

КОНЦЕПЦИЯ ДОБАВЛЕННОГО СЛОЯ ИЗ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МОСТОВ

Термин «сверхвысокопрочный фибробетон» в России принят для класса материалов, обозначаемого по международной классификации как UHPC (ultra high performance concrete). В специальной технической литературе, как правило, используется более полное и точное название – UHPFRC (ultra high performance fiber reinforced concrete). Данный класс выделился в самостоятельный в 1990-х годах, когда во Франции был создан материал Ductal®. В настоящее время компания ЛафаржХолсим, оставаясь одним из мировых лидеров среди разработчиков и производителей UHPFRC, выпускает несколько модификаций Ductal®, предназначенных для различных условий применения.



И.М. Сапронов, директор ООО «Сервис-МОСТ»

Материалы данного класса отличаются высоким уровнем прочностных характеристик на сжатие и растяжение, а также высокими показателями долговечности. Это обеспечивается совместной работой высококачественной сверхплотной цементной матрицы и значительного по объему специально подобранного металлического фибрового армирования. Появление нового класса материалов UHPFRC открыло ряд особых возможностей для мостостроительной отрасли – и для эксплуатируемых сооружений, и для вновь возводимых.

Публикуемая ниже в русскоязычной версии статья швей-



Р.С. Чурилов, руководитель направления Ductal® ЛафаржХолсим Россия

царского профессора Ойгена Брювилера касается как методических, так и некоторых практических вопросов применения сверхвысокопрочного фибробетона (UHPFRC). В ней рассмотрен один из наиболее эффективных и часто реализуемых вариантов его применения для эксплуатируемых мостовых сооружений – в виде так называемого «добавленного слоя» к несущим или иным железобетонным конструкциям. Такие слои применяются для различных целей, например для усиления стоек опор, повышения сейсмостойкости сооружений. Однако, как показывает практика, наиболее эффективно возможно применение материала в настоящее время

раскрываются в технических решениях, предназначенных для железобетонных плит проезжей части. Эти решения могут быть направлены на усиление конструкций, ремонт или восстановление их целостности, создание надежного и долговечного влагонепроницаемого слоя и пр.

Направление, связанное с применением добавленного слоя из UHPFRC для плиты проезжей части, наиболее активно развивалось в Швейцарии при участии автора публикуемой ниже статьи. Затем эта концепция получила развитие и в нескольких других странах.

Основные свойства материалов класса UHPFRC приведены в статье, опубликованной в предыдущем номере журнала [1]. Для целей настоящей публикации отметим, что современные критерии отнесения материала к классу UHPFRC следующие:

- нормативное значение прочности на сжатие, как правило, не менее 150 МПа;
- нормативное значение прочности на растяжение до образования трещин – не менее 7 МПа;
- выполнение требования о достаточном уровне прочности при работе на растяжение при значительных деформациях после начала образования трещин.

Материал обладает также высокими характеристиками, способствующими долговечности: минимальной пористостью, высокой водонепроницаемостью, значительно повышенной морозостойкостью, более существенной стойкостью к хлоридам, а также к истиранию.

По материалам, имеющим фибровое армирование, в том числе сталефибробетонам, в нашей стране имеется значительный опыт исследований и применения (особенно в ПГС). Для специалистов это создает определенную базу для квалифицированного понимания возможного места UHPFRC в ряду армированных конструкций из бетона. При этом надо иметь в виду весьма существенные отличия UHPFRC от обычных сталефибробетонов.

Принципиально важным отличием является работа материалов UHPFRC на растяжение. Оно проиллюстрировано на рис. 1, где для сравнения приведены реальные уровни средних величин характерных напряжений в различных материалах, включая UHPFRC, при одноосном растяжении.

Обычный бетон не обладает сопротивлением растяжению после образования трещин. Его разрушение после трещинообразования имеет хрупкий характер. Фибробетоны, имея процент дисперсного армирования (фиброй), по объему не превышающий 1,0%, обладают возможностью восприятия некоторых растягивающих напряжений и после начала трещинообразования. В таком количестве фибра позволяет только несколько снизить хрупкость, то есть обеспечить возможность значительных деформаций под действием растягивающих напряжений без мгновенного разрушения.

Материалы класса UHPFRC имеют более высокое сопротивление растяжению (до начала трещинообразования), а также позволяют обеспечить выраженный пластический характер работы на растяжение после начала трещинообразования.

При использовании в качестве добавленного слоя, как правило, применяется UHPFRC с высоким содержанием фибры – 3,0% и более. Такой уровень фибрового армирования позволяет обеспечить наличие в диаграмме

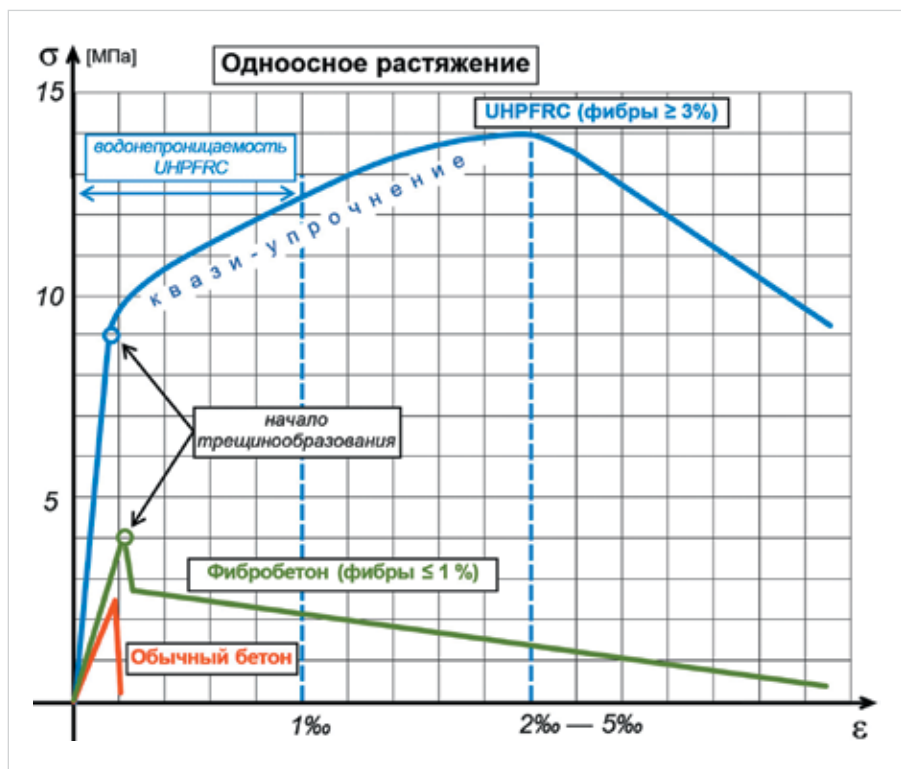


Рис. 1. Схематические зависимости напряжения - деформации для бетона без армирования, фибробетона и UHPFRC при одноосном растяжении: σ - напряжения; ε - относительные деформации

состояния существенной зоны так называемого квазиупрочнения, важной для рассматриваемого применения материала. Распределенная по всему объему стальная фибра при достаточных собственной прочности и заделке в матрицу полностью воспринимает растяжение в полости зародившейся трещины, не позволяя ей резко увеличиваться.

Таким образом, в железобетонных и обычных фибробетонных конструкциях возможность контролировать раскрытие трещин имеется только на макроуровне, поскольку трещины после образования сразу заметно раскрываются. В UHPFRC с зоной квазиупрочнения – иная ситуация: после образования трещины практически не раскрываются, то есть сдерживаются фиброй на микроуровне, и до определенного уровня относительных деформаций (до 1‰) сохраняется герметичность материала (капиллярный эффект не проявляется).

В статье профессора Брювилера наглядно демонстрируется концеп-

ция добавленного слоя UHPFRC, который восстанавливает поврежденные верхние слои железобетонных конструкций пролетных строений, имеет прочное сцепление с этими конструкциями и способен заменить выравнивающий слой, гидроизоляцию и защитный слой. Отмечается также, что слой UHPFRC может обеспечивать заметное увеличение прочностных характеристик усиленного им конструктивного элемента.

Известно, что для применения в добавленном слое составы UHPFRC имеют определенную специфику. Как отмечено выше, они ориентированы на высокое содержание металлической фибры. Наличие описанной выше зоны квазиупрочнения позволяет воспринимать как напряжения от внешних нагрузок, так и напряжения от стесненной усадки, без образования трещин нежелательного раскрытия. Реология смесей может варьироваться от самоуплотняющихся высокоподвижных до тиксотропных (для применения на наклонных поверхностях).



Рис. 2. Тиксотропный состав Ductal® в состоянии смеси в процессе работ в московской лаборатории ЛафаржХолсим

Применение сверхвысокопрочного фибробетона в добавленном слое для плит проезжей части (причем не только железобетонных) компания ЛафаржХолсим рассматривает как одно из приоритетных для материала Ductal® в России.

Потенциально это решение перспективно для российских условий, на что указывает анализ технического состояния эксплуатируемых мостовых автомобильных и городских сооружений. Иметь подобный инструмент для эффективного и технологичного ремонтного воздействия представляется весьма полезным. Это способно значительно расширить инструментарий при выборе рациональной стратегии про-

ведения ремонтных/восстановительных мероприятий.

Особое значение данная технология имеет для мостовых сооружений, эксплуатируемых в городских условиях. Как показывает зарубежный опыт, сроки перекрытия движения по сооружениям при использовании данной технологии могут быть кардинально сокращены, а межремонтные периоды – увеличены.

С 2019 года ЛафаржХолсим проводит комплексную НИОКР с целью разработки необходимого научно-исследовательского и нормативного обоснования применения Ductal® для несущих конструкций в России. Основной исполнитель работ – научно-

исследовательская организация «Сервис-МОСТ», специализирующаяся в области исследований и разработок по армированным конструкциям из бетона. К выполнению работ привлекаются ведущие российские научно-исследовательские, проектные и строительные организации. Направление, связанное с обеспечением эффективного применения добавленного слоя, является важной частью этой работы.

В настоящее время по этому направлению выполняется отработка ряда вопросов по самому материалу (рис. 2, 3), включая вопросы по изготовлению смеси в производственных условиях, методические вопросы испытаний стандартных образцов, проработку вопро-

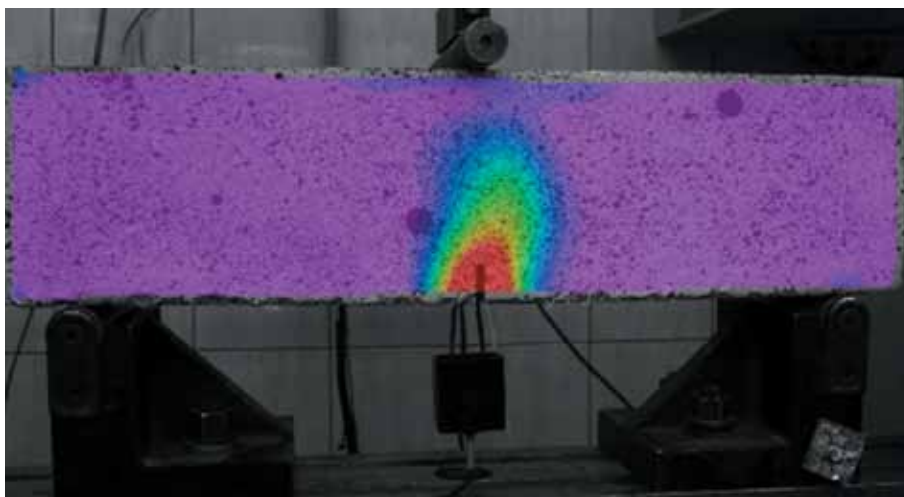


Рис. 3. Испытания стандартных образцов из тиксотропного состава Ductal® (содержание фибры более 3%) в российской специализированной лаборатории

сов по испытаниям этих образцов. В дальнейшем будут проведены испытания образцов конструкций с добавленным слоем. Нормативную базу предполагается начать формировать посредством разработки СТО (с учетом специфики материалов для применения в добавленном слое) и разработки СТУ для условий конкретных объектов.

Несомненно, следует учитывать значительный зарубежный опыт. В 2000-х годах были проведены большие исследовательские работы по обоснованию данного технического решения. Решение прошло апробацию и реализовано на многих объектах. В результате разработаны соответствующие нормативные документы на проектирование, например швейцарский стандарт SIA 2052:2016.

В то же время российские условия имеют свою специфику. Это, прежде всего, касается традиционных массовых конструктивных и технологических решений пролетных строений мостов, климатических факторов и прочего. Кроме того, имеется определенный опыт применения в плитах проезжей части ординарных фибробетонов. Оценки этого опыта весьма неоднозначны. Несмотря на то, что UHPFRC – материал с иными свойствами, его применение в плитах проезжей части, возможно, будет сопряже-

но с преодолением некоторых сложившихся в результате предшествующей практики представлений и даже предубеждений.

В связи с этим должны быть в достаточном объеме проведены собственные (российские) обосновывающие исследования. Также необходимо проведение адаптации регламентов, технических решений и нормативных документов. В частности, для российских условий применения должны быть подтверждены вопросы, касающиеся совместности работы добавленного слоя с основными несущими конструкциями (в том числе под действием статических, динамических и циклических нагрузок, долговременных процессов, замораживания и оттаивания).

Отдельные положения статьи профессора Брювилера и само техническое решение для российских специалистов могут выглядеть полемично. Однако статья и не претендует на предоставление исчерпывающей информации по теме. В ней не рассматриваются все аспекты применения добавленного слоя из UHPFRC и не приводятся подробные обоснования тех или иных технических решений. Прежде всего, она информирует о достигнутом уровне использования добавленного слоя в мостовых сооружениях.

Более подробная информация о рассматриваемом применении материала содержится в многочисленных публикациях, например [2–10]. Для специалистов, заинтересованных в более подробном ознакомлении с темой, компания ЛафаржХолсим готовит специальный семинар, в котором примет участие профессор Брювилер. Информация о семинаре будет дополнительно представлена на сайте компании www.lafargeholcim.ru.

Авторы настоящего предисловия выражают благодарность сотруднику ООО «Сервис-МОСТ» А.В. Агееву за участие в техническом редактировании перевода статьи профессора О. Брювилера.



LafargeHolcim

**По любым вопросам можно
обращаться к руководителю
направления Ductal®
ЛафаржХолсим Россия
Чурилову Роману
тел. +7 985 101 69 84
roman.churilov@lafargeholcim.com**

**тел. 8 800 500-12-03
www.lafargeholcim.ru**

Список литературы:

1. Сапронов И.М., Чурилов Р.С., Бернарди С. О применении сверхвысокопрочного фибробетона DUCTAL® в российском мостостроении // Дорожная держава, 2020, № 94. – с.78–85.
2. K. Habel, E. Denarié, E. Brühwiler. Structural Response of Elements Combining Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes and Reinforced Concrete – 2006. – 8 p. [Электронный ресурс]: URL: <https://ascelibrary.org/>
3. K. Habel, J.-P. Charron, E. Denarié, E. Brühwiler. Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results // Magazine of Concrete Research. – April, 2006. – p. 135–145.
4. K. Habel, J.-P. Charron, E. Denarié, E. Brühwiler. Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part II: numerical Modelling // Magazine of Concrete Research. – April, 2006. – p. 147–156.
5. J.-P. Charron, E. Denarié, E. Brühwiler. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation // Cement and Concrete Research. – 2008. – № 38. – p. 689–698.
6. T. Makita, E. Brühwiler. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) // Materials and Structures. – 2014. – № 47. – p. 475–491.
7. K. Habel, E. Denarié, E. Brühwiler. Time dependent behavior of elements combining ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete // Materials and Structures. – 2006. – № 39 – p. 557–569.
8. S. Bernardi, D. Jacomo, F. Boudry. Overlay Ductal®: a durable solution for bridges retrofitting // First International Interactive Symposium on UHPC, DOI: 10.21838/uhpc.2016.119. – January, 2016. – 9 p. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.researchgate.net/publication/305997097>.
9. H. Wibowo, S. Sritharan. Use of Ultra-High-Performance Concrete for Bridge Deck Overlays. Bridge Engineering Center Institute for Transportation Iowa State University. – 2018. – 76 p. [Электронный ресурс]: URL: <http://publications.iowa.gov/27040/>
10. N. Dean, C. Stevens, J. Hastings, Delaware Department of Transportation Bridge. Design Accelerated Bridge Construction Methods for Bridge 1–438 Replacement. – 2018. – 10 p. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.extension.iastate.edu/>, <https://abc-utc.fiu.edu/mc-events/abc-methods-for-delawares-all-precast-bridge-1-438/>

УЛУЧШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА КОНЦЕПЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Существующие мосты из железобетона необходимо модернизировать таким образом, чтобы они отвечали перспективным требованиям, в особенности в условиях увеличивающейся транспортной нагрузки. Рассматриваемые в статье решения касаются повышения несущей способности конструкций и их долговечности. Современные разработки, такие как технология сверхвысокопрочного фибробетона (принятое международное обозначение - UHPFRC, ultra high performance fiber reinforced concrete), должны шире внедряться в практику для улучшения эксплуатационных характеристик существующих мостовых сооружений. Обладая исключительными физико-механическими характеристиками и прочностными свойствами, сверхвысокопрочный фибробетон, дополняемый при необходимости стержневой арматурой, служит эффективным фактором, повышающим прочность и выносливость железобетонных конструкций мостов. Сверхвысокопрочный фибробетон является водонепроницаемым материалом, поэтому он позволяет увеличить срок службы конструкций мостов. Технология UHPFRC применяется в Швейцарии уже более 15 лет. Ниже описаны основные концепции улучшения железобетонных мостов с использованием этой технологии, выделены также три основных способа применения из практики последних лет.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Терминология

UHPFRC (сверхвысокопрочный фибробетон) – дисперсно армированный композитный материал, изготовленный из цементного вяжущего, мелкого наполнителя и различных добавок тонкого помола, а также большого количества коротких и тонких стальных волокон (фибры). UHPFRC обладает водонепроницаемостью благодаря высокой плотности взаиморасположения частиц, слагающих цементную матрицу.

UHPFRC может дополняться стальной стержневой (или предварительно напряженной) арматурой с целью улучшения характеристик конструкций и экономии материалов.

UHPFRC не должен рассматриваться и применяться как бетон, но с улучшенными свойствами. UHPFRC и обычный бетон – два

разных материала (рис. 1г). Проектирование и строительство с использованием UHPFRC существенно отличается от обычных конструкций из железобетона.

1.2. Формулирование проблемы

Железобетонные конструкции в автодорожных мостах нередко проявляют недостаточные показатели в области несущей способности и долговечности в условиях интенсивного воздействия окружающей среды (например, хлоридов от противогололедной соли или морской воды, силовых воздействий от обращающейся нагрузки).

Работы, проводимые по улучшению свойств изношенных конструкций, во многом зависят от социально-экономических факторов, так как они ведут к существенным затратам на проведение работ и эксплуатационным расходам. Железобетонные конструкции



Ойген Брювилер, профессор, Федеральная политехническая школа Лозанны (EPFL), консультант по строительству мостов, Швейцария

дешевле в строительстве, однако их эксплуатация может обходиться дороже в связи с необходимостью более частых ремонтов.

Традиционная «реконструкция» с использованием цементобетона и ремонтных составов может оказаться недостаточно эффективной. Должны быть разработаны новые концепции по улучшению эксплуатационных качеств железобетонных мостов.

Несмотря на то, что это достаточно хорошо известно, инженеры-мостовики продолжают находиться в тисках законодательного регулирования и в рамках сложившихся, но устаревающих методов работы. Они считают недостаточную износостойчивость и долговечность железобетонных конструкций «нормой» и занимаются лишь подсчетом

затрат в течение срока службы, хотя имеется возможность существенно улучшить положение.

1.3 Цель статьи

В данной статье описываются современные апробированные методы восстановления и усиления конструкций существующих мостов из железобетона с использованием УНПФРС по технологии, которая сегодня широко применяется в практике строительства в Швейцарии. Приведены основные инженерно-строительные концепции, а реализация этих концепций показана на трех примерах из недавней практики.

2. КОНЦЕПЦИЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНПФРС

2.1. УНПФРС как слой для усиления

Концепция улучшения характеристик железобетонных мостов состоит в целенаправленном добавлении к элементу из железобетона достаточно тонкого слоя УНПФРС, обладающего свойством квазиупрочнения, устраиваемого обычно поверх плиты проезжей части моста. Такой «добавленный слой» повышает несущую способность образовавшегося объединенного конструктивного элемента. Кроме того, поскольку слой УНПФРС в определенном диапазоне деформаций не имеет трещин и является водонепроницаемым в режиме нормальной эксплуатации, долговечность железобетонных мостов будет восстановлена и даже увеличена, а межремонтный период продлен.

Три основных концепции показаны на рис. 1. Все они связаны с созданием объединенного конструктивного элемента из слоя УНПФРС и железобетона. Во всех случаях материал должен эксплуатироваться в стадии квазиупрочнения при растяжении (см. раздел 2.2), чтобы соответствовать требованиям, предъявляемым к мостовым конструкциям.

На рис. 1а показан случай, в котором слой УНПФРС (толщина 25–40 мм) выполняет в основном

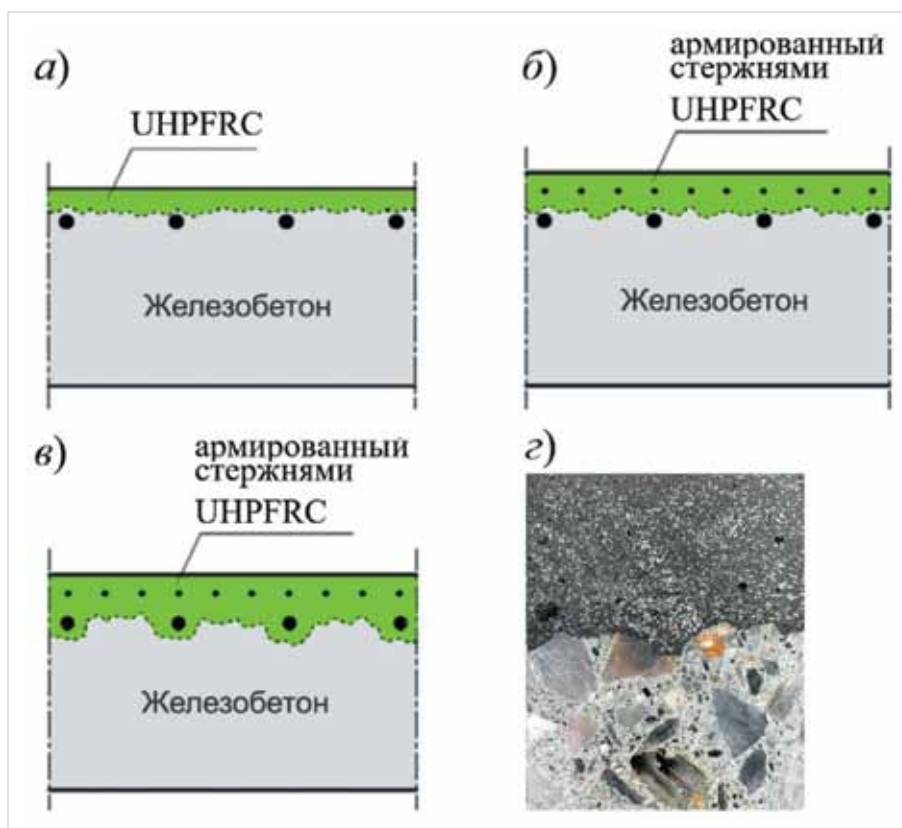


Рис. 1. а-в) Три основных концепции слоя усиления из УНПФРС поверх железобетонной плиты; г) керн-образец по контакту УНПФРС (сверху) и бетона наглядно демонстрирует разницу между двумя материалами

защитную функцию для железобетона, а также несколько повышает жесткость усиленного элемента. При этом слой УНПФРС может быть подвержен растяжению под действием изгибающего момента (в неразрезных конструкциях). Более толстые слои из УНПФРС (толщина 40–100 мм) заметно повышают как прочность конструкции, так и ее жесткость, несмотря на то, что напряжения в арматурных стержнях исходного (усиливаемого) железобетона в предельном состоянии снижаются. Компоновка, показанная на рис. 1б, применяется в случаях, когда арматурные стержни железобетона не подвержены коррозии. Поврежденные же коррозией арматурные стержни в исходном железобетоне могут быть вновь включены в работу при помощи УНПФРС – методом, показанным на рис. 1в.

Адгезия между слоем УНПФРС и бетоном достигается благодаря подготовке поверхности бетонного основания с помощью водоструйной или пескоструйной обработки. Бетонное основание

должно быть увлажнено и оставаться влажным при укладке слоя УНПФРС. Такая подготовка поверхности обеспечивает полную адгезию между УНПФРС и бетонным основанием (рис. 1г). Испытания методом вырыва показывают, что разрушение никогда не происходит по зоне контакта (тем более не в слое УНПФРС). Оно всегда происходит по бетону конструкции. Таким образом, комбинированное сечение УНПФРС и железобетона рассматривается как единое целое.

2.2. Необходимые свойства УНПФРС

Поведение (работа) материала УНПФРС на растяжение с квазиупрочнением имеет важнейшее значение для задач по усилению конструкций. Поведение неармированного стержнями УНПФРС при одноосном растяжении должно соответствовать характеру и значениям, представленным на рис. 2. Необходимо, чтобы при относительных деформациях 2‰, когда прочность (напряжения) при осевом растяжении достигает диапазона значений от 8 до 14 МПа, проявлялось существенное квази-

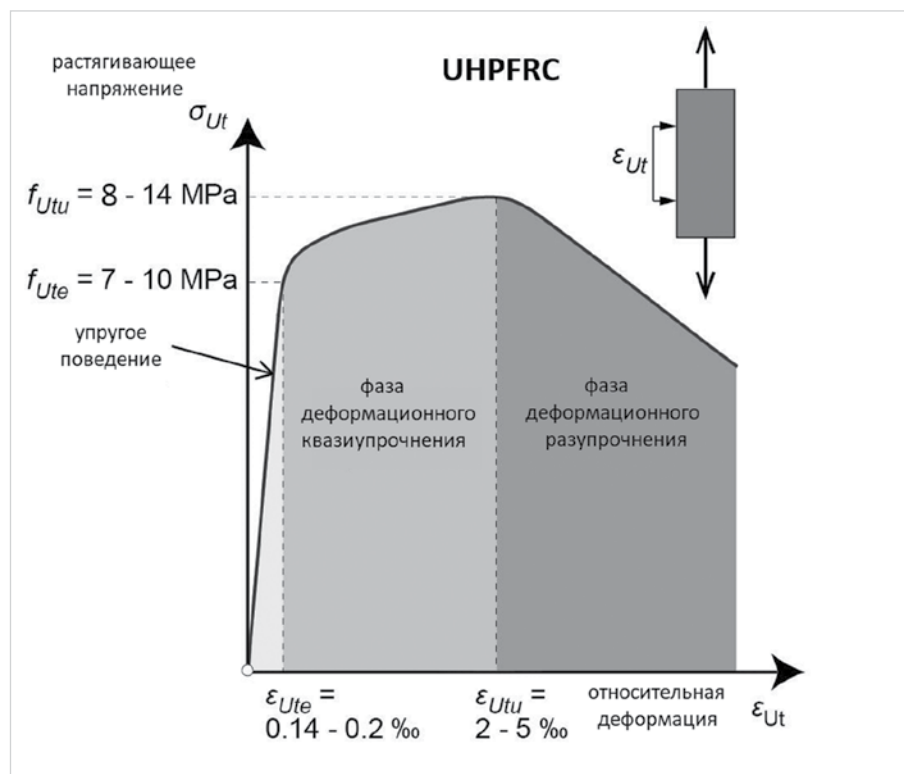


Рис. 2. Характер поведения UHPFRC без дополнительного армирования при осевом растяжении с зоной квазиупрочнения

упрочнение. Это может быть достигнуто при содержании фибры в количестве более 3% по объему и отношении длины к толщине прямолинейной стальной фибры не менее 65.

Основным доводом в пользу применения UHPFRC со стержнями стальной арматуры является значительное дополнительное упрочнение при работе на растяжение и уменьшение «разброса» свойств UHPFRC. Стержни стальной арматуры малого диаметра, расположенные с относительно небольшим шагом, обеспечивают целостность слоя UHPFRC и его совместную работу с железобетоном в изгибаемых элементах конструкций. Арматурные стержни не только заметно увеличивают несущую способность, но и способствуют проявлению эффекта квазиупрочнения UHPFRC. Механические свойства армированного стержнями UHPFRC при растяжении описываются линейной суперпозицией (наложением упругих свойств материалов) арматурной стали и самого UHPFRC.

В рамках приведенных концепций усиления обычно является до-

статочным применение UHPFRC не самой высокой прочности при сжатии – 130 МПа. Модуль упругости UHPFRC составляет от 45 до 50 ГПа, что несколько выше, чем у бетона. В объединенных элементах из армированного стержнями UHPFRC и железобетона это благоприятно влияет на величину напряжений, вызываемых температурными и усадочными деформациями.

UHPFRC обладает исключительно низкой воздухо- и водопроницаемостью благодаря чрезвычайно плотной матрице. Даже при существенном растяжении (в стадии квазиупрочнения) материал способен оставаться непроницаемым для влаги, что повышает его долговечность в режиме эксплуатации.

2.3. Несущая способность балок из железобетона, усиленных UHPFRC с арматурными стержнями

Автор вместе со своей группой исследователей уже около 20 лет ведет работы по конструктивным решениям для комбинированных элементов из UHPFRC и железобетона. Основные результаты данного исследования состоят в следующем.

Поведение при действии отрицательного изгибающего момента (добавленный слой в растянутой зоне конструкции): При растяжении слой армированного стержнями UHPFRC в основном выступает в качестве дополнительного высокопрочного верхнего пояса железобетонных элементов. Для усиленных слоев UHPFRC железобетонных балок характерно значительное увеличение жесткости и несущей способности по сравнению с исходными железобетонными элементами. Способность таких усиленных железобетонных балок сохранять несущую способность даже после образования пластического шарнира обеспечивается соответствующей конструкцией армирования в слое UHPFRC. Предельный изгибающий момент рассчитывается с помощью традиционной расчетной схемы для нормального сечения, дополненной учетом в ней слоя UHPFRC.

Поведение при действии положительного изгибающего момента (добавленный слой в сжатой зоне конструкции): Когда слой UHPFRC подвержен сжимающим напряжениям, он выступает в составе сжатого пояса, однако высокая прочность на сжатие, которой обладает материал, обычно не может быть полностью реализована в связи с тем, что прочность на сжатие прилегающего снизу бетона зачастую в 3–6 раз меньше, и, следовательно, этот бетон окажется разрушен до того, как в UHPFRC напряжения достигнут максимальной прочности на сжатие.

Поведение при одновременном действии изгибающего момента и поперечной силы: По результатам испытаний комбинированных балок из армированного стержнями слоя UHPFRC и железобетона установлено, что добавленный слой замедляет образование и развитие критических наклонных трещин сдвига в бетонной части. Для большинства геометрических форм поперечного сечения слой UHPFRC изменяет характер потери несущей способности при действии поперечной силы с достаточно хрупкого на пла-

стическое разрушение, больше характерное для изгибаемых конструкций. Разрушения по схеме сдвига наблюдаются в объединенных сечениях лишь при определенных геометрических конфигурациях и сочетаниях свойств материалов. Предельная несущая способность по поперечной силе складывается из таких компонентов, как прочность бетона стенки конструкции, предел текучести вертикальной стальной арматуры – хомутов (при их наличии), к которым добавляется особого вида сопротивление слоя UHPFRC [1]. В соответствии с этой схемой предельного состояния были получены аналитические зависимости для расчета несущей способности на поперечную силу.

Работа на выносливость: Испытания на изгиб и усталостное разрушение комбинированных балок из армированного стержнями слоя UHPFRC и железобетона показали наличие предела выносливости на отметке 10 млн циклов при уровне усталостного напряжения примерно в 50% от предельного сопротивления при статическом нагружении. Следовательно, расчеты на выносливость для элементов из UHPFRC и железобетона при действии многократно-повторного нагружения на изгиб должны учитывать значения усталостной прочности и стальных стержней, и UHPFRC. Усталостные напряжения рассчитываются с использованием расчетных схем сечений при упругой работе с учетом распределения растягивающих напряжений в слое UHPFRC.

3. ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

3.1. Обзор

Впервые технология улучшения прочностных и эксплуатационных характеристик существующих железобетонных мостов с помощью добавленного слоя UHPFRC была применена в Швейцарии в октябре 2004 года. С тех пор более 70 автомобильных и железнодорожных мостов разных систем, с пролетами от малых до больших, служат при-

мерами эффективности данной технологии. Среди этих мостовых сооружений есть традиционные железобетонные конструкции, например массивные плиты, коробчатые балки, балочно-ребристые с большим числом балок в поперечном сечении. Масштабные работы по ремонту и усилению в 2014–2015 годах Шильонского (Chillon) виадука привлекли международное внимание профессионального сообщества.

Во всех случаях применения UHPFRC в Швейцарии с целью повышения несущей способности и долговечности мостов осознанно использовалась способность UHPFRC к квазиупрочнению при растяжении. Из-за сравнительно высоких затрат на рабочую силу и оборудование стоимость материалов UHPFRC только в исключительных случаях превышает 30% от общей стоимости строительства. Очевидно, что стоимость материала с высоким содержанием фибры в значительной степени уравнивается превосходными техническими характеристиками.

В последние годы технология усиления мостов с использованием UHPFRC все чаще находит применение в Японии, Китае, Австрии, Германии и США.

3.2. Швейцарский нормативный документ на UHPFRC

К 2013 году количество объектов с использованием UHPFRC в Швейцарии значительно выросло, что обусловило необходимость создания соответствующего постоянно действующего нормативного документа. Рабочая группа разработала стандарт UHPFRC SIA 2052 (SIA 2052 2016) [1], который был опубликован в 2016 году.

В SIA 2052 рассмотрены две основные концепции: (1) усиление существующих бетонных конструкций добавлением слоя UHPFRC и (2) возведение новых конструкций только из UHPFRC. Нормативный документ ориентирован прежде всего на UHPFRC с квазиупрочнением при растяжении, в связи с чем все UHPFRC классифицируются в зависимости от свойств при растяжении.

Определены свойства UHPFRC (включая методы испытаний образцов), сформулированы основные положения норм для проектирования, регламентированы требования по общему конструированию и разработке узлов. Имеются требования по контролю качества.

3.3. Концепция усиления конструкций неразрезных балочных пролетных строений

Во второй половине XX века в Европе увеличились нагрузки на ось и максимальный вес транспортных средств. Это часто вызывало очевидную потребность в повышении несущей способности (грузоподъемности) существующих мостов.

Два моста, представленных в разделах 3.4 и 3.5, потребовали такого усиления. Их несущая способность была увеличена в соответствии со следующей концепцией. Учитывая, что пролетные строения обоих мостов представляют собой многопролетные неразрезные балочные системы, несущая способность по восприятию отрицательного изгибающего момента в надпорных зонах существенно увеличена путем добавления слоя UHPFRC, армированного стержнями, по плите проезжей части (рис. 1б, 1в).

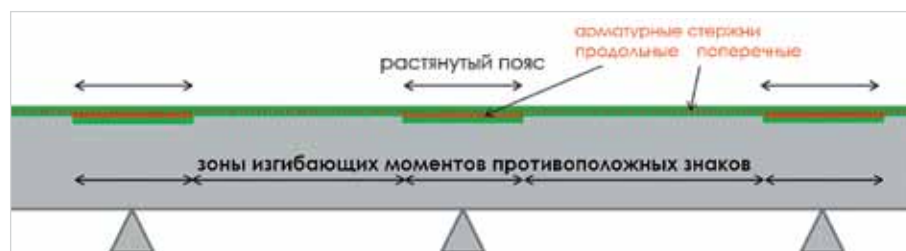


Рис. 3. Концепция увеличения несущей способности на действие отрицательного изгибающего момента



Рис. 4. Общий вид моста 1 с ремонтной обстройкой во время проведения работ в 2019 году

Необходимое общее повышение несущей способности пролетных строений достигается путем создания возможности перераспределения момента при развитии пластических деформаций из середины пролета (зона положительных моментов) в надопорные зоны (где действуют в основном отрицательные моменты) при наступлении предельного состояния первой группы (рис. 3). Однако подобное перераспределение моментов возможно только в том случае, если соответствующие зоны конструкции обеспечивают достаточную податливость (пластичность). Данный подход является возможным для большинства пролетных строений железобетонных мостов.

Кроме того, относительно толстый усиливающий пояс (слой) из UHPFRC простирается за пределы зоны действия отрицательного изгибающего момента в обе стороны надопорного участка – таким образом, чтобы он также несколько повышал несущую способность приопорных зон неразрезной балки и на действие поперечной силы.

Обоснованные экспериментальными исследованиями, простые аналитические формулы, приведенные в SIA 2052 2016, позволяют оценить правильность предстоящих ремонтных мероприятий на этапе эскизного проектирования. Затем для проверки концепции усиления используется обычное коммерческое инженерное программное обеспечение по нелинейному расчету конструкций на основе МКЭ.

3.4. Пример 1: мост с П-образными балками, имеющими систему последующего предварительного натяжения (на бетон)

Мотивация и цели: Мост длиной 330 м через реку Рейн был построен в 1974 году для двустороннего автомобильного движения в восточной части Швейцарии (рис. 4). Конструкция моста включает железобетонные пролетные строения небольшой высоты П-образного сечения с двумя ребрами (балками) с постнатяжением арматуры. Основные пролеты этой неразрезной балочной системы составляют 42 м в русловой части и 30 м в береговой.

Концепция проведения ремонтных работ: Для увеличения несущей способности по надопорному изгибающему моменту был исполь-

зован пояс усиления из UHPFRC толщиной 90 мм, в который было включено значительное количество арматурных стержней. Этот усиливающий пояс устроен на участках в длину более 6 м с каждой стороны от опоры, способствуя увеличению несущей способности приопорных зон балки на действие отрицательного момента и поперечной силы.

Полученный прирост несущей способности по отрицательному моменту в надопорных зонах оказался достаточен для достижения необходимого общего уровня несущей способности всего пролетного строения в целом. Однако необходимо было усилить и сжатую зону плиты на коротком участке над опорой. Это было также необходимо для обеспечения требуемого уровня податливости и пластических деформаций неразрезной балки.

Остальные участки плиты проезжей части в зоне положительных изгибающих моментов усилены слоем UHPFRC толщиной 45 мм с поперечными арматурными стержнями.

Кроме усиления, слой UHPFRC на плите проезжей части способствует большей водонепроницаемости и тем самым защите железобетона.



Рис. 5. Укладка бетона UHPFRC 10 сентября 2019 года

Производство работ: Для укладки слоя UHPFRC мост был выведен из эксплуатации на несколько недель с конца августа до начала октября 2019 года. Предварительно были проведены испытания материала UHPFRC для определения пригодности на соответствие требованиям и оптимизации процедур механизированного бетонирования добавленного слоя UHPFRC. Слой UHPFRC был уложен на плиту проезжей части в четыре однодневных этапа работ на поверхности мостового полотна площадью 800 кв. м при помощи машины-бетоноукладчика (рис. 5).

3.5. Пример 2: трансформация плитного железобетонного пролетного строения моста в интегрированную с устоями бесшовную конструкцию

Данный мост является частью двухполосной дороги к популярной туристической деревне в горном районе Швейцарии. Мост длиной 78 м расположен на кривой в плане и имеет продольный уклон 10%. Конструкция моста представляет собой плиту из железобетона толщиной 0,6 м и протяженностью в пять пролетов длиной около 16 м каждый. Мост был построен в 1969 году. Карнизы, деформационные швы и опорные части на обоих устоях подверглись сильным коррозионным повреждениям в результате интенсивных воздействий окружающей среды, включая применение противогололедных солей. Кроме того, несущая способность (грузоподъемность) стала недостаточной для удовлетворения требований перспективного дорожного движения.

Целью ремонтных работ с использованием UHPFRC было восстановление и гидроизоляция всей плиты и карнизов путем устройства слоя покрытия из UHPFRC толщиной 50 мм на всех открытых поверхностях. Слой UHPFRC включает в себя продольные стержни стальной арматуры в надпорных зонах для увеличения прочности плиты, аналогично концепции, описанной в разделе 3.3.



Рис. 6. Мост 2 после ремонтных работ

Для того чтобы избавиться от деформационных швов, на обоих устоях были установлены новые переходные железобетонные плиты, по которым затем был уложен слой UHPFRC (в продолжение плиты проезжей части). Таким образом, исходная система была преобразована в конструкцию, полуинтегрированную с переходными плитами устоев.

Слой UHPFRC требовалось укладывать на уклонах до 13%, что стало возможно благодаря тиксотропным свойствам смеси, получаемым с помощью специальных добавок. Испытания UHPFRC

на соответствие требованиям были проведены для достижения необходимых тиксотропных свойств и удобоукладываемости смеси в зависимости от температуры окружающей среды. Были проведены также предварительные испытания для оптимизации ручного бетонирования с использованием простых инструментов.

Работы проводились в условиях движения по одной полосе. Первая половина работ завершена осенью 2017 года, второй этап работ на соседней полосе проведен весной 2018 года.



Рис. 7. Первая половина работ завершена в ноябре 2017 года. Слой UHPFRC на плите, карнизах и переходных плитах



Рис. 8. Мост 3 длиной 450 м во время ремонтных работ с устройством добавленного слоя UHPFRC: карниз уже покрыт слоем UHPFRC



Рис. 9. Укладка UHPFRC вручную воскресным днем, летом 2016 года

3.6. Пример 3: ускоренные ремонтные работы на мосту из коробчатых балок

В отдельных случаях дорожное движение и другие местные условия требуют ускоренного темпа проведения работ, особенно в плотно застроенных районах.

Поскольку мост расположен между двумя промышленными районами, по нему осуществля-

ется интенсивное дорожное движение. Мост был построен в 1968 году, пролетное строение из коробчатых железобетонных балок общей длиной 450 м. Конструкция разделена деформационными швами на шесть участков (рис. 8). Несущая способность (грузоподъемность) сооружения была признана недостаточной для предполагаемого в будущем дорожного движения.

Многие открытые части конструкции и семь деформационных швов оказались, как обычно бывает, поврежденными из-за климатических и силовых воздействий. Также предусматривалось улучшение системы водоотвода.

С целью восстановления и увеличения срока службы пролетных строений моста на плиту проезжей части был уложен слой особо прочного UHPFRC толщиной 25 мм. Карнизы были также восстановлены с использованием слоя UHPFRC.

Техническое решение было принято в связи с необходимостью выполнения работ в короткие сроки (которые давали возможность существенно уменьшить ограничения движения по мосту). Поскольку дорожное движение на мосту значительно сокращается в выходные дни, владелец моста разрешил полностью закрывать его на 36 часов – с 17:00 субботы до 05:00 понедельника – с целью завершать в эти сроки работы каждого этапа.

Подготовка поверхности основания под добавляемый слой с помощью гидравлической очистки бетона напорной струей воды занимала шесть часов. Затем выполнялась укладка слоя UHPFRC, которая продолжалась четыре часа (рис. 9). Предварительно проведенные испытания UHPFRC на соответствие требованиям показали, что для достижения прочности на сжатие в 70 МПа, которая требуется для запуска дорожного движения по «молодому» UHPFRC, необходимо 20 часов набора прочности при определенной температуре (рис. 10). Процесс ухода за UHPFRC путем распыления воды осуществлялся в течение 5 дней. В принципе существует возможность еще более ускорить процесс набора прочности при помощи специальных химических добавок.

Работы выполнены летом 2016 года. Подрядчик разделил работы на восемь этапов, проводившихся в выходные дни. В целом работы

были проведены без осложнений и заметного влияния на дорожное движение даже в часы пик. Такая методика выполнения ремонтных работ оказалась весьма экономичной. Подобные ускоренные работы невозможно было бы провести с использованием традиционных методов ремонта.

3.7. Замечание по стоимости работ

В целом, несмотря на то, что бетон по сравнению с UHPFRC является дешевым материалом, общая стоимость работ по усилению существующих конструкций с помощью UHPFRC оказывается значительно дешевле. Это и есть основная причина того, почему в Швейцарии на практике проведено уже довольно много ремонтов с применением UHPFRC.

Очевидно, что сравнивать стоимость только самого бетона и UHPFRC было бы ошибочным, так как во многих странах расходы на работы и технику значительно превышают стоимость материалов. Определяющее значение имеет стоимость всего ремонта, а стоимость материалов – лишь небольшая его часть.

4. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ UHPFRC В ШВЕЙЦАРИИ

С 2004 года автор принимает участие в ряде проектов с целью эффективного применения UHPFRC в практике строительства. Можно выделить некоторые условия эффективного применения UHPFRC, основанные на этом опыте.

Издержки на строительство в сравнении с традиционными методами являются основным доводом в пользу применения UHPFRC. Повышенная техническая эффективность и увеличенный срок службы конструкций – это дополнительное преимущество, не включенное в стоимость ремонта объекта.



Рис. 10. Дорожная ситуация в выходные дни на «молодом» UHPFRC (слой светлого серого цвета) во время проведения работ по карнизам. Асфальтобетонное покрытие соседнего участка ремонта уже снято (темная поверхность)

Также важны следующие условия:

- достаточно высокий уровень образования инженеров и квалификации рабочих; это обеспечивает необходимые профессионализм и уверенность в воплощении в жизнь новых технологических разработок;

- швейцарский стандарт SIA 2052 предоставляет собой нормативную базу, которая в сжатой и простой для понимания форме описывает суть процесса проектирования, оставляя достаточно свободы для дальнейших разработок;

- использование технологии UHPFRC приносит профессиональное удовлетворение специалистам, осознающим ее прогрессивность, дополнительно мотивируя их для применения этого материала.

5. ВЫВОДЫ

Улучшение прочностных и эксплуатационных характеристик существующих железобетонных мостов по технологии UHPFRC доказало, что оно является эффективным способом с точки зрения технических характеристик и экономических показателей.

Традиционная «реконструкция» существующих железобетонных мостов с использованием обычного армированного бетона и ремонтных растворов устаревает и должна постепенно отойти на второй план. В настоящее время технология UHPFRC значительно

усовершенствована, апробирована и может применяться для восстановления, ремонта и усиления поврежденных и изношенных железобетонных мостов различных типов.

На данный момент технология UHPFRC представляет собой подтвержденную возможность устранять слабые места все еще преобладающих железобетонных конструкций. Опыт, полученный после многих лет использования технологии UHPFRC, позволяет уже в наши дни уверенно применять UHPFRC в условиях строительных площадок.

Потенциал UHPFRC должен использоваться и для строительства новых мостов. Гибридные сочетания материалов UHPFRC со сталью или деревом в несущих конструкциях открывают новые интересные возможности.



LafargeHolcim

По любым вопросам можно обращаться к руководителю направления Ductal®
ЛафаржХолсим Россия
Чурилову Роману
тел. +7 985 101 69 84
roman.churilov@lafargeholcim.com
www.lafargeholcim.ru

Список литературы:

1. Technical Leaflet SIA 2052 UHPFRC – Materials, design and construction, March 2016. (in German and French; for English translation: eugen.bruehwiler@epfl.ch).
2. Brühwiler, E., UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges, Structure and Infrastructure Engineering, 16:1, 2020, 94–105.