

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА ПРИ СООРУЖЕНИИ МАССИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Э. ЮНИЦКИЙ,

генеральный конструктор ЗАО «Струнные технологии», г. Минск

В. О. ПОДВОРНЫЙ

Главный специалист конструкторского бюро «Железобетонные конструкции» –

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск

Аннотация. В данной статье представлена систематизация методов регулирования температурных режимов выдержки бетона с учетом особенностей эксплуатации опор рельсо-струнного транспорта (РСТ). Проведен анализ существующих технологий и разработаны рекомендации по оптимизации состава бетона и режимов твердения для повышения его прочности и долговечности в условиях динамических нагрузок и значительных температурных градиентов. Особое внимание уделено особенностям работы бетона в массивных опорах РСТ, включая влияние климатических условий и механических воздействий. В статье рассмотрены особенности обеспечения температурно-влажностного режима выдерживания бетона на период набора прочности, подходящих при проектировании сооружений транспортно-инфраструктурных комплексов uST.

Ключевые слова: массивная железобетонная конструкция, термическая трещиностойкость, выдерживание бетона, тепловыделение, температурно-влажностный режим.

Введение

При возведении массивных монолитных железобетонных конструкций, особенно которые воспринимают значительные нагрузки (например, при строительстве опор для рельсо-струнного транспорта (РСТ), который имеет высокий потенциал использования в Индии [1]) возможно формирование собственного поля напряжений, превышающих на стадии формирования структуры бетона его прочностные показатели. Следствием этого может быть раннее трещинообразование с последующим развитием трещин, что не только негативно отразится на эксплуатационных свойствах конструкции, но в принципе может поставить вопрос о невозможности ее эксплуатации. Опоры РСТ характеризуются особыми условиями эксплуатации и специфическими видами нагрузок, что требует особого подхода к их проектированию и строительству (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схематическое представление состава транспортно-инфраструктурного комплекса uST

На основании рисунка 1 следует выделить следующие основные особенности нагрузок в рельсо-струнных транспортно-инфраструктурных комплексах [2], которые включают:

1. Динамические нагрузки от движущегося транспортного средства
 - Высокая скорость движения (до 500 км/ч и выше) создает значительные инерционные и вибрационные нагрузки на опоры.
 - Влияние ускорений и торможений, а также колебаний, вызванных неровностями пути и внешними воздействиями.
2. Растягивающие и сжимающие нагрузки
 - Основная нагрузка — растяжение струн, передающееся на опоры через закрепляющие элементы.
 - Влияние ветровых нагрузок и колебаний, вызывающих дополнительные растягивающие усилия.
3. Нагрузки от ветра и атмосферных условий
 - Ветровые давления и силы, вызванные изменением атмосферных условий, особенно актуальные в открытых и высоких районах.
 - Влажность и температурные колебания, вызывающие расширение и сжатие элементов конструкции.
4. Термические нагрузки
 - Значительные температурные градиенты, вызывающие расширение и усадку элементов опор и струн, что влияет на их геометрическую стабильность.
 - Неравномерное нагревание и охлаждение, особенно при экстремальных климатических условиях.
5. Механические воздействия от эксплуатации
 - Вибрации и удары, связанные с прохождением транспортных средств, а также возможные механические повреждения при эксплуатации или обслуживании.
6. Дополнительные нагрузки
 - В случае аварийных ситуаций или экстремальных условий — землетрясения, снеговые и ледовые нагрузки, а также воздействие коррозии и ветровых нагрузок.

Как показала практика, риск раннего трещинообразования обусловлен температурными и усадочными деформациями, особенно для бетонов высоких классов [3]. В связи с этим, появляется задача определить для РСТ перечень способов регулирования температурно-влажностного режима выдерживания бетона с целью повышения термической трещиностойкости в процессе его твердения.

Влияние факторов на термическую трещиностойкость бетона

Термическая трещиностойкость — характеристика материала, отражающая его способность сохранять целостность и прочность при циклическом нагреве и охлаждении, предотвращая образование термических трещин. По этой причине она является одним из ключевых параметров, определяющих

долговечность и эксплуатационную надежность массивных железобетонных конструкций, особенно в условиях значительных температурных перепадов и динамических нагрузок, характерных для опор рельсо-струнных транспортно-инфраструктурных комплексов.

Согласно [4] к основным параметрам, влияющим на появление трещин, следует отнести пять показателей (рисунок 2).



Рисунок 2 – Показатели, влияющие на появление трещин в бетоне

1) Размер и форма конструкций – массивные конструкции обладают большим запасом тепла и более подвержены высокому риску возникновения внутренних напряжений, т.к. температура у центра и у грани будет разная;

2) Скорость изменения температуры – резкие перепады температуры увеличивают риски возникновения трещин, имеется в виду бетонирование в зимних и жарких условиях при перепаде температуры окружающей среды и температуры в процессе твердения;

3) Химический состав бетона – состав вяжущих веществ и наполнителей влияет на образование трещин;

4) Возраст бетона – чем моложе бетон, тем больше внутренняя температура в связи с активным процессом гидратации, но со временем, он теряет тепловые резервы термическая устойчивость увеличивается;

5) Нагрузка на конструкцию – анкерные опоры транспортно-инфраструктурного комплекса uST воспринимают значительные усилия предварительного натяжения, что требует особого внимания к качеству зоны анкеровки. Наличие температурных градиентов при твердении бетона может привести к локальным трещинам и снижению сцепления закладных элементов с бетоном, что критично для несущей способности конструкции [4].

Таким образом, для предотвращения трещин в опорах РСТ необходимо комплексно учитывать все перечисленные параметры при проектировании и эксплуатации бетонных сооружений.

Методы повышения термической трещиностойкости

Для повышения уровня термической трещиностойкости обращаются к следующим методам:

- использования добавок и модификаторов (микрокремнезем, полимерные добавки, суперпластификаторы и др.);
- контроль температуры бетона при твердении (управление температурой с помощью датчиков, использование термошвов, прогрев или охлаждение бетона);
- выбор вяжущих материалов с низким тепловыделением при высоких температурах наружной среды, а также использование заполнителей с низким коэффициентом теплового расширения в целях снижения термических напряжений;
- армирование бетона – использование термостойкой стали арматуры или композитных материалов, устойчивых к тепловому расширению (фибра, базальтовое волокно);

Группы добавок, повышающие термическую трещиностойкость.

Все добавки для бетонов можно разделить на несколько групп [5]:

1. Регулирующие реологические свойства бетонных смесей, изменяющие подвижность, водоотведение и т.п.;
2. Регулирующие схватывание бетонных смесей и твердение бетона, влияющие на скорость схватывания и твердения;
3. Регулирующие пористость;
4. Придающие дополнительные свойства бетону, к примеру повышение стойкости к агрессивным средам, изменение электропроводности и т.п.
5. Минеральные добавки.

Из данных групп для корректировки температуры в процессе твердения, нас интересует группы, регулирующие схватывание и твердение бетона, и реологические свойства, а также минеральные добавки. К таким добавкам относят: добавки-ускорители, добавки-замедлители (ретардеры), противоморозные, пластифицирующие, суперпластифицирующие, водоудерживающие полимерные и минеральные добавки.

В целом комбинированное использование суперпластификаторов, ретардеров и водоудерживающих добавок позволяет скорректировать тепло- и влагопередачу в бетонной массе и снизить интенсивность внутренних напряжений.

Метод контроля и термомониторинга

Далее рассмотрим метод контроля температуры. Как было сказано ранее, одним из факторов появления трещин могут являться перепады температур, к

примеру в зимнее время необходимо избегать охлаждения бетонной поверхности в процессе твердения путем прогрева бетона или сохранения внутреннего тепла, а в условиях повышенных температур, необходимо избежать сильных термических градиентов путем мониторинга и постепенным контролируемым прогревом бетона.

В качестве примера можно выделить использование метода «термоса» при заливке фундамента стальной анкерной опоры. В зимних условиях производства работ (средняя суточная температура воздуха ниже 5°C) бетонная смесь, укладываемая в опалубку, должна иметь температуру не ниже 5°C и выдерживаться методом термоса, изображенного на рисунке 3 [6, 7].

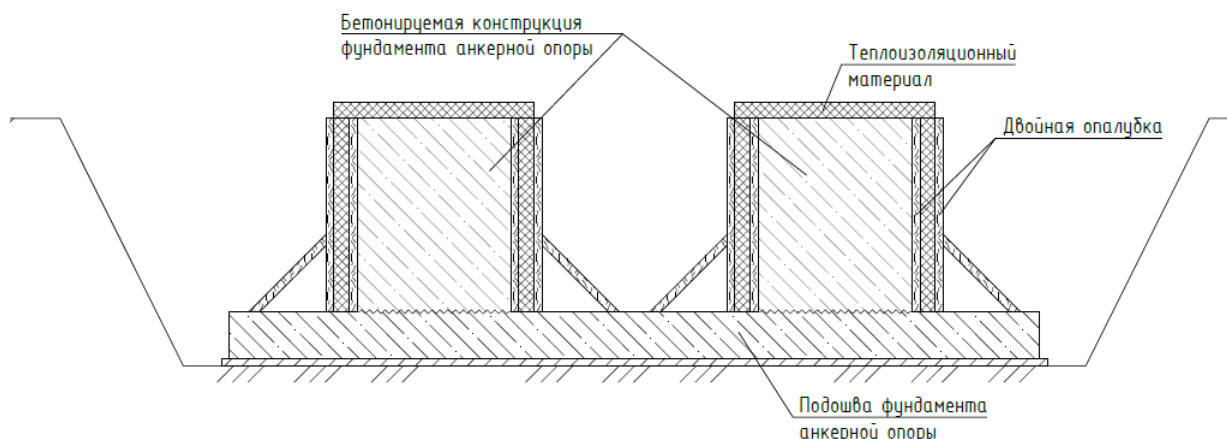


Рисунок 3 – Принципиальная схема выдерживания бетонной смеси методом термоса

Обеспечение термической трещиностойкости конструкции сводится к соблюдению принципа управления температурными параметрами бетона и конструкции, который схематично представлен на рисунке 4 [4].

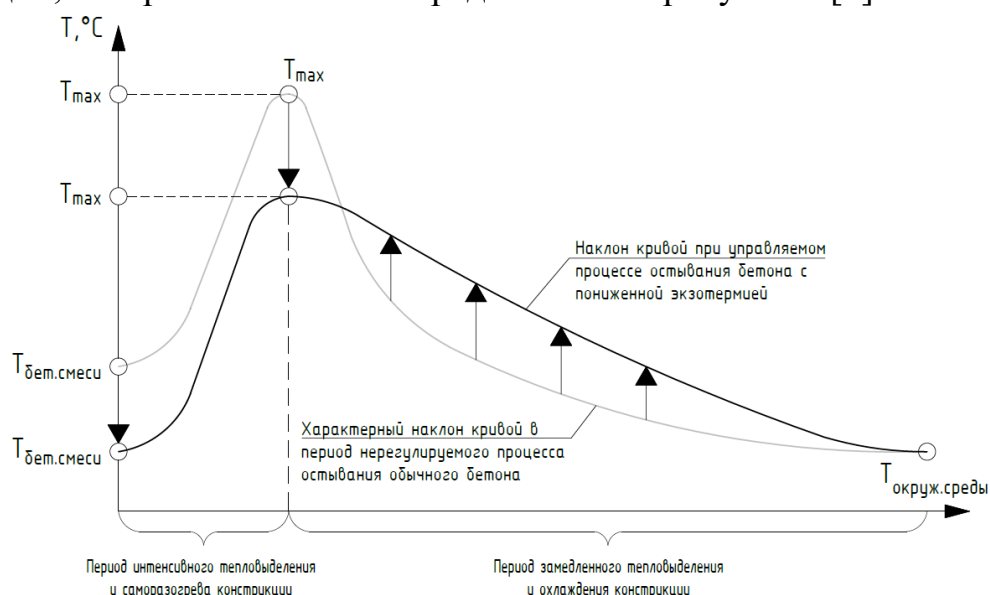


Рисунок 4 – Принципиальная схема управления температурными параметрами бетонной смеси

Метод «термоса» представляет собой один из методов выдерживания бетона в зимнее время. Суть метода заключается в сохранении внутреннего тепла, выделяемого при твердении бетона. В качестве мониторинга температуры в последнее время используют систему на базе IoT.

Система термомониторинга на базе IoT включает [8]:

- датчики температуры, устанавливаемые как на поверхности бетонной конструкции или в конструкции термоса, так и в самом бетоне (в армированных конструкциях);
- сетевые устройства, обеспечивающие бесперебойную передачу данных беспроводным способом;
- платформа мониторинга, которая обрабатывает данные и визуализирует, а также создает отчеты;
- аналитика и уведомления – в случае отклонения температуры от диапазона, система автоматически отправляет данные ответственным лицам;
- прогнозирование – на базе собранных данных могут прогнозироваться возможные риски.

Работа с системами мониторинга включает следующие этапы:

- Размещение датчиков температуры на арматурных стержнях перед бетонированием конструкции с подключением к системе мониторинга.
- Мониторинг и фиксация всего процесса затвердения бетона после бетонирования конструкции. Датчики температуры остаются в бетоне навсегда. При необходимости ими можно воспользоваться и в процессе эксплуатации конструкции. Система мониторинга регулярно снимает показания с подключенных датчиков в бетоне. Это позволяет с высокой точностью контролировать режим подогрева (или охлаждения) бетона и при необходимости корректировать его.

Применение подобных технологий при сооружении транспортно-инфраструктурных комплексов UST позволит получать максимально точные данные о процессе твердения бетонной смеси конструкций и своевременно вносить необходимые корректировки для предотвращения образования трещин.

Материалы для конструкций и их влияние на трещиностойкость.

Одним из эффективных методов снижения температуры гидратации цемента является применение вяжущих с пониженным тепловыделением, таких как шлакопортландцемент, магнезиальные и гипсовые цементы. При этом использование шлакопортландцемента приводит к замедлению кинетики твердения, что удлиняет сроки строительства. Магнезиальные и гипсовые вяжущие обладают ограниченной областью применения, преимущественно в специализированных конструкциях, например, в отделочных слоях или при устройстве полов. В сравнении с ними, обычный портландцемент и глиноземистый цемент характеризуются тепловыделением, превышающим указанные материалы в 2–2,5 раза, что значительно увеличивает вероятность возникновения термических трещин вследствие неравномерного

температурного поля. Для повышения эксплуатационной надежности бетонных смесей на основе шлакопортландцемента целесообразно дополнительно вводить ранее рассмотренные функциональные добавки [5].

Кроме замены вяжущего материала бетона с целью уменьшения вероятности появления трещин, вызванных тепловыделением при гидратации вяжущих материалов, может быть изменение материала армирования конструкции.

При выборе армирования необходимо учитывать модуль упругости материала, сцепление материала с бетоном, а также тепловое расширение. Чем выше коэффициент теплового расширения, тем соответственно ниже будет показатель температурной трещиностойкости. Чем ближе показатель теплового расширения армирования к показателю бетона, тем меньше риск образования трещин.

Подобранный материал армирования должен обеспечивать хорошую адгезию с бетоном, для эффективной передачи внутренних напряжений на армирование, так как в случае плохой адгезии, возможны расслоения и трещины на поверхности и в зоне контакта с арматурой. Материал армирования при этом должен иметь наибольший модуль упругости для сопротивления растягивающим напряжениям при тепловом расширении.

В качестве рассматриваемых материалов, используемых для армирования, можно выделить стальную арматуру, композитную арматуру (стеклопластиковую и базальтопластиковую) и фибру (металлическую, базальтовую, полимерную, стеклянную, углеродную и т.п.).

Среди рассматриваемых материалов, наилучшим для армирования материалом является сталь, так как у нее наивысший показатель модуля упругости 200-210 ГПа, в условиях агрессивных сред можно использовать композитную арматуру с модулем упругости 40 ГПа с учетом обеспечения требуемой несущей способности конструкции. Для ограничения появления микротрещин и предотвращения их развития можно использовать фибру с модулем упругости 3,5...250 ГПа. Фибра представляет собой отрезки 5...150 мм и толщиной 0,2...1,0 мм и используется как дисперсионное армирование, повышая прочность конструкции в разных направлениях (трехмерное упрочнение), но не может заменить стальную арматуру в сильно нагруженных элементах [5].

Применение вяжущих на основе шлакопортландцемента даст наиболее прочную конструкцию, но при этом увеличивается продолжительность строительства с учетом медленного набора прочности бетоном. Армирование конструкций комплексов UST лучше выполнять стальной арматурой для восприятия больших эксплуатационных нагрузок, а в целях предотвращения появления или распространения микротрещин использовать дисперсионное армирование углеродистой фиброй.

Заключение

В рамках проведённого исследования были систематизированы и проанализированы ключевые методы обеспечения температурно-влажностного режима выдерживания бетона в массивных железобетонных конструкциях опор РСТ. Особое внимание уделено влиянию динамических и термических нагрузок, характерных для данных конструкций, что позволило выделить критические факторы риска трещинообразования.

В результате работы установлено, что для повышения термической трещиностойкости бетона при сооружении РСТ необходимо комплексное применение следующих мер:

1. Оптимизация состава бетона с использованием вяжущих с пониженным тепловыделением (например, шлакопортландцемента) и функциональных добавок, способствующих контролю скорости гидратации и снижению внутренних напряжений.

2. Применение армирования с учётом соответствия коэффициентов теплового расширения бетона и арматуры, что особенно актуально для восприятия высоких растягивающих нагрузок от предварительного натяжения струн.

3. Внедрение современных методов термомониторинга на базе IoT для своевременного контроля и управления температурными режимами в процессе твердения, что позволяет минимизировать температурные градиенты и предотвратить локальное трещинообразование.

4. Использование технологического метода «термоса» при зимнем бетонировании для сохранения теплового баланса и повышения качества твердения бетона.

Применение комплексного подхода к управлению температурно-влажностным режимом выдержки позволяет существенно повысить долговечность и эксплуатационную надёжность массивных железобетонных опор РСТ, учитывая их уникальные динамические и климатические нагрузки. Полученные результаты демонстрируют эффективность интеграции современных материалов и цифровых технологий контроля в строительстве транспортных сооружений высокого технологического уровня, что способствует снижению риска ранних дефектов и увеличению срока службы конструкций.

Список литературы

1. Unitsky, A., Klimkov, A., Vlasovets, E., & Kulik, O. Improving the transport system of India (illustrated by use of passenger transportation) through implementation of transport and infrastructure solutions by Unitsky String Technologies.

2. Юницкий Анатолий Эдуардович, Хлебус Александр Степанович, & Цырлин Михаил Иосифович (2022). Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной

путевой структуры в центре usku в шардже (ОАЭ). Инновационные транспортные системы и технологии, 8 (3), 45-62.

3. Сухин, Д. П. Актуальные проблемы возведения массивных монолитных железобетонных конструкций / Д. П. Сухин // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации, Ростов-на-Дону, 10 июня 2023 года. – Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 130-136. – EDN YVFGLO.

4. Каприелов, С. С. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, И. А. Чилин // Строительные материалы. – 2022. – № 10. – С. 41-51. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51. – EDN HONRUJ.

5. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Строительное материаловедение» 7-07-0732-01-2023 «Строительство зданий и сооружений» профилизация «Производство строительных изделий и конструкций» [Электронный ресурс] / Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Строительные материалы и технология строительства» ; сост.: Н. С. Гуриненко, Т. А. Чистова. – Минск : БНТУ, 2023.

6. Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений: СН 1.03.01-2019 / М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2021. – 123 с.

7. Павлихина, В. Ю. Исследование метода зимнего бетонирования - метод термоса / В. Ю. Павлихина // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 4. – EDN WDLLSH.

8. Presa Madrigal L. et al. Cost-effective temperature sensor for monitoring the setting time of concrete //Applied Sciences. – 2024. – Т. 14. – №. 11. – С. 4344.