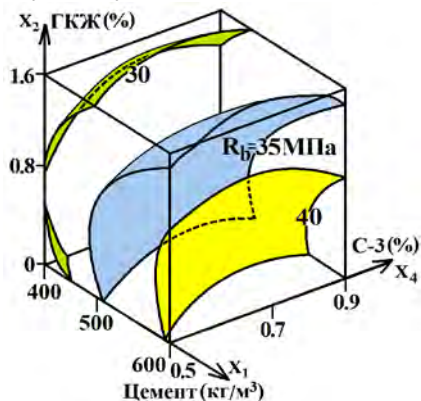


Рис.1 – Вплив кількості портландцементу, С-3 і концентрації кремній-органічного гідрофобізатору на міцність при стиску суднобудівного керамзитобетону у водонасиченому стані ($x_3=x_5=0$).

Аналіз моделі (1) показує, що введення добавки Пенетрон А і дисперсне армування несуттєво змінює міцність керамзитобетону. На рис.1 показано побудовану по (1) діаграму, яка відображає вплив кількості портландцементу, суперпластифікатора С-3 і концентрації кремній-органічного гідрофобізатору на міцність при стиску суднобудівних

керамзитобетонів. Як видно з діаграми, збільшення кількості в'язучого підвищує міцність. Найбільш міцними є керамзитобетони, до складу яких введено 0.7-0.8% добавки С-3. Гідрофобізація гравію незначно підвищує міцність композиту.

Конструкції плавучих споруд піддаються постійному напірному впливу води, тому одним з основних показників якості суднобудівного бетону є його водонепроникність [8]. Проведений аналіз показав, що при кількості портландцементу менше 500 кг/м^3 водонепроникність керамзитобетонів знаходиться в межах від W2 до W6, а такі матеріали не можна рекомендувати для конструкцій плавучих споруд. Проте з подібних бетонів можна виготовляти перегородки понтонів і внутрішніх приміщень плавучих споруд. Склади з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 при обробці пористого гравію кремній-органічним гідрофобізатором з концентрацією 0.7-0.8% показують водонепроникність не нижче W6, при кількості в'язучого 600 кг/м^3 – не нижче W8. Збільшення концентрації гідрофобізатору підвищує водонепроникність, проте негативно позначається на міцності матеріалу. Максимальні значення W досягаються при кількості добавки С-3 близько 0.8%. Також ефективним є введення кольматуючої добавки Пенетрон А – при використанні 2% даного модифікатора водонепроникність підвищується приблизно на 2 атмосфери (одну марку). Тобто модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони при кількості портландцементу $500\text{-}600 \text{ кг/м}^3$, введенні 2% добавки Пенетрон А і 0.7-0.8% добавки С-3, а також при використанні обробки пористого гравію гідрофобізатором, мають водонепроникність, що задовольняє вимоги Морського реєстру для плавучих споруд.

Аналіз морозостійкості бетону показав, що при введенні 2% Пенетрона А рівень цього показника підвищується приблизно на 50 циклів. Склади з кількістю портландцементу не менше 500 кг/м^3 мають морозостійкість F500 і більше, що дозволяє використовувати подібні матеріали в залізобетонному суднобудуванні. Найбільшу морозостійкість показують керамзитобетони з кількістю добавки С-3 0.7-0.8%. При застосуванні фібри морозостійкість керамзитобетонів зростає на 50 циклів і більше. За рахунок гідрофобізації гравію морозостійкість підвищується на 50..100 циклів. В цілому, отримані модифіковані суднобудівні керамзитобетони на обробленому гравії при кількості портландцементу від 500 кг/м^3 , застосуванні дисперсного армування і використанні 0.7-0.8% добавки С-3 мають рівень морозостійкості не нижче F550, що забезпечує їх підвищену довговічність в суворих кліматичних умовах.

Як зазначалося вище, однією з цілей застосування легких бетонів є покращення комфортності та температурного балансу усередині приміщень плавучої споруди, тому важливим показником якості матеріалу є його теплопровідність. Проведені дослідження показали [7], що кількість Пенетрону А і фібри несуттєво впливає на теплопровідність керамзитобетону. Збільшення кількості цементу підвищує теплопровідність у межах 0.02-0.03 Вт/м*К, приблизно аналогічну зміну теплопровідності викликає збільшення кількості добавки С-3 до 0.9%. Найбільш відчутне зниження теплопровідності відбувається при гідрофобній обробці гравію. При використанні емульсії з 0.8% добавки теплопровідність керамзитобетону знижується на 0.09-0.10 Вт/м*К порівняно з матеріалами на необробленому гравії. При використанні емульсії з концентрацією 1.6% зниження теплопровідності складає 0.11-0.13 Вт/м*К.

По результатами описаних вище досліджень була проведена оптимізація складів суднобудівного керамзитобетону з метою отримання матеріалу підвищеної довговічності при необхідних рівнях механічних властивостей. Розглядалися склади з кількістю портландцементу 500 кг/м³ і більше, що обумовлено вимогами діючих галузевих стандартів, а також недостатньою водонепроникністю і морозостійкістю легких бетонів з малою кількістю в'язучого. При пошуку оптимальних складів бетонів кількість добавки С-3 фіксувалася на рівні 0.8% від маси цементу ($x_4 = 0.5$), що було прийнято з врахуванням однозначних результатів досліджень щодо впливу цього пластифікатора на властивості матеріалу. Також фіксувалася кількість Пенетрону на рівні 2% від маси цементу ($x_3 = 1$), що прийнято з врахуванням значного впливу добавки на водонепроникність і морозостійкість керамзитобетону, як основних показників, що обумовлюють довговічність. Пошуку оптимальних складів проводилася графічним методом за діаграмами, які були побудовані за відповідними ЕС-моделями [5]. На суміщені діаграми були накладені ізолінії, які відображають рівні міцності при стиску, водонепроникності, морозостійкості та теплопровідності керамзитобетону. Подібні діаграми були побудовані для складів з кількістю портландцементу від 500 до 600 кг/м³. На рис.2 показано приклад вибору оптимальних складів при кількості в'язучого 600 кг/м³.

У показаному на рис.2 прикладі зона оптимальних рішень обмежена з врахуванням таких вимог: міцність у водонасиченому стані ≥ 40 МПа, морозостійкість $\geq F600$ і водонепроникність $\geq W10$. Тобто при максимальній кількості цементу можливе отримання найбільш міцних і довговічних матеріалів. В даному випадку можна рекомендувати рішення, позначене зірочкою з літерою **а**: кількість фібри 0.3 кг/м³, концентрація

гідрофобізатора 0.8-0.9%. Однак при необхідності забезпечувати морозостійкість до 650 циклів можливе рішення, позначене зірочкою з літерою **b**, для якого підвищена до приблизно 1.0 кг/м^3 кількість фібри і концентрація гідрофобізатора при обробці гравію складає 1.0-1.1%. Для обох рекомендованих складів теплопровідність не перевищує $0.60 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$. Аналогічним чином були знайдені оптимальні склади керамзитобетонів (з меншою витратою портландцементу) при необхідності забезпечення інших (нижчих) рівнів міцності, морозостійкості та водонепроникності. При цьому всі рекомендовані склади фіброкерамзитобетонів забезпечують вимоги Морського реєстру до суднобудівних матеріалів, що використовуються в залізобетонному суднобудуванні, та мають підвищену довговічність. Також важно відмітити, що при виробництві суднобудівних керамзитобетонів в промислових умовах завдяки різній якості вихідних матеріалів слід проводити поточне корегування рекомендованих складів.

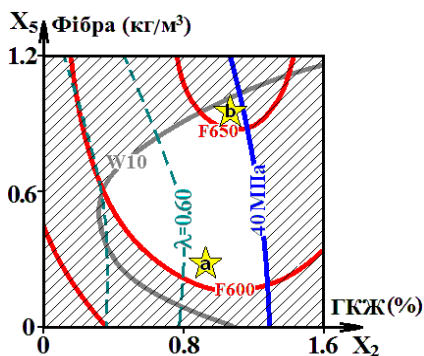


Рис.2. Приклад вибору оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів (кількість портландцементу 600 кг/м^3 , добавки С-3 – 0.8%, добавки Пенетрон А – 2%)

Висновок

Також в рамках проведених досліджень були розроблені оптимальні технологічні прийоми виготовлення і застосування суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів. Розроблено та затверджено «Регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків» для провідного підприємства залізобетонного суднобудування України – Херсонського державного заводу «Паллада».

Summary

Lightweight concretes increase the carrying capacity of the ship and improve the comfort of the crew. Optimal compositions of shipbuilding expanded clay concrete were developed. Concrete has a high durability, strength, water resistance and cold resistance. Also, the technology of shipbuilding expanded clay concrete use was developed.

Література

1. Мишутин В.А. Долговечность существующих бетонов и корпусов плавучих судоремонтных доков, эксплуатируемых в морях с различными климатическими условиями / В.А. Мишутин – Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. – 123 с.

2. An experiment in Ship Building: [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: <http://www.concreteships.org>

3. Evaluation of lightweight concrete performance in 55 to 80 year old ships / [R.D. Sturm, N. McAskill, R.G. Burg, D.R. Morgan] – AC ISP 189-7 on High-performance concrete: Research to Practice, 1999. – P. 101-120.

4. Мишутин А.В. Новые виды судостроительных бетонов / А.В. Мишутин, В.Л. Богуцкий, С.Н. Петричко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 25. – Рівне: НУВГП, 2013. – С.119-126.

5. 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.

6. А. с. № 863556. СССР, Кл. С 04 В 31 / 40. Способ обработки легкого заполнителя / А. А. Кучеренко, В. Н. Выровой, И. В. Шкрабик. — №2737967/29-33; заявл. 19.03.79; опубл. 15.09.81, Бюл. № 34.

7. Мішутін А.В. Дослідження структури і властивостей суднобудівних керамзитобетонів / А.В. Мішутін, М.В. Заволока, В.Л. Богуцький // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 57. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2015. – С. 299-304

8. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин. – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с.