

О ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА DUCTAL® В РОССИЙСКОМ МОСТОСТРОЕНИИ

Материал Ductal® был создан во Франции в начале 1990-х годов. К этому времени в ряде стран, в том числе и в России, уже имелся довольно обширный опыт по разработкам и применению фибробетонов. Ductal® же является в определенном смысле одной из наиболее эффективных на сегодняшний день реализаций фибробетонов. С его появлением образовался новый класс материалов – УНПРС (Ultra high performance concrete), или, более точно, УНПФРС (Ultra high performance fiber reinforced concrete). В российской терминологии для данного класса принят термин «сверхвысокопрочный фибробетон».

Отличительной особенностью материала, помимо его высокой прочности на сжатие, являются высокие прочностные показатели на растяжение (в том числе после начала трещинообразования). Это стало возможным благодаря созданию разработчиками высококачественной бетон-матрицы, позволяющей рационально интегрировать в нее и задействовать в совместной работе большое количество фибры.

За прошедшие годы составы и технология Ductal® совершенствовались и неоднократно модернизировались. Современные критерии отнесения материала к классу УНПФРС следующие [4]:

- нормативное значение прочности на сжатие – как правило, не менее 150 МПа;
- нормативное значение прочности на растяжение до образования трещин – не менее 6 МПа;
- соблюдение достаточных параметров уровня прочности и способности к деформированию при работе на растяжение после образования трещин – так называемой дуктильности.

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



Рис. 2. Самоуплотняющийся и тиксотропный составы Ductal® в состоянии смеси в процессе работ в московской лаборатории ЛафаржХолсим

Кроме того, следует отметить ряд других особых свойств Ductal®. Известно, что из-за очень низкой пористости при воздействии высоких температур материал может разрушаться взрывным образом. Эта проблема решается добавлением к стальной фибре полипропиленовой в количестве 2–3 кг/м³. Сочетание различных фибр позволяет получить материал с более высокими огнестойкими (и даже огнезащитными) качествами. В сравнении с обычным железобетоном Ductal® обладает также повышенной ударостойкостью и сопротивляемостью взрывным воздействиям.

Различие в соотношениях компонентов состава Ductal® и бетона проиллюстрировано на рис. 1. Размеры частиц в составах Ductal® значительно меньше, чем в бетоне. В современных составах номинально они не превышают 0,63 мм.

Количество стальной фибры, являющееся фактором, во многом определяющим стоимостные показатели материала, в современных модификациях Ductal®

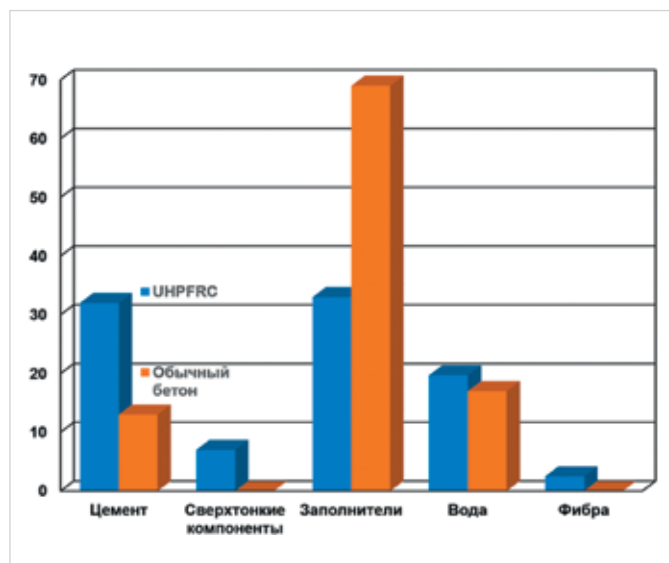


Рис. 1. Объемное содержание компонентов в обычном бетоне и УНПФРС в процентах



может варьироваться в широких пределах в зависимости от целевого уровня прочностных характеристик материала.

Приготовление смеси включает последовательное введение в миксер трех групп компонентов: сухой смеси, воды и химической добавки, фибры. Параметры всех этапов приготовления смеси строго регламентированы.

Свойства материала в состоянии смеси могут регулироваться в соответствии с условиями применения. Как правило, смеси UHPFRC/Ductal® являются самоуплотняющимися, высокоподвижными, даже «текучими», но существуют и тиксотропные (рис. 2), а также составы с иными характеристиками. Имеется возможность регулирования сроков схватывания (начала твердения) смесей.

Значения основных параметров Ductal® для различных составов приведены в таблице 1.

Принципиально важными являются отличия UHPFRC от бетона при работе на растяжение после начала процесса трещинообразования (рис. 3). Обычный бетон не обладает сопротивлением растяжению после образования трещин. Разрушение неармированного бетона после трещинообразования имеет хрупкий характер. В связи с этим в прочностных расчетах железобетонных конструкций сопротивление бетона растяжению принимается равным нулю.

Фибробетоны, имея процент дисперсного армирования (фиброй) по объему, не превышающий 1,0–1,5%, обладают возможностью восприятия некоторых растягивающих напряжений и после трещинообразования. В таком количестве фибра позволяет несколько снизить хрупкость, то есть обеспечить возможность более высоких деформаций под действием растягивающих напряжений без разрушения. В прочностных расчетах может учитываться сопротивление материала растя-

Табл. 1. Характерные значения параметров Ductal®

Нормативная прочность на растяжение, соответствующая началу трещинообразования, МПа	7–10
Нормативная прочность на растяжение после начала трещинообразования, МПа	8–15
Модуль упругости, ГПа	45–55
Водоцементное отношение (по весу)	<0,2
Содержание фибры (по объему), %	2,0–3,5% (при особых условиях – до 6%)
Объемная масса, кг/м ³	2300–2600

жению. Однако величины этого сопротивления весьма незначительные и всегда менее фактической прочности материала на растяжение при упругой работе (до трещинообразования).

Материалы класса UHPFRC позволяют обеспечить выраженный пластический характер работы на растяжение после начала трещинообразования. Это возможно только при значительных процентах армирования фиброй, например, у Ductal® – более 3,0%. При этом может быть достигнуто проявление так называемого деформационного квази-упрочнения, которое характерно тем, что после начала трещинообразования следует стадия пластической работы материала на растяжение. В этом случае вос-

принимаемые напряжения могут превышать напряжения, вызывающие образование трещин, на 15% и более.

При наличии на диаграмме состояния UHPFRC (рис. 3) зоны квази-упрочнения после появления первой трещины деформации не концентрируются в одной этой трещине. Материал сохраняет способность распределять трещины по длине растянутой зоны образца, при этом трещины сохраняют очень малое раскрытие. Это обеспечивается благодаря тому, что распределенная по всему объему фибра при достаточном модуле упругости ее материала, прочности и заделке в матрицу полностью воспринимает растяжение с бетон-матрицы в полости зародившейся трещины, не позволяя

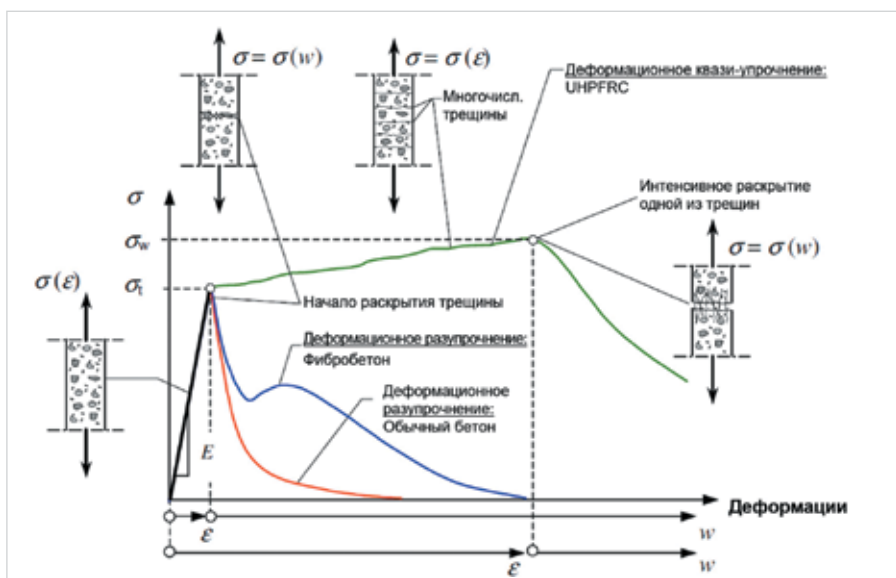


Рис. 3. Схематические зависимости напряжения - деформации для бетона без армирования, фибробетона и UHPFRC при одноосном растяжении: σ - напряжения; ε и w - соответственно, относительные и абсолютные (раскрытие трещин) деформации; E - модуль упругости

Identity Card of Material*		Ductal® G2 FM STT	
Date	May 2018	Written by	V. MALIK
Version	2	Validated by	S. BERNARDI
*According to the standard NF P 18-470 "Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete - Specifications, performance, production and conformity".			
General Characteristics			
Nominal formula and mixing process	CF. Mix design sheet		
D_{max}	0.6 mm		
Length of fibres L_f	14 mm		
Class associated to the type of fibres	Type M		
Designation	UHPRFC-S		
Casting Method	Placement by self-weight or piston pump (according to LafargeHolcim recommendations)		
Heat treatment (TT)			
Yes <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>		
Type of Heat Treatment	Not relevant		
Description	Not relevant		
Properties of fresh concrete			
Slump flow (ASTM cone)	245 mm ± 18.4 mm		
Working time at 20°C	1 hour		
Air content (entrapped air)	3.0 %		
Curing conditions	Curing at 20°C (If curing product shall be applied on the exposed fresh surfaces, these surfaces should also be protected to limit desiccation.)		
Mechanical Properties at 28 days or before/after TT			
	at 24 h	after TT	at 28 days
Characteristic compressive strength f_{ck} (compressive strength class)	-	-	150 MPa (UHPRFC 150/155)
Characteristic value of limit of elasticity under tension $f_{t,el}$	-	-	9.5 MPa
Mean value of tensile limit of elasticity under tension $f_{t,mean}$	-	-	10.5 MPa
Tensile behaviour class	T3		
Characteristic value of post-cracking strength f_{ctm}	8.0 MPa		
Mean value of post-cracking strength f_{ctm}	9.3 MPa		
Mean value of Young's modulus E_{cm}	56 GPa		
© LafargeHolcim 2018 - All rights reserved - Copying prohibited			

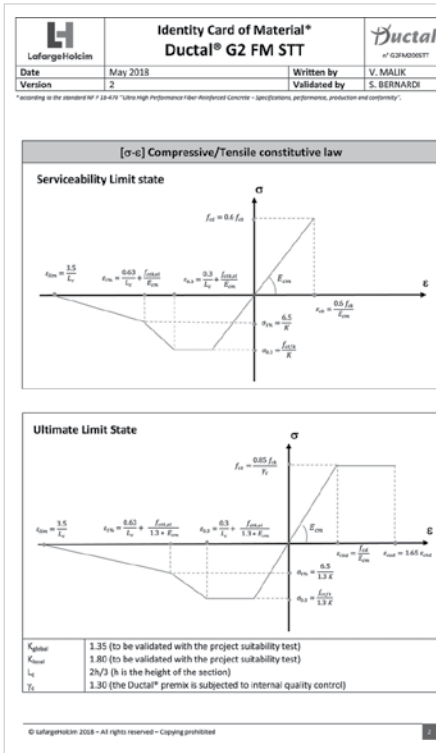


Рис. 4. Пример идентификационной карты

ей резко увеличиться. Отсутствие проявлений хрупкости в работе на растяжение позволяет принимать в прочностных расчетах достаточно большие значения сопротивлений материала растяжению. При проектировании это делает баланс расчетных проверок прочности и трещиностойкости сходным с тем, который характерен для железобетона, то есть при обычном стержневом армировании.

Различные характеристики UHPRFC, используемые при проектировании, например модуль упругости, характеристики прочности на растяжение, величины ползучести и усадки и так далее, не могут назначаться априорно как для бетона, то есть исходя только из их класса прочности на сжатие. Для проектирования следует использовать идентификационную карту планируемой к применению смеси UHPRFC (рис. 4). Кроме того, ряд параметров UHPRFC не могут быть назначены просто исходя из состава смеси ввиду существенного влияния также и технологических аспектов.

Таким образом, UHPRFC – это материал, параметры которого, используемые при проектировании,

являются функцией большего, чем в обычном бетоне, количества факторов. Например, размеры и форма конструкции оказывают влияние на распределение в ней фибры при укладке смеси. В зависимости от этого изделия подразделяются, по терминологии зарубежных норм, на «толстые» и «тонкие», а фибра в конструкции будет иметь ориентацию либо 3D, либо 2D.

При реализации проекта, в том числе на стадии строительства, должно быть подтверждено достижение заявленных в идентификационной карте значений. Для этой цели в несколько этапов проводятся испытания контрольных образцов. Испытания для окончательного подтверждения принятых при проектировании характеристик материала проводятся на образцах, отобранных из опытного прототипа конструкции.

Практика применения Ductal® в некоторых категориях несущих конструкций различного назначения свидетельствует о достаточной конкурентоспособности этого материала в современных условиях. Существенно более высокая, чем у обычного железобетона, стои-

мость материала компенсируется снижением косвенных затрат при рациональном проектировании. Это достигается вследствие:

- применения конструкций с меньшим расходом материалов за счет кратного увеличения прочностных показателей по сравнению с обычным бетоном;
- обеспечения более высокой технологичности работ, связанных с армированием конструкций, в том числе за счет отказа от конструктивной (в некоторых случаях и поперечной) арматуры и создания более эффективных систем предварительного напряжения;
- уменьшения трудо- и энергозатрат при транспортировке, складировании и монтаже конструкций за счет уменьшения их массы;
- существенного снижения эксплуатационных затрат за счет более высоких эксплуатационных показателей.

При проектировании конструкций из UHPRFC список требований отличается от требований для железобетона, что в определенной степени характерно и для фибробетонов вообще. Это в полной мере отражено в современных нормах проектирования: группе французских стандартов, прошедших несколько редакций, – NF P 18-710 (2016) и NF P 18-470 (2016) [4, 5], а также швейцарских – SIA 2052:2016 [6]. Система требований более объемна и включает значительное количество позиций, связанных с подтверждением принимаемых в расчетах величин. В частности, нужно подтверждать параметры дисперсного армирования, которые не фиксируются привычными методами (как, например, в железобетоне при приемке арматурного каркаса), а формируются при приготовлении и укладке смеси.

Реализуя UHPRFC в неадаптированных, общепринятых для железобетона технических решениях, получить серьезный эффект от применения материала на практике не удастся. Технические решения нужно прорабатывать специально под этот материал, раскрывая его возможности, в том



Рис. 5. Балки перекрытий корпусов охлаждения атомной электростанции Cattenom (Франция)

числе используя возможность регулирования его характеристик.

Первое массовое применение несущих конструкций из Ductal® относится к 1997–1998 годам. Материал был применен при изготовлении балок, предназначенных для установки в модернизируемых теплообменных корпусах атомной электростанции Cattenom во Франции (рис. 5). Технические эксплуатационные требования были весьма жесткими. Требовался строительный материал, который мог бы выдерживать физико-химические агрессивные воздействия (сточные воды, сульфаты, термические градиенты и циклы замораживания/оттаивания). Максимальный пролет балок одной из групп составил около 14 м. Проектные решения продемонстрировали возможность весьма существенного снижения веса в сравнении

с обычными железобетонными балками. Предполагалось также значительное увеличение срока службы конструкций.

Две балки были установлены в качестве контрольных образцов-свидетелей для изучения ресурса прочности и возможного старения в агрессивной среде. Образцы, взятые из этих балок в 2008 и 2019 годах (соответственно после 10 лет и 21 года эксплуатации), показали, что в условиях высокой агрессии какого-либо ухудшения механических свойств материала по сравнению с первоначальными не произошло.

В мостовых конструкциях наиболее активное применение Ductal® происходило в пешеходных мостах. На этих сооружениях апробировались различные конструктивные решения, которые постепенно эволюционируют и в настоящее

время. Несмотря на их разнообразие, может быть выделен ряд сформировавшихся особенностей. Для многих современных технических решений характерно применение корытообразного профиля поперечного сечения пролетных строений с развитой растянутой и компактной сжатой зоной конструкции (рис. 6–8). Современные решения характеризуются также применением составных по длине конструкций с предварительным напряжением. Длины пролетов могут превышать 70 м, а отношения высоты конструкции к пролету достигают значений 1/40.

Технические решения для балок автодорожных мостов также весьма разнообразны. При этом характерными подходами при проектировании являются стремление к отказу от применения поперечной арматуры, а также использование систем предвари-



Рис. 6. Пешеходный мост Passerelle des Anges (Франция), пролет 67,5 м



Рис. 7. Пешеходный переход через железнодорожные пути в Le Cannet-des-Maures (Франция), пролет 34 м



Рис. 8. Пешеходный переход через автодорогу в Le Bouveret (Швейцария), пролет 25 м

тельного напряжения, совмещающих арматурные элементы в теле бетона и вне его (рис. 9, 10).

Некоторые технические решения из Ductal® стали возможны и получили достаточно широкое применение именно благодаря особым

свойствам материала [7]. Это касается, например, элементов, объединяющих на монтаже сборные железобетонные и металлические конструкции. Решение применимо и в рамках реализации развивающейся в настоящее время концепции высокоскоростно-

го строительства мостов. Здесь проявляются уникальные свойства Ductal® как высокопрочного (а также быстротвердеющего) и хорошо проармированного материала. Поэтому даже в небольшом объеме укладки он позволяет воспринимать высокие концен-

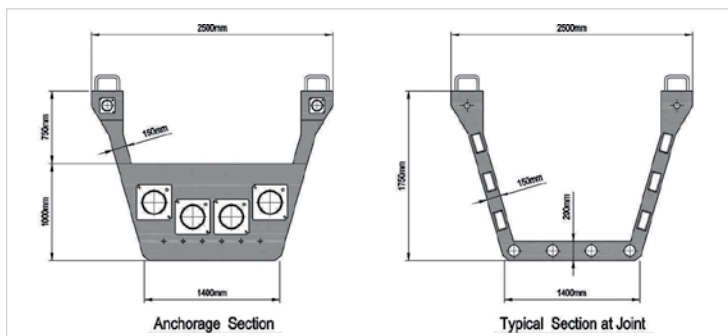


Рис. 9. Мост Rantau-Siliau (Малайзия) с корытообразными UHPFRC-балками, пролет 52 м



Рис. 10. Мост Batu 6 в Gerik Perak (Малайзия) с составным по длине пролетным строением из UHPFRC, пролет 100 м

трированные напряжения без каких-либо повреждений (рис.11).

Другим специфическим техническим решением, реализующим особые возможности UHPFRC, является устройство так называемого высокопрочного добавленного слоя (в монолитном исполнении), используемого при ремонте, реконструкции, восстановлении несущих мостовых конструкций. Как правило, оно применяется для железобетонных конструкций, в особенности плиты проезжей части, но в отдельных случаях – и для стальных ортотропных плит и других элементов (рис. 12). Толщина добавленного слоя, как правило, составляет 30–60 мм. При больших толщинах этот слой может быть армирован и стержневой арматурой.

Важное значение в этом техническом решении имеют высокие свойства сцепления материала при укладке его на подготовленную бетонную поверхность. Решение предполагает также возможность создания влагостойкого слоя только из Ductal® (без применения специальных гидроизоляционных материалов). Здесь реализуется способность материалов класса UHPFRC при достаточно высоких процентах фибрового армирования (от 3,5% и более) сохранять влагонепроницаемость в нагруженном состоянии. Для этого относительные деформации растяжения, как правило, должны быть при проектировании ограничены величиной 1‰ [8].

Имеются и другие примеры эффективного применения Ductal®

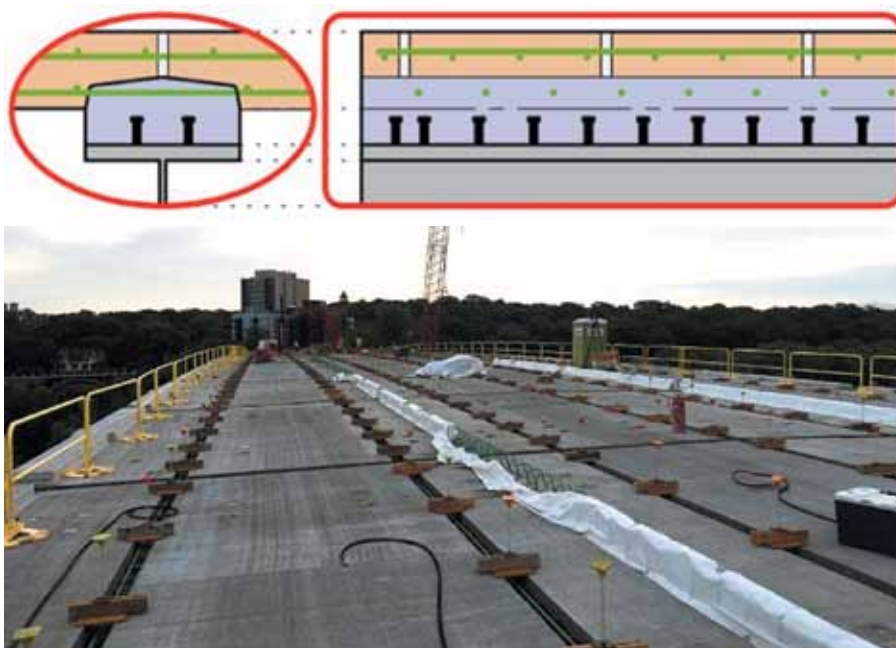


Рис. 11. Устраиваемые на месте малогабаритные соединительные элементы из UHPFRC

при ремонте мостовых сооружений: устройство анкерных блоков-упоров системы внешнего предварительного напряжения при усилении пролетного строения эстакады в Великобритании (рис. 12) или в сборных элементах плиты проезжей части для ее усиления.

Имеется также ограниченный опыт применения UHPFRC для несъемной опалубки (в особенности для монолитных плит проезжей части железобетонных и сталежелезобетонных мостов), свай, подпорных стен и др.

Кроме того, в настоящее время развиваются специальные методы укладки UHPFRC, среди которых 3D-печать, набрызг и др. Эти технологии способны расширить объем экономически эффективно применения UHPFRC.

В России имеется единичный, но весьма успешный опыт применения Ductal® – в 2017 году концерном «КРОСТ» при строительстве Хорошевской гимназии (в 75-м квартале района Хорошево-Мневники г. Москвы) [9]. Материал использован в несущих конструкциях лестничных маршей (косоурах) пролетом 10,8 м. Отношение высоты сечения к пролету составило 1/31.

В целом для современных конструкций из UHPFRC, как правило, характерно применение более сложных форм и стремление к более тонким элементам поперечного сечения (в том числе при уменьшении толщины защитного слоя, которое возможно как по фактору сцепления стержневой арматуры с матрицей UHPFRC, так и по защитным свойствам материала по отношению к арматуре).



Рис. 12. Уложенные в качестве добавленного слоя 53 тыс. м² Ductal® на виадуке Chillon (Швейцария) / Анкерные блоки из Ductal® для системы дополнительного внешнего предварительного напряжения эстакады Hammersmith (Великобритания)



Рис. 13. Применение тонких сборных плит UHPFRC для ремонта проезжей части по стальной ортотропной плите

Значительно упрощается конструкция стержневого армирования, с возможностью в ряде случаев полного отказа от поперечного стержневого армирования. Это позволяет варьировать сплошность стенок основных, работающих на изгиб, несущих конструкций, в том числе исходя из эстетических соображений. Веса конструкций из этого материала при этом дополнительно существенно снижаются, в сравнении с железобетонными конструкциями.

Также расширяются возможности, связанные с предварительным напряжением (материал более прочный на сжатие, более высокое сцепление с арматурой, в том числе напрягаемой). Однако при этом имеются некоторые ограничения, связанные с устойчивостью, поскольку тонкие конструкции более склонны к отказам по этому фактору.

Параметры конструкций из UHPFRC таковы, что при проектировании следует с особым вниманием относиться к прогибам конструкций и их работе под динамическими нагрузками.

Основываясь на понимании особенностей российских условий, ЛафаржХолсим видит достаточно широкие возможности для применения материала – как для строящихся сооружений, так и для ремонта и усиления эксплуатируемых мостовых сооружений.

В настоящее время эскизные проектные проработки проводятся на базе указанных выше французских и швейцарских нормативных документов. Эти нормы в наибольшей степени проработаны и соответствуют современному уровню знаний. Документы содержат фундаментальную методическую основу для проектирования и являются качественными справочными документами. Тем не менее очевидно, что для реального применения в России конструкций из UHPFRC необходима разработка и утверждение ряда специальных нормативных документов (как это предусмотрено в [1]). Это требует серьезного научно-исследовательского обоснования. Определенной базой для проработки нормативных документов могут явиться российские нормы на фибробетоны [2, 3].

С 2019 года ЛафаржХолсим проводит комплексную НИОКР с целью разработки необходимого обоснования применения Ductal® для несущих конструкций в России. Главным исполнителем этой работы является научно-исследовательская организация «СервисМОСТ», специализирующаяся в области исследований и разработок по армированным конструкциям из бетона.

К выполнению работ привлекаются ведущие российские научно-исследовательские, проектные и строительные организации. Основными задачами этой работы являются:

- получение достаточного объема данных для разработки СТО на материал Ductal®, с учетом планируемой поэтапной локализации выпуска этого продукта в России;
- изучение работы конструкций из рассматриваемого материала под различными видами нагрузок и создание достаточных научно-технических заделов для последующих исследований и проработок по конкретным объектам и техническим решениям, требующим разработки СТУ (в качестве первого шага разработки российских стандартов);



Рис. 14. Торкретирование Ductal® со стальной фиброй для ремонта и реконструкции водопропускных труб



Рис. 15. 3D-печать Ductal® для геометрически сложных конструкций

- отработка в российских условиях всего цикла контрольных испытаний стандартных образцов материала, обеспечивающих необходимую базу для его применения в несущих конструкциях;
- получение практического опыта в технологии работ с Ductal® как в заводских условиях, так и на объектах (на припостроечных полигонах и стройплощадках) в российских условиях.

Постановка НИОКР имеет выраженную практическую направленность и позволяет увязывать выполняемые в ее рамках работы с проработками по конкретным техническим решениям и объектам.

Несмотря на очевидную конкурентоспособность, доказанную практикой, уровень эффективности применения несущих конструкций из Ductal® как высокотехнологичного материала в значительной степени зависит от качества расчетной, конструктивной и технологиче-

ской проработки каждого конкретного технического решения. ЛафаржХолсим это хорошо осознает. Предлагая для применения этот современный материал с большими возможностями, компания готова обеспечивать техническую помощь и консультации специалистов как по методам проектирования, так и по технологии работ.

Основываясь на более чем 20-летнем опыте применения материала для сооружений различного назначения, компания ЛафаржХолсим наработала все необходимые компетенции для помощи в реализации проектов практически любой сложности. Консультации по любым вопросам применения Ductal® могут быть оперативно даны российскими специалистами компании. Также может быть предоставлена техническая помощь при проектировании и на всех стадиях подготовки и реализации проекта. При необходимости для этого могут быть привлечены

обширные зарубежные ресурсы компании. Это, прежде всего, возможности научно-исследовательского центра ЛафаржХолсим в Лионе (Франция), а также многочисленных проектных, производственных, строительных и других специализированных организаций, и учебных центров, сотрудничающих с компанией.

И.М. Сапронов, директор
ООО «Сервис-МОСТ»,
Р.С. Чурилов,
руководитель
направления Ductal®
ЛафаржХолсим Россия,
С. Бернарди,
эксперт по UHPFRC (Франция)



LafargeHolcim

тел. 8 800 500-12-03
www.lafargeholcimrus.ru

Список литературы:

1. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. М., 2011.
2. СП 297.1325800.2017. Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. М., 2017.
3. СП 360.1325800.2017 Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования.
4. NF P 18-710. National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC). AFNOR. – La Plaine Saint-Denis, 2016 // Национальное приложение к Еврокоду 2 – Проектирование железобетонных конструкций: специальные нормы для сверхпрочного фибробетона (СПФБ).
5. NF P 18-470. Concrete – Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity. AFNOR. – La Plaine Saint-Denis, 2016 // Бетон – сверхвысокопрочный фибробетон – технические условия, эксплуатационные качества, производство и соответствие требованиям.
6. SIA 2052 – Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites (UHPFRC). Construction material, dimensioning and application. English translation of the Technical Leaflet SIA 2052 with adaptations. MCS-EPFL. – Lausanne, Switzerland, 2016 // Рекомендация: Сверхвысокопрочные, армированные волокнами композиты на основе цемента (СПФБ). Строительные материалы, размеры и применение). Английский перевод Технического листка SIA 2052 с адаптациями, MCS-EPFL. – Лозанна, Швейцария, 2016.
7. F. Toutlemonde, S. Bernardi, Y. Brugeaud, A. Simon. Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC – HAL Id: hal-01955204. – 2018. – 22 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01955204>
8. E. Brühwiler. «Structural UHPFRC» to enhance bridges // 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC 2018 – China). – Fuzhou, China, 2018. – P. 140–158.
9. Архитектурный Ductal. Лестницы и пешеходные мостики. [Электронный ресурс]: URL: <https://lafargeholcimrus.ru/>