

**УДК 666.972**

## **НОВЫЕ ВИДЫ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ БЕТОНОВ**

## **НОВІ ВИДИ СУДНОБУДІВНИХ БЕТОНІВ**

## **NEW TYPES OF CONCRETE SHIPBUILDING**

**Мишутин А.В. д.т.н., проф., Богуцкий В.Л., инж. Петричко С.Н., инж.**

(Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

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

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

**Mishutin A.V. doct. of tech. sciences, prof., Bogutskiy V.L., en., Petrichko S.M., en.** (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa)

**Показаны принципы получения и перспективы применения новых видов судостроительных бетонов – модифицированных керамзитобетонов и декоративных бетонов высокой водонепроницаемости и морозостойкости. Применение подобных материалов позволит повысить конкурентоспособность железобетонного судостроения.**

**Показані принципи отримання і перспективи застосування нових видів суднобудівних бетонів - модифікованих керамзитобетонів і декоративних бетонів високої водонепроникності і морозостійкості. Застосування подібних матеріалів дозволить підвищити конкурентоспроможність залізобетонного суднобудування.**

**The prospects for the production and use of new types of shipbuilding concrete. This is a modified and expanded clay lightweight concrete decorative concrete water-resistance and frost resistance. Use of these materials will enhance the competitiveness of concrete shipbuilding.**

### **Ключові слова:**

Железобетон, керамзитобетон, пигменты, модификаторы, судостроение, водонепроницаемость, морозостойкость, долговечность

Залізобетон, керамзитобетон, пігменти, модифікатори, суднобудування, водонепроникність, морозостійкість, довговічність

Concrete, expanded clay lightweight concrete, pigments, modifiers, shipbuilding, water-resistance, frost-resistance, durability

**Введение.** Современное железобетонное судостроение является развитой и востребованной отраслью, поскольку применение судостроительного

бетона позволяет сократить стоимость строительства и значительно увеличить сроки эксплуатации по сравнению со стальными конструкциями для большого числа крупногабаритных и стояночных плавучих сооружений, таких как доки, причалы, плавучие гостиницы и пр. Для увеличения конкурентоспособности железобетонных судов необходимо создание новых видов судостроительных бетонов – таких как декоративные бетоны для возможности придания наружным конструкциям цветовой гаммы, а также керамзитобетоны для производства более теплоэффективных конструкций, большую часть времени находящихся в надводном положении.

**Состояние вопроса.** В плавучих железобетонных сооружениях в качестве материала отделки и конструкций выступает бетон. Для придания подобным сооружениям архитектурной выразительности рекомендуется применять декоративные бетоны. Для получения необходимого цвета бетона чаще всего используются железоокисные пигменты, которые являются стойкими в условиях эксплуатации плавучих сооружений, что позволяет использовать их для изготовления декоративного судостроительного бетона.

Также перспективным является применение керамзитобетона в качестве материала для железобетонного судостроения. Согласно отраслевого стандарту возможно использование бетона судостроительного легкого, для приготовления которого используется мелкий плотный заполнитель (кварцевый песок), а в качестве крупного заполнителя - керамзитовый гравий. Плотность такого бетона находится в пределах 1600-2000 кг/м<sup>3</sup>.

Одним из примеров использования керамзитобетона может служить судно “Сельма” (США), построенное в 1919 г. Толщина корпуса судна составляла всего 100 мм, и после 60 лет эксплуатации оно имело хорошую сохранность корпуса и полное отсутствие коррозии арматуры (толщина защитного слоя 16 мм), несмотря на пребывание судна в тропических водах. Есть опыт применения судостроительного керамзитобетона и в нашей стране [1]. Так, изготовленный на Херсонском государственном судостроительном заводе «Паллада» экспериментальный док из керамзитобетона марки 300 после 50 лет эксплуатации в морской воде имел прочность при сжатии 39.43 МПа и высокий показатель коррозионной стойкости.

Наиболее перспективным представляется применение керамзитобетона в плавучих доках для зоны переменного уровня воды – это борта дока от уровня ватерлинии до палубы безопасности. В данной зоне бетон подвергается увлажнению при погружении дока и высушиванию или замораживанию при всплытии дока. Также выгоден керамзитобетон в зоне надводного бетона (борта башен дока от палубы безопасности до топ-палубы), в которой бетон подвергается действию только атмосферных влияний. На современном этапе судостроительные заводы производят в основном композитные доки, и данные зоны выполняются из металла. Замена стальных конструкций на керамзитобетонные позволит повысить комфортность работы команды дока за счет лучшего микроклимата в

помещениях, увеличить долговечность и снизить стоимость дока в целом. Помимо того, перспективно применение керамзитобетонных конструкций для постройки плавучих отелей, домов, ресторанов и прочих стояночных сооружений, рассчитанных на длительное пребывание людей. Также представляет интерес возможность получения дисперсно-армированного керамзитобетона для железобетонного судостроения.

Плавучие сооружений подвергаются увлажнению и высушиванию, замораживанию и оттаиванию, давлению воды и льда, воздействию солей и живых организмов. Таким образом, они испытывают действие всех трех видов коррозии, а также морозные и динамические воздействия. Для обеспечения долговечности судостроительного бетона в сложных условиях эксплуатации необходимо создание мелкопористой структуры с преобладанием замкнутых пор [2]. Поэтому современные судостроительные бетоны изготавливаются с применением сульфатостойкого портландцемента, а также пластифицирующих и кольматирующих добавок. Аналогичные модификаторы применяются в судостроительных керамзитобетонах и декоративных бетонах.

**Цель исследования.** Целью исследования является улучшение декоративных свойств судостроительного бетона за счет применения модифицирующих добавок и специальных порошковых пигментов, а также разработка составов керамзитобетонов с повышением их водонепроницаемости и морозостойкости.

**Методика исследований.** Для достижения декоративного эффекта были использованы железистоокисные порошковые пигменты производства компании Procter Johnson (Великобритания): железистоокисный красный PJ130, оксид железа  $Fe_2O_3$  в форме гематита; железистоокисный желтый PJ920, моногидрат окиси железа (III)  $FeO(OH)$  в форме гетита; синий PJ513 на основе оксидов железа, содержит оксид железа, моногидрат окиси железа и карбоната кальция. Данные три пигмента являются красителями трех цветов, являющиеся цветами первого порядка с помощью которых может быть получен любой цвет.

Эксперимент проводился по оптимальному плану типа «треугольники на квадрате» с пятнадцатью опытными точками [3]. В качестве смесевых факторов принят вид пигмента:  $v_1$  –  $Fe_2O_3$  (PJ130, красный),  $v_2$  – синяя железистоокисная смесь (PJ513),  $v_3$  –  $FeO(OH)$  (желтый, PJ920), при условии суммы уровней факторов, равной единице.

Независимыми факторами были приняты:

- $X_4$  общее количество пигмента от 5 до 25 кг/м<sup>3</sup>;
- $X_5$  количество сульфатостойкого портландцемента от 400 до 600 кг/м<sup>3</sup>.

Во все смеси вводился комплексный модификатор Пенетрон А (2% от массы цемента) + суперпластификатор С-3 (0,8% от массы цемента).

Помимо 15-ти декоративных бетонов исследовались три контрольных состава судостроительного бетона без пигмента и с количеством сульфатостойкого портландцемента соответственно 400, 500 и 600 кг/м<sup>3</sup>.

Для исследования свойств судостроительного керамзитобетона планируется выполнение 5-ти факторного эксперимента, в котором будет исследовано влияние количества сульфатостойкого портландцемента, кольматирующей добавки, полипропиленовой фибры, наполнителя и зернового состава наполнителя.

**Результаты исследований.** Все исследованные декоративные бетонные смеси имели равную подвижность от 16 до 18 см осадки конуса, что достигалось изменением количества воды затворения. Анализ изменения водопотребности смесей показал, что В/Ц всех смесей находилось в пределах от 0.29 до 0.41. При увеличении количества цемента В/Ц, естественно снижается, а при введении пигментов несколько увеличивается. Вид пигмента также оказывал влияние на водопотребность смесей равной подвижности – смеси с пигментом  $v_2$  и, в особенности, с  $v_3$  (FeO(OH)), как наименее плотным пигментом, имеют несколько более высокую водопотребность по сравнению со смесями с Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Был построен комплекс экспериментально-статистических (ЭС) моделей, описывающих свойства исследованных композитов, в том числе модель, отображающая влияние состава декоративного бетона на его прочность при сжатии ( $s_3=0.005$ ):

$$f_{ck.cube}(\text{МПа}) = 57.05 \cdot v_1 + 6.08 \cdot v_1 \cdot v_2 + 2.48 \cdot v_1 \cdot v_3 - 1.83 \cdot v_1 \cdot x_4 + 9.87 \cdot v_1 \cdot x_5 \pm 0 \cdot x_4^2 \pm 0 \cdot x_4 \cdot x_5 \\ + 55.32 \cdot v_2 + 8.77 \cdot v_2 \cdot v_3 - 2.00 \cdot v_2 \cdot x_4 + 9.08 \cdot v_2 \cdot x_5 + 5.04 \cdot x_5^2 \\ + 54.84 \cdot v_3 - 2.62 \cdot v_3 \cdot x_4 + 8.28 \cdot v_3 \cdot x_5 \quad (1)$$

Диаграмма в виде «треугольника на квадрате», построенная по данной модели, показана на рис.1. Как видно из диаграммы, прочность при сжатии исследованных бетонов находилась в пределах от 50 до 70 МПа, при этом на величину прочности влияет преимущественно количество портландцемента. При увеличении количества порошкового пигмента прочность несущественно снижается.

Помимо непосредственно прочности судостроительных бетонов было исследовано ее изменение при введении порошковых пигментов. Данная величина была проанализирована за счет сравнения свойств декоративных бетонов со свойствами аналогичных бетонов без пигментов, т.е.  $\delta Y = Y_{\text{пигмент}} / Y_{\text{контроль}}$ . Диаграмма на рис.1.б построена по соответствующей ЭС-модели и отображает относительное изменение прочности при сжатии  $\delta f_{ck.cube}$  судостроительных бетонов при введении пигментов. Можно сделать вывод, что при введении до 15 кг пигмента прочность бетона изменяется не более чем на 5%. Повышение количества пигмента до 25 кг/м<sup>3</sup> снижает величину прочности материала на 7..8% по сравнению с бетонами без пигмента. Снижение прочности обусловлено повышением водопотребности

смеси, соответственно бетоны с  $v_3$  ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) имеют несколько меньшую прочность.

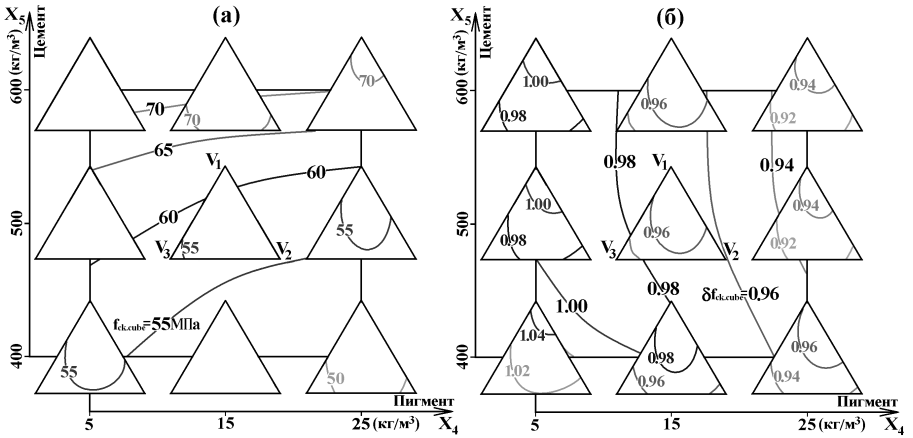


Рис.1. Влияние варьируемых факторов состава декоративных судостроительных бетонов на их прочность при сжатии (а) и относительное изменение прочности при сжатии  $\delta f_{k,cube}$  при введении пигментов (б)

Анализ влияния состава декоративных судостроительных бетонов на их прочность на растяжение при изгибе показал, что данный показатель может достигать 9 МПа и на его величину влияет преимущественно количество цемента. Введение до  $15 \text{ кг/м}^3$  пигмента не влияет на прочность на растяжение, что объясняется проявлением свойств пигментов как наполнителей.

Для судостроительных бетонов одним из наиболее важных показателей качества, обеспечивающих долговечность и коррозионную стойкость, является водонепроницаемость. Проведенные исследования показали, что все исследованные декоративные судостроительные бетоны соответствуют требованиям Морского регистра и показали достаточно высокий уровень водонепроницаемости – от W10 до W16, что обусловлено введением в их состав комплексного модификатора [Пенетрон А + С-3] (Патент № 19814. Бетонна суміш з добавками [Пенетрон А + С-3]). Анализ индивидуального влияния пигментов на водонепроницаемость позволил отметить, что наименьшие уровни W наблюдаются у составов с пигментом  $v_3$  ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Сравнение водонепроницаемости декоративных бетонов с контрольными показало, что независимо от вида пигмента при его количестве до  $15 \text{ кг/м}^3$  уровень водонепроницаемости декоративных составов не ниже водонепроницаемости контрольных составов ( $\delta W \geq 1$ ).

Одной из основных причин разрушения бетона в процессе эксплуатации является действие попеременного замораживания и оттаивания. Все исследованные составы судостроительных бетонов при количестве пигмента до  $15 \text{ кг/м}^3$  имели достаточно высокий уровень морозостойкости – не ниже

400 циклов в соленой воде. На морозостойкость в наибольшей степени влияет количество портландцемента – за счет повышения количества вяжущего с 400 до 600 кг/м<sup>3</sup> уровень F возрастает примерно на 100 циклов независимо от количества и вида пигмента. Влияние железистоокисных пигментов на морозостойкость неоднозначно – при введении пигмента в количествах от 5 до 15 кг/м<sup>3</sup> морозостойкость судостроительного бетона возрастает на величину до 50 циклов (рис.2). Повышение количества пигмента до 25 кг/м<sup>3</sup> уже снижает морозостойкость бетона. Таким образом, можно рекомендовать использование модифицированных декоративных бетонов для постройки плавучих сооружений, эксплуатируемых в жестких климатических условиях.

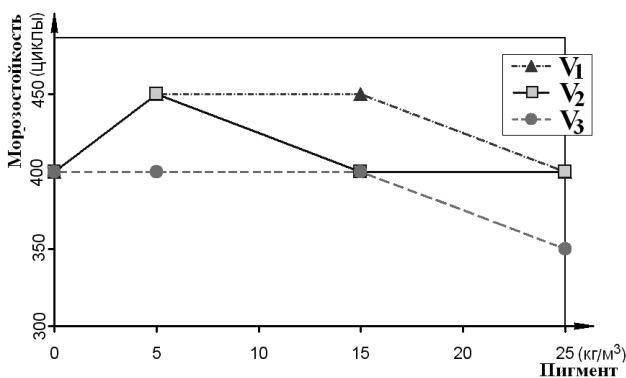


Рис.2. Изменение морозостойкости судостроительного бетона при введении пигментов (количество цемента 500 кг/м<sup>3</sup>)

Конструкции плавучих железобетонных сооружений в процессе эксплуатации подвергаются различным динамическим и истирающим воздействиям, поэтому важными показателями качества для них являются трещиностойкость и истираемость бетона. Трещиностойкость определялась с применением методик механики разрушений по уровню критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$  (МПа $\times$ м<sup>0.5</sup>). Анализ влияния состава декоративных судостроительных бетонов на их трещиностойкость показал, что при введении 12..15 кг/м<sup>3</sup> пигмента уровень  $K_{IC}$  декоративных бетонов на 7..10% выше по сравнению с трещиностойкостью составов без пигментов. Проведенный анализ истираемости декоративных бетонов показал, что при количестве пигмента до 15 кг/м<sup>3</sup> данный показатель качества не выше истираемости аналогичных судостроительных бетонов без пигментов. В целом, устойчивость исследованных декоративных судостроительных бетонов к динамическим и истирающим воздействиям можно считать достаточной для обеспечения высокой долговечности и

коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации плавучих железобетонных сооружений.

Также был проведен рентгенографический, дифференциально-термический и микроструктурный анализы декоративных бетонов. Они показали, что железистоокисные пигменты не вступают в реакции с минералами цемента и выполняют роль наполнителей. Анализ пористости цементных композитов показал, что за счет применения комплексного модификатора (Пенетрон А + С-3) получены микропористые судостроительные бетоны с высокой однородностью пор. Введение порошковых пигментов-наполнителей позволяет дополнительно уменьшить средний размер пор на 15..20% и повысить однородность размера пор. Таким образом, введение порошковых железистоокисных пигментов при общем количестве пигмента до 15..16 кг/м<sup>3</sup> положительно сказывается на общем начальном структурообразовании бетона как грубогетерогенного материала. Однако положительное влияние пигментов во многом нивелируется необходимостью повышения количества воды затворения при их введении.

Для декоративных бетонов одним из наиболее важных показателей качества является цветовая гамма. Ввиду того, что минералогический состав не позволяет использование белых цементов для приготовления судостроительных бетонов, цветовая гамма получаемых композитов на сером сульфатостойком цементе является более темной и несколько более узкой. Анализ гаммы полученных материалов позволил сделать заключение, что достаточного качества (насыщенности) декоративные бетоны достигают при количестве пигмента от 15 кг/м<sup>3</sup>, при этом наиболее эффективны составы с одним пигментом и двухкомпонентные смеси с FeO(OH), т.е. пигментом v<sub>3</sub>. При увеличении количества цемента бетон получает несколько более темный оттенок. Важно отметить, что цветовая гамма полученных декоративных судостроительных бетонов практически не изменялась при воздействиях, имитирующих многолетние воздействия на бетон при эксплуатации в морской среде – то есть после многократного замораживания и оттаивания и при постоянном напорном воздействии воды.

На основе проведенных исследований [4] разработана технология приготовления декоративных судостроительных бетонов. Разработан и утвержден на Херсонском государственном заводе железобетонного судостроения «Временный регламент по технологии приготовления модифицированных декоративных судостроительных бетонов для изготовления тонкостенных плавучих сооружений и композитных доков». Изготовлен экспериментальный понтон с применением декоративного бетона. Получен декларативный патент Украины на модифицированную декоративную бетонную смесь.

Разработка эффективного и долговечного судостроительного керамзитобетона позволит повысить качество железобетонных плавучих доков и прочих стояночных судов. Одним из примеров эффективного

использования железобетонного судостроения может являться плавучий отель «Баккара», построенный на Херсонском государственном заводе железобетонного судостроения (рис.3)



Рис. 3. Плавучий железобетонный отель «Баккара» (Киев). Построен на Херсонском государственном заводе железобетонного судостроения «Паллада».

**Выводы.** Разработаны новые виды судостроительных бетонов для тонкостенных конструкций плавучих железобетонных сооружений. Получен декоративный бетон с улучшенными цветовыми свойствами и высокими физико-механическими характеристиками за счет применения модифицирующих добавок и специальных синтетических порошковых железоокисных пигментов. Разработанные бетоны имеют прочность классов не ниже С30/35, водонепроницаемость не менее W10, морозостойкость не ниже 400 циклов в морской воде и трещиностойкость не ниже  $0.5 \text{ МПа} \times \text{м}^{0.5}$ . Показана возможность получения эффективного судостроительного керамзитобетона, обладающего высокой долговечностью.

Применение новых видов судостроительных бетонов позволит повысить конкурентоспособность железобетонного судостроения за счет повышения долговечности конструкций, улучшения их декоративных свойств и улучшения микроклимата во внутренних помещениях плавучих сооружений.

1. Мишутин В.А. Исследование судостроительных бетонов / В.А. Мишутин.- Л.: Судостроение, 1967. – 178 с. 2. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В.Мишутин, Н.В.Мишутин. – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с. 3. 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. 4. Мишутин А.В. Исследование физико-механических характеристик декоративного судостроительного бетона / А.В. Мишутин, С.Н. Петричко // Пета Международна научна конференция Архитектура, строителство – съвременност, 8-10 юни 2011 г. – Варна: ВСУ «Черноризец Храбър», 2011. – С. 549-552. 5. Петричко С.Н. Состав и свойства декоративных судостроительных бетонов/ С.Н. Петричко, А.В. Мишутин // Вісник ОДАБА. Вип. 48. Частина 2. - Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – С. 37-42.