

УДК 666.972

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ И ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Выровой В.Н., Мишутин Н.В. Романов А.А. Гапоненко Е.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Описаны перспективы применения модифицированных бетонов и фибробетонов для строительства гидротехнических, плавучих и транспортных сооружений. Показано, что для повышения долговечности данных сооружений необходимо применение материалов, адаптированных к воздействиям среды эксплуатации. Разработан метод повышения долговечности бетона за счет создания структуры с сетью закрытых мелких пор и капилляров близкого размера с пониженной общей и капиллярной пористостью.

Строительство новых и реконструкция существующих плавучих, гидротехнических и транспортных сооружений позволяет решать стратегические задачи для экономики Украины. В современном гидротехническом, водохозяйственном и транспортном строительстве все шире применяются тонкостенные железобетонные конструкции. К их очевидным преимуществам можно отнести низкую материалоемкость и простоту монтажа.

Для плавучих доков, отелей, аэропортов, причалов, сооружений для морского шельфа, а также водопропускных сооружений железобетонные конструкции имеют ряд ощутимых преимуществ перед металлическими. Они намного долговечнее, дешевле и имеют гораздо лучший уровень поглощения вибраций по сравнению со стальными [1]. В частности, расход стали на 1 т подъемной силы железобетонного дока составляет от 180 до 280 кг, в то время как для металлических доков на 1 т подъемной силы расходуется от 550 до 750 кг [2,3]. Также немаловажным является то, что в процессе эксплуатации железобетонные плавсооружения не требуют покраски.

Судостроительный бетон также имеет значительные перспективы дальнейшего развития [4]. Для крупногабаритных плавучих сооружений, докование которых не представляется возможным, железобетон является по существу единственным материалом, из которого возможно создание конструкций, удовлетворяющих требованиям длительной безремонтной эксплуатации без снижения их эксплуатационной на-

дежности. В настоящее время постройка сборно-монолитным способом морских плавучих железобетонных доков подъемной силой от 4000 до 28000 тонн, а также плавучих отелей осуществляется на Херсонском государственном заводе «Паллада» [5].

В последние годы в мировой практике железобетонные конструкции все шире применяются для постройки сооружений морского шельфа и плавучих аэропортов (рис.1) [6,7].



Рис.1. Примеры плавучих железобетонных сооружений. а - аэропорт в Японии, б - нефтедобывающая платформа, в - отель, г - причал

Тонкостенные конструкции также все шире применяются в гидротехническом и транспортном строительстве, например, стенки каналов и конструкций водопропускных сооружений изготавливаются толщи-

ной 8-12 см. Преимущественно тонкостенными являются и конструкции водоочистных сооружений.

Бетоны тонкостенных гидротехнических, плавучих и транспортных сооружений эксплуатируются в тяжелых условиях: подвергаются увлажнению и высушиванию, изменению температур от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$, давления воды и льда, воздействию солей, водорослей и живых организмов. Таким образом, они испытывают действие всех трех видов коррозии по В.М. Москвину, а также морозные, динамические и биологические воздействия.

Проведенные исследования показали, что в структуре модифицированного бетона в процессе эксплуатации происходят процессы колюматации пор и капилляров, которые можно разделить на следующие типы: колюматация продуктами коррозии [8], колюматация за счет действия специальных добавок и поздняя гидратация цемента, способствующая уплотнению структуры [9].

Обследования бетона плавучих доков, стенок каналов и конструкций водопропускных сооружений показали, что наибольшая глубина повреждений бетона наблюдается в зоне попеременного увлажнения и высушивания. На ряде объектов, где применились составы, недостаточно учитывающие условия работы, наблюдалась потеря прочности до 50% от проектной, течи, разрушение защитного слоя.

Проведен анализ механизмов формирования локальных и интегральных температурно-влажностных деформаций в материале тонкостенных конструкций, подверженных одностороннему гидростатическому давлению. Распределения влаги в бетоне подобных конструкций показано на рис.2.а. Для каждого выделенного сечения характерно индивидуальное распределение влаги по сечению изделия и ее неравномерное распределение по высоте конструкций. Во фрагменте выделена зона по линии MN, расположенной максимально близко к наружной поверхности конструкции. Эта зона в первую очередь воспринимает воздействие среды, связанное с изменением температуры и влажности. Изменение влагосодержания в материале по сечениям изделий вызывает индивидуальное развитие влажностных деформаций в каждом сечении (рис.2.б). При этом материал конструкции претерпевает деформации набухания в определенной подводной зоне (сечение V-V), которые могут переходить в деформации усадки в верхней зоне (сечение I-I). Это вызывает неравномерное распределение влажностных деформаций по высоте изделия, рис.2.в.

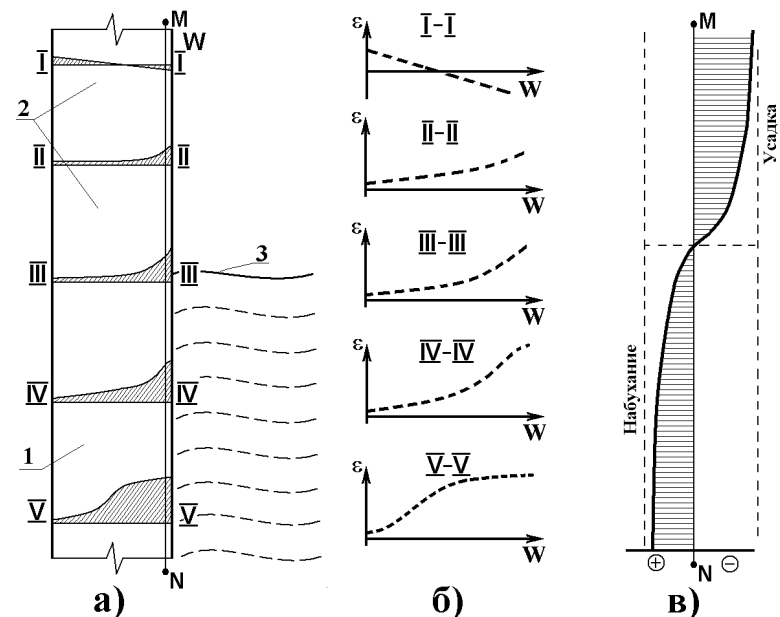


Рис.2. Принципиальная схема распределения влаги и влажностных деформаций в подверженных одностороннему гидростатическому давлению конструкциях: а – фрагмент конструкции; б – распределение влажностных деформаций по сечениям конструкции; в – распределение влажностных деформаций по высоте конструкций.

1 - фрагмент конструкции; 2- характерные сечения; 3 – переменный уровень воды; MN – наружный слой материала конструкции

Влажностные деформации переходят от деформаций набухания в подводной части к деформациям уменьшения объема материала в зонах пониженного влагосодержания. Если учесть, что уровень воды может изменяться, то это должно вызывать периодические распределения влаги по высоте и по сечению конструкции. Это приводит к изменению величины и даже направления действия влажностных деформаций. В материале конструкции возникают «волны» влажностных деформаций, которые протекают как вдоль, так и по сечениям изделия. Такие деформации отнесены к интегральным влажностным деформациям. Аналогичное распределение деформаций связано с изменением температуры материала в обводненной конструкции, включая температуры ниже 0°C .

Формирование интегральных «волн» деформаций в значительной степени определяется капиллярно пористой структурой материала.

Поэтому, для снижения градиентов деформаций (изменения параметров «волны»), необходимо проанализировать механизмы их зарождения. Наиболее опасной с точки зрения частой смены влажности и, следовательно, влажностных деформаций, можно считать зону переменного уровня воды. В качестве объекта анализа примем индивидуальный конусный капилляр. Известно, что при заполнении капилляра водой образуется мениск, радиус которого определяется радиусом капилляра и смачиваемостью его поверхности. Исследования и анализ многих авторов показали, что при этом возникает капиллярное давление P_k , которое давит на материал стенок капилляра, что вызывает общую усадку [10].

Предположим, что под действием капиллярного давления стенки капилляра раздвигаются на величину. В этом случае увеличивается объем капилляра, что ведет к снижению давления в участке незаполненном водой. Снижение давления ведет к миграции влаги с окружающего материала как капиллярно пористого тела и ее конденсации «накоплению» в устье капилляра. Кроме того, увеличение радиуса капилляра ведет к увеличению радиуса мениска, что автоматически снижает величину капиллярного давления. В это время, за счет накопления влаги в устье капилляра формирует мениск с радиусом меньше начального. В устье капилляра возникает капиллярное давление P_k^2 , которое позволяет капилляру «схлопнуться» и вызывает, с учетом проявления «эффектов Ребиндера» увеличение длины капилляра. Дальнейшее насыщение капилляра водой вызывает раскалывающее действие воды (по Ребиндеру), что вызывает увеличение объема капилляра и общее увеличение объема материала.

Похожие явления происходят при удалении воды из капилляра. Проведенный анализ показывает, что в индивидуальном капилляре возможны необратимые изменения геометрических характеристик, что может быть причиной накопления остаточных деформаций в материале.

По данным многих исследователей на основе неорганических вяжущих присутствуют капилляры различных размеров с различными радиусами [11,12]. Это предполагает взаимодействие и взаимовлияние рядом расположенных капилляров при их заполнении водой. Для анализа выделим объем материала с открытыми капиллярами, расположенными в зоне взаимовлияния. На рис.3. представлены две схемы (из многих возможных) взаимодействия капилляров различного размера и ориентирования. В случае параллельного расположения различной длины и разных радиусов капилляров (рис.3.а.) уровень жидкости в капиллярах будет различным с разными радиусами менисков. Это вы-

зовет различные по величине и месту приложения капиллярного давления (в нашем случае $P_1 \neq P_2$). Из приведенной схемы можно заключить, что несовпадение капиллярного давления для параллельных капилляров с различными радиусами по величине и точкам приложения может привести к развитию в материале деформаций сдвига. В случае взаимодействия капилляров одного размера, но различной ориентации могут возникать и развиваться в материале деформации сдвига (рис.3.б). Возникающие деформации сдвига могут быть причиной нарушения целостности материала и общего изменения его капиллярно пористой структуры.

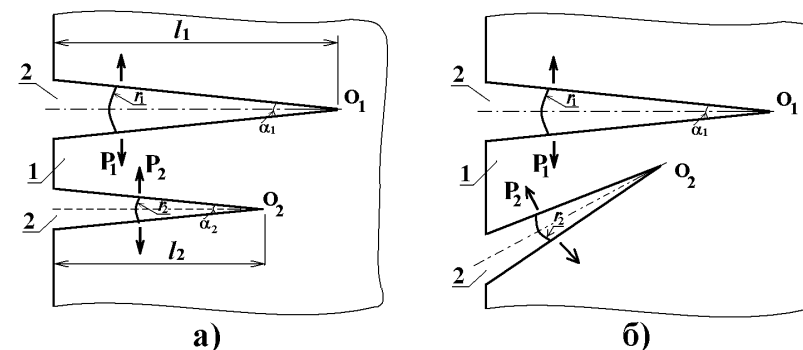


Рис.3. Принципиальная схема взаимодействия рядом расположенных капилляров при заполнении водой. а – однонаправленные капилляры; б – разнонаправленные капилляры.

1 – матричный материал; 2 – капилляры; r_1, r_2 – радиусы менисков; P_1, P_2 – капиллярное давление; l_1, l_2 – длина капилляров; α_1, α_2 – радиус устья капилляров

Таким образом, изменение структуры индивидуального капилляра и взаимодействия капилляров при значительном различии их геометрических характеристик способствуют изменению капиллярно пористой структуры материала, накоплению тем самым остаточных деформаций μ , в итоге, изменению свойств материала.

В силу того, что как показал проведенный анализ, в материале подверженном одностороннему гидростатическому давлению конструкций не существует в принципе зон с одинаковым количеством влаги, то представляет интерес вопрос к чему может привести взаимодействие отдельных объемов материала при изменении их влагосодержания. При этом следует учитывать изменение индивидуальных капилляров и их групп, вызывающих структурные изменения капиллярно-пористых

тел. Возникающие и развивающиеся влажностные (температурные) деформации относятся к локальным деформациям, развивающимся в отдельных объемах материала. Деформации проявляются на границах выделенных объемов материалов с различным водосодержанием, что способствует возникновению и развитию интегральных деформаций и напряжений. Периодическое изменение влажности в каждом объеме материала будет способствовать развитию локальных деформаций различных по величине и/или знаку (например, набухание-усадка), что может привести к нарушению целостности материала в зонах изменения влажности (температуры) и, в итоге, изменению капиллярно-пористой структуры материала.

Если принять, что интегральные деформации формируются путем интегрирования локальных деформаций, а последние зависят от изменения геометрических характеристик индивидуальных капилляров и условий их взаимодействия, то, через специальную организацию капиллярно-пористой структуры и изменение взаимодействия локальных деформаций можно изменить параметры интегральных «волн» в материале по высоте и сечению конструкции.

Таким образом, особенно нежелательны, градиенты капиллярного давления, которые возникают в микроструктуре бетона в локальных участках, в которых могут находиться капилляры с различным радиусом и ориентированием друг относительно друга. Развивающееся капиллярное давление при циклах насыщения и обезвоживания материала способствует появлению локальных деформаций и напряжений сдвига, что может быть причиной появления новых несплошностей, участвующих в дальнейших процессах влагообмена.

К мероприятиям по изменению капиллярно-пористой структуры следует отнести специальные добавки-модификаторы. Изменить условия формирования интегральных деформаций можно при помощи объемного дисперсного армирования, что позволяет более равномерно распределять локальные деформации по объему материала.

М.И. Бруссер в зависимости от величины показателя среднего размера пор различал микропористые, мелкопористые, среднепористые, крупнопористые и макропористые бетоны.

В ОГАСА разработан комплексный модификатор, включающий кольматирующую и пластифицирующую добавку, а также мелкодисперсный наполнитель, позволяющая не только уменьшить общий объем открытых пор, но и повысить однородность пор по размерам.

Получены патенты [14,15] на комплексные добавки [Пенетрон А + суперпластификатор С-3]. Данная комплексная добавка позволяет в 1.5-2 раза увеличивать водонепроницаемость бетона и на 150-200 циклов его морозостойкость. Комплексный модификатор снижает общую пористость материала на 10..12%, а капиллярную почти в 2 раза. Таким образом, действие добавки складывается не только в заполнении трещин и пор, но и в перераспределении размеров (диаметров) пор и „самозалечивании“ трещин и капилляров. При микроскопическом анализе было выявлено образование игловидных, хаотично расположенных кристаллов, прорастающих в поры и капилляры бетона (рис.4).

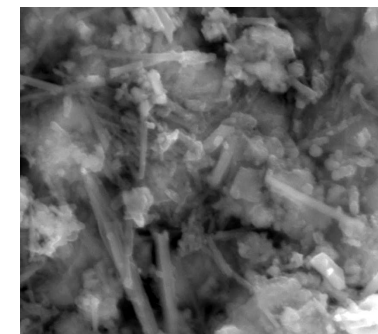


Рис.4. Фото игловидных кристаллов (увеличение $\times 3000$)

Параметры условно-замкнутой пористости модифицированного комплексной добавкой бетона оценивались на микроскопических аншлифах по линейному методу (секущей хорды). Установлено, что за счет применения комплексной добавки с наполнителем возможно получение микропористых ($\lambda \leq 0.5$) судостроительных бетонов и фибробетонов с высокой однородностью пор ($0.7 < \alpha \leq 1.0$), что показано в таблице 1.

При исследовании свойств модифицированных бетонов и фибробетонов для тонкостенных плавучих, гидротехнических и транспортных сооружений одной из основных задач являлось изучение влияния состава на водонепроницаемость (W) и морозостойкость (F) материала. Установлено, что за счет введения в состав бетона комплексной добавки [Пенетрон А + С-3 + наполнитель] совместно с дисперсным армированием его водонепроницаемость достигает значений W14-W18. Также за счет применения данной добавки повышается морозостойкость мелкозернистого бетона и достигает уровня F550-F650. Общая тенденция изменения водонепроницаемости и морозостойкости бетона за счет применения модификаторов показан на рис.5

Таблица 1.
Изменение поровой структуры модифицированных фибробетонов

Характеристика пористости	Бездобавочный бетон	С добавкой С-3	С комплексной добавкой Пенетрон + С-3	С наполнителем и комплексной добавкой	С фиброй, наполнителем и комплексной добавкой
Общая открытая пористость %	10-11	8.5-9	7-8	7-8	7.5-8.5
средний размер пор λ	2-4	0.6-1	0.4-0.6	0.4-0.5	0.4-0.5
однородности пор по размерам α	0.3-0.5	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.8-0.9

Таким образом, комплексная добавка [Пенетрон А + суперпластификатор С-3 + наполнитель], применяемая совместно с объемным дисперсным армированием полимерной фиброй, является эффективным модификатором для повышения долговечности материала тонкостенных конструкций, подверженных одностороннему гидростатическому давлению.

По результатам исследований разработаны оптимальные технологические приемы изготовления и применения модифицированных бетонов для строительства и восстановления тонкостенных гидротехнических, плавучих и транспортных сооружений. Разработаны «Регламент по технологии изготовления и применения бетонов с добавками системы Пенетрон и С-3 для изготовления и восстановления гидромелиоративных железобетонных сооружений», а также «Регламент по технологии приготовления и применения модифицированного бетона для гидротехнических сооружений мелиорации, водопропускных сооружений автодорог с применением полимерной фибры». Оба регламента утверждены Госводхозом Украины.

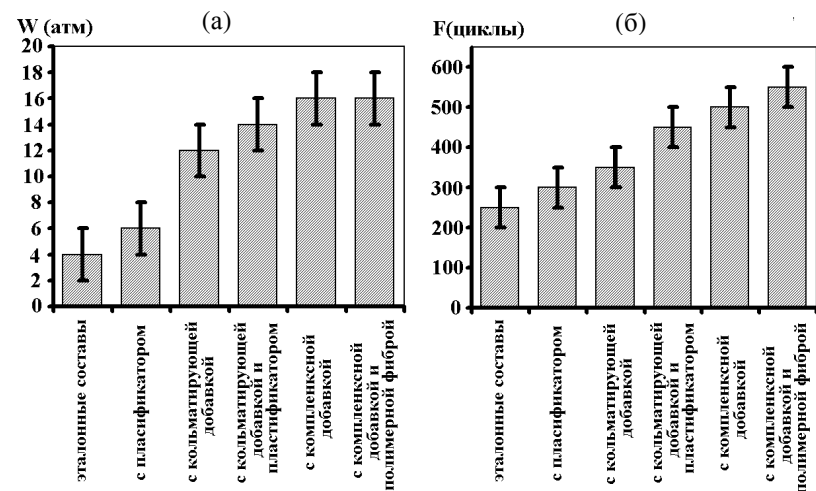


Рис.5. Общая тенденция изменения водонепроницаемости (а) и морозостойкости (б) мелкозернистого бетона за счет применения модификаторов

Разработанные Регламенты и составы модифицированных бетонов использовались при восстановлении бетона и изготовлении конструкций на следующих объектах:

- гидротехническом тоннеле диаметром 5 м канала Днепр-Донбасс на ПК 318+35 м (рис.6.а);
- доковой части ГНС главного Каховского магистрального канала;
- входном оголовке главного шлюза канала Дунай – Сасык (рис.6.б);
- очистных сооружениях Николаевского водоканала (рис.6.в и г).

Разработаны Рекомендации по технологии приготовления и применения тяжелого судостроительного бетона при постройке морских плавучих железобетонных и композитных сооружений. Данные рекомендации применялись на ХГЗ «Паллада» при постройке сданного в эксплуатацию в 2006 г. плавучего дока грузоподъемностью 8000 т. Результаты исследований были учтены при разработке ДБН «Бетонные и железобетонные конструкции».



Рис.6. Применение разработанных модифицированных бетонов и фибробетонов на объектах водно-хозяйственного назначения. а – гидротехнический тоннель канала Днепр-Донбасс, б – входной оголовок главного шлюза канала Дунай – Сасык, в,г – очистные сооружения Николаевского водоканала

Выводы

Таким образом, исследования позволили расширить основы получения модифицированных бетонов и фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками и долговечностью за счет снижения капиллярной пористости и создания системы замкнутых пор малого размера при использовании комплексного модификатора [суперпластификатор + кольматирующая добавка + наполнитель] и объемного дисперсного армирования. Показана возможность получения бетонов для подверженных одностороннему гидростатическому давлению тонкостенных конструкций с высокой технологичностью, водонепроницаемостью не менее W12, морозостойкостью не ниже 450 циклов.

Литература

1. Волков Ю.С., Сооружения из железобетона для континентального шельфа / Ю.С. Волков, И.И. Рыбалов. – М. Стройиздат, 1985. – 292 с.
2. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов тонкостенных плавучих и портовых гидротехнических сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин – Одесса: Одесский центр научно-технической и экономической информации, 2003 – 192 с.
3. Мишутин В.А. Исследование судостроительных бетонов / В.А. Мишутин. – Л: Судостроение, 1967. – 180 с.
4. Мишутин Н.В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования / Н.В. Мишутин, А.В. Мишутин // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Випуск №6. Одеса: ОДАБА, 2002. – С. 181-186.
5. <http://www.pallada.ks.ua>
6. http://news.travelcounsellors.co.uk/Japans_Spectacular_Floating_Airports_2008060317400935.html
7. <http://www.ecoboot.nl/artikelen/ThesisVLFSALexeyAndrianov.pdf>
8. Мишутин А.В., Модель процессов коррозии бетона плавучих железобетонных сооружений / А.В. Мишутин, А.С. Файвусович // Матли науково-практичного семінару «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості» – Київ: Полипром, 2008. – С. 173-181.
9. Сахибгареев Р.Р. Особенности структурообразования цементного камня на поздних стадиях твердения / Р.Р. Сахибгареев, В.В. Бабков,

А.Е. Чуйкин, Ром.Р. Сахибгареев // Строительные материалы. - №10. – 2008. – С.7-10.

10. Выровой В.Н. Механизм изменения структуры строительных композитов в условиях переменной влажности /В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Мишутин, Л.И. Резникова, Г.В. Суханов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Випуск 29 - Одеса, 2008, – С. 54-63.

11. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой – Одесса: ИМК Город мастеров, 1998. - 168 с.

12. Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко.- К.: Будивэльник, 1991.- 144 с.

13. Дорофеев В.С. Повышение долговечности бетона тонкостенных гидротехнических сооружений за счет применения комплексных модификаторов / В.С. Дорофеев, А.В. Мишутин // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Випуск 27 - Одеса: Місто майстрів, 2007, - С. 160-164.

14. Патент № 19814, Україна, Бетонна суміш з добавками Пенетрон А + С-3 / Дорофеев В.С., Мишутін А.В., Романов О.А. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2006 р.

15. Патент № 32920, Україна, Бетонна суміш з наповнювачем (меленим піском), полімерною фіброю і комплексною добавкою [Пенетрон А + С-3] / Дорофеев В.С., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Гапоненко К.О. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.