

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ СКЛАДІВ СУДНОБУДІВНИХ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ

Мішутін А.В., *д.т.н., проф.*, Богуцький В.Л. *інж.*,
Петричко С.М., *к.т.н.*

Одеська державна академія будівництва та архітектури

При будівництві крупних плавучих споруд (доків, причалів, готелів та житлових будинків), ремонт яких за «класичною» технологією з постановкою у док є технічно важким, використання суднобудівного бетону набагато вигідніше в порівнянні зі сталевими конструкціями. Залізобетонні плавучі споруди можуть експлуатуватися до 100 років без капітальних ремонтів, що у двічі довше за сталеві.

Зараз в суднобудуванні переважно використовується важкий бетон з максимальною крупністю заповнювача до 10 мм. Заміна важкого бетону на суднобудівний керамзитобетон дозволяє підвищити вантажопідйомність судна, а також значно поліпшити комфортність перебування людей і умови роботи технологічного обладнання в приміщеннях плавучої споруди [1]. Легкі бетони давно і успішно використовуються в суднобудуванні [2,3]. В сучасних умовах завдяки вдосконаленню технологій, застосуванню нових модифікаторів і дисперсного армування можливо значно підвищити експлуатаційні якості легких суднобудівних бетонів [4].

Дослідження властивостей модифікованих суднобудівних керамзитобетонів проводилися з використанням методів планування експерименту. Проводився 5-ти факторний експеримент 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 ГКЖ-94м (рідина 136-157м) при обробці керамзитового гравію, від 0 до 1.6%;
- X_3 - кольматуюча добавка Пенетрон А (Адмікс), від 0 до 4%;
- X_4 - суперпластифікатор 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 крупністю до 10 мм і насипною щільністю 570 кг/м³. Гідрофобізація гравію проводилася за рахунок занурення в емульсію ГКЖ-94м відповідної концентрації [6]. Всі досліджені суміші мали рухливість ОК = 2±0.5 см.

Досліджувались механічні і фізико-механічні властивості суднобудівних керамзитобетонів. Проведений аналіз показав, що введення добавки Пенетрон А і дисперсне армування поліпропіленою фібру несуттєво змінює міцність при стиску керамзитобетону. Збільшення кількості цементу підвищує міцність, найбільш міцними є керамзитобетони, до складу яких введено 0.7-0.8% добавки С-3.

Гідрофобізація гравію підвищує міцність композиту. Для складів з кількістю цементу $400..450 \text{ кг/м}^3$ за рахунок обробки заповнювача емульсією при концентрації добавки ГКЖ-94м до 0.8% міцність підвищується на 10-12%. Для складів з кількістю цементу більше 500 кг/м^3 ефективніше застосування емульсії з концентрацією близько 0.5%. Підвищення концентрації добавки більш ніж на 0.8% позначається вже негативно у зв'язку зі зниженням зчеплення заповнювача з розчинної матрицею.

Конструкції плавучих споруд піддаються напірному впливу води, тому одним з основних показників якості суднобудівного бетону є його водонепроникність [7]. Аналіз показав, що при кількості портландцементу менше 500 кг/м^3 водонепроникність керамзитобетонів знаходиться в межах від W2 до W6, відповідно такі матеріали не можна рекомендувати використовувати для конструкцій плавучих споруд. Проте з подібних матеріалів можна виготовляти перегородки понтонів і внутрішніх приміщень плавучих споруд. Склади з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 при обробці пористого гравію гідрофобізатором ГКЖ-94м 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%. Доволі ефективне введення кольматуючої добавки Пенетрон А – при використанні 2% даного модифікатору водонепроникність підвищується приблизно на одну марку. Таким чином, модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони при кількості портландцементу $500-600 \text{ кг/м}^3$, 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.

Проведений аналіз морозостійкості бетону показав, що завдяки введенню 2% Пенетрона А рівень цього показника підвищується на величину до 50 циклів. Склади з кількістю портландцементу не менше 500 кг/м^3 показують морозостійкість F500 і більш, що дозволяє використовувати подібні матеріали в залізобетонному суднобудуванні.

Досягти рівня морозостійкості 500 циклів можна і при меншій кількості в'язучого за рахунок гідрофобізації гравію і введення оптимальної кількості добавки і фібри, проте ці склади мають низьку водонепроникність і не можуть рекомендуватися для конструкцій, що експлуатуються при напірній дії води. Найбільшу морозостійкість показують керамзитобетони з кількістю добавки С-3 0.7-0.8%. Подібні склади, як показано вище, є найкращими по міцності, відповідно рівень їх морозостійкості також вище, ніж для складів з іншою кількістю суперпластифікатору С-3.

При застосуванні дисперсного армування морозостійкість керамзитобетонів зростає на 50 циклів і більше. При цьому застосування фібри більш ефективне для складів з кількістю портландцементу 500..600 кг/м³, що пояснюється кращим зчепленням волокон фібри з матрицею матеріалу. За рахунок гідрофобізації морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Найбільш інтенсивно змінюється морозостійкість при підвищенні концентрації добавки до 0.7-0.8%. Збільшення концентрації ГКЖ-94м до 1-1.1% несуттєво підвищує морозостійкість порівняно з матеріалами при обробці емульсією концентрацією 0.7-0.8%. Подальше збільшення концентрації гідрофобізатора позначається вже негативно. В цілому, отримані модифіковані суднобудівні керамзитобетони при кількості портландцементу від 500 кг/м³, використанні 0.7-0.8% добавки С-3 і 1-1.2 кг/м³ поліпропіленової фібри і при гідрофобній обробці гравію емульсією ГКЖ-94м з концентрацією 0.6-0.7% показують рівень морозостійкості не нижче F550, що забезпечує високу довговічність матеріалу в суворих кліматичних умовах.

Для будь-якого з легких бетонів важливим показником якості є теплопровідність, яка обумовлює комфортність і температурний баланс усередині приміщень, для суднобудування – в середині залізобетонного судна. Проведений аналіз показав [8], що кількість добавки Пенетрон А і фібри несуттєво впливає на теплопровідність матеріалу. Збільшення кількості цементу підвищує теплопровідність композиту в межах 0.02-0.03 Вт/м*К. Приблизно аналогічна зміна теплопровідності керамзитобетону відбувається в результаті збільшення кількості суперпластифікатору С-3 до 0.9%. Найбільше зниження теплопровідності, що є позитивним результатом, 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 зростає несуттєво – до 0.11-0.13 Вт/м*К.

За результатами досліджень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей було проведено вибір оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів. При виборі оптимальних складів, які можуть бути використані в залізобетонному суднобудуванні, розглядалися тільки керамзитобетони з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 і більше. Це обумовлено, в першу чергу, вимогами діючих галузевих стандартів, що не рекомендують бетони з меншою кількістю в'язучого. Також, як видно з викладеного вище, склади з малою кількістю портландцементу мають недостатню водонепроникність і морозостійкість, тому можуть рекомендуватися лише для конструкцій внутрішніх приміщень плавучих споруд.

При проведенні процедури оптимізації кількість добавки С-3 фіксувалася на рівні 0.8% від маси цементу ($x_4 = 0.5$). Таке рішення було прийнято з урахуванням того, що при такій або близькій до такої кількості модифікатора спостерігалися найкращі значення для практично всіх досліджених фізико-механічних показників якості суднобудівного керамзитобетону. Відповідно, включати даний фактор в оптимізаційну задачу не обов'язково зважаючи на заздалегідь очевидне рішення щодо необхідної кількості добавки С-3. Також при проведенні оптимізації фіксувалася кількість добавки Пенетрон А на рівні 2% від маси портландцементу ($x_3 = 1$). Рішення було прийнято з урахуванням значного впливу даної добавки на водонепроникність і морозостійкість керамзитобетону.

Процедура пошуку оптимальних технологічних рішень проводилася графічним методом за діаграмами типу «квадрати», які були побудовані за відповідними адекватними ЕС-моделями. На квадрати були накладені ізолінії, які відобразать рівні основних фізико-механічних властивостей керамзитобетонів: міцності при стиску (у водонасиченому стані), водонепроникності, морозостійкості (ці три показники прийняті як критерії обмеження), а також теплопровідності. Квадрати були побудовані для складів з різною кількістю портландцементу: 500, 520, 540, 560, 580 і 600 кг/м^3 ($x_1 = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ і 1). Діаграми показані відповідно на рис.1.а–е.

При кількості портландцементу до 560 кг/м^3 (рис.1.а-г) міцність в водонасиченому стані обмежується величиною ≥ 35 МПа, морозостійкість рівнем $\geq F550$ і водонепроникність рівнем $\geq W8$. Рекомендовані рішення (точки в необхідних координатах) показані на діаграмах зірочками з відповідними номерами.

При кількості портландцементу 500 кг/м^3 (рис.1.а) зона, яка задовольняє необхідним вимогам, має незначний розмір. В даному випадку оптимальним можна вважати концентрацію ГКЖ-94м при

обробці гравію близько 1% і введення близько 0.6 кг/м³ поліпропіленової фібри (рішення №1). Проте це рішення не можна вважати гарантованим зважаючи на об'єктивне значення помилок при дослідженні матеріалу і побудові ЕС-моделей. Відповідно, якщо допустимо зниження водонепроникності до рівня W6, при витраті портландцементу 500 кг/м³ існує область рішень при гарантованій морозостійкості не менше F550 (рішення №2). В даному випадку концентрація ГКЖ-94м в емульсії близько 0.9% і кількість фібри близько 1.1 кг/м³.

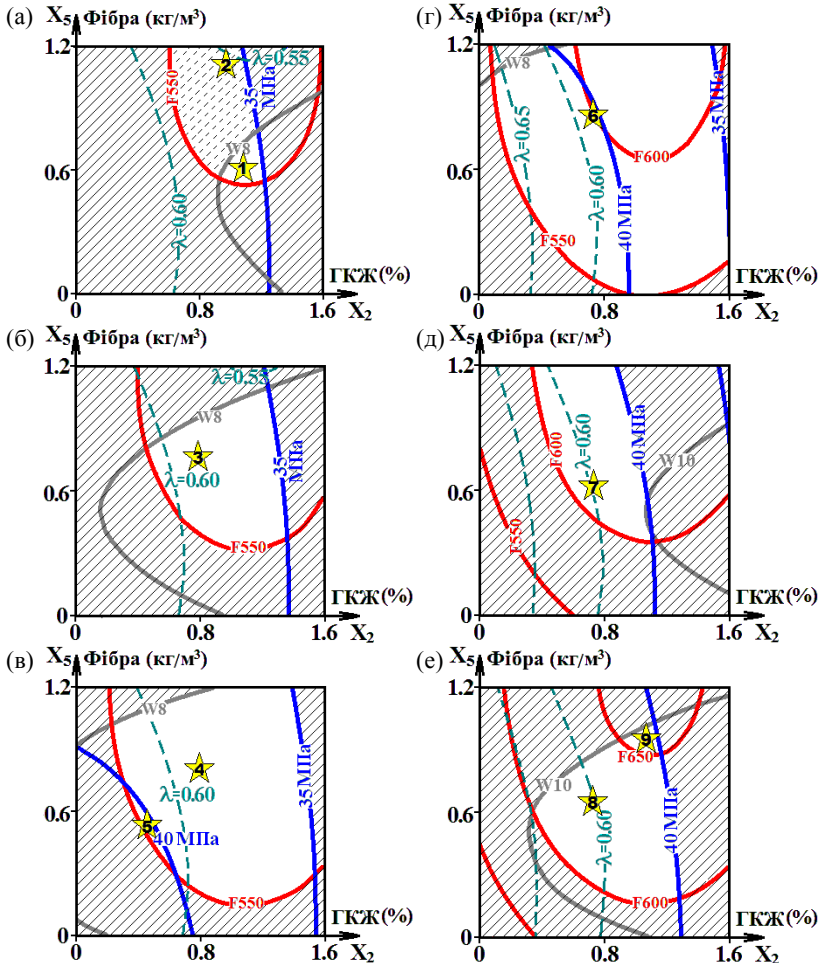


Рис.1. Вибір оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів. Кількість портландцементу: а – 500 кг/м³, б – 520 кг/м³, в – 540 кг/м³, г – 560 кг/м³, д – 580 кг/м³, е – 600 кг/м³.

При кількості портландцементу 520 кг/м³ (рис.1.б) зона, яка задовольнить критеріям обмеження, є досить великою, відповідно рекомендоване рішення №3 можна вважати економічно обґрунтованим – кількість фібри 0.8-0.9 кг/м³, концентрація гідрофобізатора 0.8%.

При кількості портландцементу 540 кг/м³ (рис.1.в) рішення №4, що задовольнить вимоги обмеження, практично аналогічно рішенню №3 (0.8-0.9 кг/м³ фібри, концентрація гідрофобізатора 0.8%). Однак за рахунок розширення зони оптимальних рішень при такій кількості в'язучого можливе отримання матеріалу з міцністю близько 40 МПа (рішення №5). Для даного рішення кількість фібри 0.5-0.6 кг/м³, концентрація гідрофобізатора 0.5-0.6%. Подібні склади можна рекомендувати для конструкцій, що вимагають застосування матеріалів підвищеної міцності без збільшення вимог по довговічності.

При кількості портландцементу 560 кг/м³ (рис.1.г) можливе рішення №6, яке дозволяє отримати матеріал з міцністю 40 МПа при морозостійкості 600 циклів. Однак надійність даного рішення досить низька через малу площу зони оптимуму. Для гарантованого досягнення рівня міцності ≥ 40 МПа, морозостійкості $\geq F600$ і водонепроникності $\geq W8$ необхідно збільшити кількість портландцементу в керамзитобетоні. На рис.1.д при кількості портландцементу 580 кг/м³ показано рішення №7, яке гарантовано задовольняє даним підвищеним вимогам по морозостійкості та міцності (кількість фібри 0.6-0.7 кг/м³, концентрація гідрофобізатора 0.7-0.8%).

При кількості портландцементу 600 кг/м³ (рис.1.е) зона оптимальних рішень обмежена з урахуванням підвищених вимог до матеріалу: 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. З урахуванням описаних вище критеріїв обмеження можна рекомендувати рішення №8 (кількість фібри 0.7-0.8 кг/м³, концентрація гідрофобізатора 0.7-0.8%). Однак при необхідності забезпечувати морозостійкість до 650 циклів можливе рішення №9, для якого підвищено до приблизно 1.0 кг/м³ кількість фібри і концентрація гідрофобізатора при обробці гравію складає 1.0-1.1%.

Таким чином, серед усіх 9-ти запропонованих оптимальних рішень з точки зору економічної обґрунтованості, тобто витрати компонентів за умови отримання матеріалу необхідного рівня якості, можна

рекомендувати 6 складів. Дані склади та рівні фізико-механічних властивостей цих керамзитобетонів приведені в таблиці 1.

Слід зазначити, що при виробництві суднобудівних фіброкерамзитобетонів в промислових умовах їх фізико-механічні характеристики можуть відрізнятися від показників рекомендованих складів зважаючи на різну якість вихідних матеріалів.

Таблиця 1

Рекомендовані склади суднобудівних фіброкерамзитобетонів

Номер рішення	Склад керамзитобетону	Рівень фізико-механічних властивостей
2	Цемент – 500 кг/м ³ , Пісок – 675 кг/м ³ , Гравій – 670 л/м ³ , С-3 – 4 кг/м ³ , Пенетрон – 10 кг/м ³ , фібра – 1.1 кг/м ³ , вода – 170 л/м ³ , концентрація ГКЖ 0.9%	$f_{ck.cube} \geq 35$ МПа F550 W6 $\lambda \approx 0.56$ (Вт/м*К)
3	Цемент – 520 кг/м ³ , Пісок – 662 кг/м ³ , Гравій – 671 л/м ³ , С-3 – 4.16 кг/м ³ , Пенетрон – 10.4 кг/м ³ , фібра – 0.9 кг/м ³ , вода – 176 л/м ³ , концентрація ГКЖ 0.8%	$f_{ck.cube} \geq 35$ МПа F550 W8 $\lambda \approx 0.58$ (Вт/м*К)
5	Цемент – 540 кг/м ³ , Пісок – 649 кг/м ³ , Гравій – 667 л/м ³ , С-3 – 4.32 кг/м ³ , Пенетрон – 10.8 кг/м ³ , фібра – 0.5 кг/м ³ , вода – 181 л/м ³ , концентрація ГКЖ 0.6%	$f_{ck.cube} \approx 40$ МПа F550 W8 $\lambda \approx 0.61$ (Вт/м*К)
7	Цемент – 580 кг/м ³ , Пісок – 623 кг/м ³ , Гравій – 659 л/м ³ , С-3 – 4.64 кг/м ³ , Пенетрон – 11.6 кг/м ³ , фібра – 0.7 кг/м ³ , вода – 193 л/м ³ , концентрація ГКЖ 0.8%	$f_{ck.cube} \geq 40$ МПа F600 W8 $\lambda \approx 0.60$ (Вт/м*К)
8	Цемент – 600 кг/м ³ , Пісок – 610 кг/м ³ , Гравій – 655 л/м ³ , С-3 – 4.8 кг/м ³ , Пенетрон – 12 кг/м ³ , фібра – 0.7 кг/м ³ , вода – 199 л/м ³ , концентрація ГКЖ 0.7%	$f_{ck.cube} \geq 40$ МПа F600 W10 $\lambda \approx 0.60$ (Вт/м*К)
9	Цемент – 600 кг/м ³ , Пісок – 610 кг/м ³ , Гравій – 655 л/м ³ , С-3 – 4.8 кг/м ³ , Пенетрон А – 12 кг/м ³ , фібра – 1.0 кг/м ³ , вода – 198 л/м ³ , концентрація	$f_{ck.cube} \approx 40$ МПа F650 W10 $\lambda \approx 0.59$ (Вт/м*К)

Висновок. В цілому, рекомендовані склади фіброкерамзитобетонів забезпечують вимоги Морського реєстру до суднобудівних матеріалів, що використовуються в залізобетонному суднобудуванні. При цьому за рахунок модифікації складу і оптимального підбору співвідношення компонентів композиту більшість рекомендованих складів забезпечують підвищену довговічність легкого суднобудівного бетону і поліпшені експлуатаційні властивості у вологих умовах експлуатації. Завдяки заміні важкого суднобудівного бетону на легкий підвищується вантажопідйомності судна, зокрема плавучого дока, збільшується комфортність перебування людей в приміщеннях плавучої споруди, а також поліпшуються умови роботи технологічного обладнання. Результати досліджень впроваджено у виробництво. Розроблено та затверджено «Регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків»

Summary

We developed optimal compositions of shipbuilding expanded clay lightweight concrete. Optimization was carried out by graphic method. Concrete has high strength (35 .. 45 MPa), water resistance (W6.. W10) and frost resistance (F500. .600). Lightweight concretes increase the carrying capacity of the ship and improve the comfort of the crew.

Литература

1. An experiment in Ship Building: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.concreteships.org>
2. Применение высокопрочного судостроительного керамзитобетона в железобетонном судостроении. Инструкция. – Л.: Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения, 1969. – 40 с.
3. 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.
4. Мишутин А.В. Новые виды судостроительных бетонов / А.В. Мишутин, В.Л. Богущкий, 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. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин. — Одесса: Эвен, 2011. — 292 с.

8. Мишутин А.В. Анализ теплопроводности судостроительных керамзитобетонов/ А.В. Мишутин, В.Л. Богущкий, Г.Г. Ткаченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 54. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2014. — С. 232-237.

