
Прочность восстановленных и усиленных железобетонных плит перекрытия

Г.В. Налбандян¹, О.Л. Фиговский², В.А. Ушков¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

²Израильская ассоциация изобретателей, 34750, Haifa (Israel)

Аннотация. Обоснована целесообразность плазменной обработки сырьевых компонентов для повышения физико-механических показателей строительных растворов. Разработанный метод плазменной обработки сырьевых компонентов характеризуется высокой эффективностью и удобством в применении. Рассмотрено влияние промышленных марок ремонтных составов на цементном вяжущем и ремонтного состава, содержащего обработанные низкотемпературной неравновесной плазмой кварцевый песок и воду затворения, на прочность восстановленных и усиленных плит перекрытия, моделирующих плоские железобетонные плиты перекрытия.

Показано, что разрушение указанных плит происходит по ремонтному составу. Установлено, что внешнее армирование восстановленных железобетонных плит перекрытия с помощью углеродных сетки или ленты значительно повышает их несущую способность. Высокую эффективность применения эпоксидных композиционных материалов для усиления строительных конструкций различного функционального назначения подтверждают результаты экспериментальных исследований и поверочных расчетов плит перекрытия.

Ключевые слова: внешнее армирование, вода затворения, кварцевый песок, композиционные материалы, низкотемпературная плазма, плиты перекрытия, прогибы, прочность, ремонтный состав.

Основной задачей при выполнении ремонтно-восстановительных работ железобетонных конструкций (ЖБК) различных зданий и сооружений является выбор эффективных ремонтных составов, с помощью которых можно восстановить конструкции так, чтобы они приобрели не только первоначальную форму и внешний вид, но и соответствовали проектным эксплуатационным характеристикам на последующий срок их эксплуатации. Для этих целей чаще всего используют тиксотропные строительные смеси на цементном вяжущем, содержащие фиброволокно (полипропиленовая фибра или ПАН – фибра), минеральный наполнитель и активные химические добавки. Одновременно проводятся исследования по повышению технологических и эксплуатационных свойств ремонтных составов. Так, например, для

повышения физико-механических характеристик строительных растворов используют механохимическую активацию портландцемента [1-7] или кварцевого песка [8, 9]. Механическая активация портландцемента способствует не только повышению удельной поверхности цемента, но и приводит к изменению структуры поверхностного слоя частиц цемента, образованию аморфной фазы внутри обработанного минерального вяжущего [1, 4]. Механохимическую активацию цемента проводят в аппаратах вихревого слоя [1], в процессе обработки фторирующим реагентом [3], методом высокоэнергетического шарового фрезерования [4], а также за счет применения различных вибрмельниц [5-7]. Механохимическую активацию кварцевого песка осуществляют в центробежно-планетарной мельнице АТО-2 [8, 9]. Реологические свойства гетерогенных систем при механической активации кварцевого песка рассмотрены в работе [10].

Для улучшения свойств ремонтных составов и бетонов используют также электрохимическую, магнитнохимическую и механическую активацию воды затворения [11-15]. При активации воды затворения изменяется ее окислительно-восстановительный потенциал и возрастает рН воды. При этом скорость релаксации свойств воды в статическом состоянии составляет 0,53-0,96 мВ/мин, а в динамическом — 7,7-11,1 мВ/мин. [13].

Эффективным методом повышения эксплуатационных характеристик строительных изделий и конструкций является плазменное оплавление строительных композитов. За счет плазменного оплавления поверхностного слоя строительных композитов возрастают морозостойкость, водонепроницаемость и улучшается внешний вид бетонных, керамических и силикатных изделий [16-18]. Низкотемпературная неравновесная плазма (НТНП) может быть использована и для обработки сырьевых компонентов при производстве строительных растворов [19, 20].

Строительный рынок предлагает широкий ассортимент ремонтных составов, различающихся по стоимости, технологическим и физико-механическим характеристикам, условиям их применения. Это значительно

осложняет выбор строительных материалов для проведения ремонтно-восстановительных работ. В отечественной нормативной документации сформулированы требования к эксплуатационным свойствам материалов и системам для ремонта ЖБК, в том числе для подземных сооружений, находящихся в эксплуатации: ГОСТ 32016 – 2012 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования», ГОСТ 32017 – 2012 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к системам защиты бетона при ремонте», ГОСТ 33762-2016 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к инъекционно-уплотняющим составам и уплотнениям трещин, полостей и расщелин» и ГОСТ Р 56378-2015 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций». Так, например, ГОСТ 32016 и ГОСТ 32017 устанавливают основные принципы и методы ремонта, защиты железобетонных конструкций от коррозии, требования к подготовке основания конструкций при их антикоррозионной защите и ремонте.

Одновременно с ремонтом ЖБК проводят и их усиление. Недостатками традиционных методов усиления конструкций (обоймы, хомуты, рубашки и т.п.) являются повышение массы усиливаемой конструкции, снижающей эффективность усиления, технические трудности размещения конструкций усиления в ограниченном пространстве и необходимость дополнительной защиты конструкций усиления от воздействия агрессивных сред.

Эффективным методом усиления ЖБК является система внешнего армирования, при которой на поверхность растянутой зоны ЖБК наносят усиливающие элементы из высокопрочных полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидных полимеров, воспринимающих дополнительные усилия. В качестве армирующих наполнителей ПКМ применяют тканые материалы на основе углеродных, арамидных, полиэфирных и базальтовых волокон или стекловолокна. ПКМ обладают

высокими прочностью и модулем упругости при растяжении, низкой массой, технологичностью, стойкостью к воздействию агрессивных внешних факторов и способностью повторять любые формы поверхности усиливаемой конструкции. Выбор композиционного материала для усиления строительных конструкций осуществляют в соответствии с СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами».

Систему внешнего армирования применяют как на стадии строительства и эксплуатации зданий и сооружений для устранения повреждений несущих ЖБК в результате ошибок проектирования (занижения сечения арматуры, отклонение от проекта положения арматуры или несоответствие прочности бетона проектной марке) или выполнения работ по повышению несущей способности конструкций при увеличении расчетных нагрузок, или изменения конструктивной схемы элементов здания и образования проемов, так и на стадии проектирования для повышения прочности, сейсмостойкости, надежности и долговечности ЖБК [21 - 28].

Целью настоящей работы является изучение эффективности ремонтных строительных составов на цементной основе и внешнего армирования на несущую способность железобетонных плит перекрытия.

Для проведения экспериментальных исследований в заводских условиях были изготовлены железобетонные плиты перекрытия размером 1000x500x50 мм, моделирующие плоские перекрытия коммуникационных коллекторов. Плиты из бетона класса В15 армированы металлической сеткой с ячейками 100x100 мм, отвечающей требованиям ГОСТ 23279 – 2012 «Сетки арматурные сварные для железобетонных конструкций и изделий. Общие технические условия». Арматурные стержни В500 сетки имели диаметр 4мм. Для восстановления модельных плит перекрытия использовали ремонтные составы марок: «CarbonWrap Repair ST» (ТУ 23.64.10-053-38276489-2017) производства компании ООО «НЦК»; «Структурит 100» компании Thoro; «Maregrout Tixotropic» компании MAPEI и ремонтный состав, содержащий

обработанные НТНП кварцевый песок и воду затворения. Подготовку поверхности разрушенных плит перекрытия к восстановлению и расшивку трещин проводили с учетом рекомендаций производителей. При изготовлении модифицированных строительных растворов применяли цемент типа ЦЕМ I 32,5Н, ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия»; кварцевый песок II класса с модулем крупности $M_k = 0,63$ по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и его отдельную фракцию размером менее 0,16 мм. Содержание различных фаз по объему в составе цементного камня, кварцевого песка и цементно-песчаных растворов определяли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL Optim'X. Методом капиллярной конденсации азота с помощью анализатора NOVA 2200e, определяли величину суммарной поверхности зерен песка и объем пор мелкодисперсного наполнителя. Площадь поверхности кварцевого песка измеряли способом Single Point BET SA, а методом Баррета-Джойнера-Халенды рассчитывали распределение пор. Для затворения цементно-песчаных растворов применяли воду, соответствующую требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Обработку кварцевого песка и воды затворения производили в лабораторной плазменной установке, описанной в работе [19]. В указанной установке НТНП формируется источником переменного тока с напряжением до 8000 В и частотой до 40 кГц. Между электродами возникает область НТНП со значением параметра $E/N = 15 \times 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$. Кварцевый песок обрабатывали в проточном режиме и в барьерном разряде. Основные технологические и физико-механические свойства использованных ремонтных составов приведены в табл. 1.

Для усиления железобетонных модельных плит перекрытия применяли углеродные сетку марки «CarbonWrap Grid 380/1000» (ТУ 23.99.14-043-38276489-2017) и ленту марки «CarbonWrap Tape 230/150» (ТУ 23.99.14-041-38276489-2017), производства компании ООО «НЦК». Углеродную сетку к

Прочность при сжатии цементно-песчаных растворов определяли на гидравлическом прессе Instron-3382 и разрывной машине WDW-100E по ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии», а сроки схватывания - по ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Прочность, жесткость и трещиностойкость исследованных плит перекрытия изучали на установке Instron 1000 HDX с учетом требований ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости». Схема нагружения плит перекрытия приведена на рис. 2. Ширину раскрытия трещин в модельных плитах перекрытия при воздействии нагрузок измеряли с помощью микроскопа Бринелля МПБ-2, величину прогиба - электронным индикатором Micron. Испытания восстановленных плит перекрытия проводили через 7 суток твердения ремонтных составов при температуре 20...23 °С.

Поверочный расчет усиленных железобетонных плит перекрытия выполнен в программе «АРБАТ» программного комплекса SCAD согласно СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Расчет проведен с учетом предельного состояния первой и второй группы (прочность и трещиностойкость) для расчетных сочетаний усилий, выбираемых автоматически в зависимости от заданных расчетных нагрузок в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что обработка НТП кварцевого песка с $M_k = 0,63$ и фракции с размером менее 0,16 мм в проточном непрерывном режиме и методом барьерного разряда снижает удельную поверхность зерен SiO_2 на 10,6-20,3 % и площадь поверхности пор на 8,4-14,1 % (табл. 2).

Таблица 1 – Технологические и физико-механические свойства ремонтных составов на цементной основе

Показатели	Промышленные марки ремонтных составов			Ремонтный состав на основе обработанных НТПП сырьевых компонентов
	«Структурит 100»	«Mapegrout Thixotropic»	«Carbon Wrap Repair ST»	
Максимальный диаметр заполнителя, мм	1,5	2,5	2,5	2,0
Жизнеспособность смеси мин	60	60	60	50
Прочность при сжатии/изгибе МПа, через 1 сутки 28 суток	25 / 5 65 / > 7	25 / ≥ 4,5 ≥ 60 / > 8,5	25 / ≥ 4,5 50 / ≥ 8,5	35 / ≥ 6 70 / ≥ 8,5
Адгезия к бетону после 28 суток твердения, МПа	> 1,5	≥ 2	≥ 1,5	> 2,0
Водонепроницаемость	W10	-	≥ W8	W10

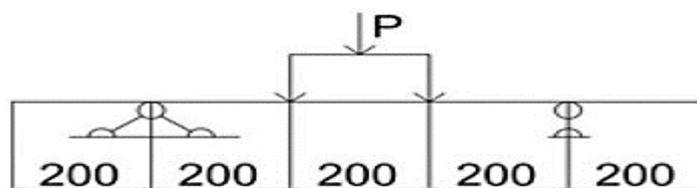


Рисунок 2 - Схема нагружения модельных железобетонных плит перекрытия

В кварцевом песке прослеживается значительное изменение удельной поверхности пор радиусом 20-35 А. Существенное уменьшение площади поверхности пор и удельной поверхности зерен песка наблюдается с ростом размера его частиц. Наблюдаемый эффект связан с оплавлением поверхности частиц кварцевого песка при их взаимодействии со стримером.

Таблица 2 - Характеристики кварцевого песка после обработки НТНП

Характеристика размеров песка	Вид обработки НТНП	Площадь поверхности (способ М-р ВЕТ), см ² /г	Коэффициент корреляции, R	Характеристика пор (способ БДХ (ВЛН))		
				Площадь поверхности, см ² /г	Объем пор, мг ³ /г	Радиус пор Dv(r), А
Mк=0,63	-	229,8	0,997	86,8	0,003	20,345
	Барьерный разряд	205,5	0,995	79,5	0,002	20,470
<0,16 мм	-	461,9	0,992	199,5	0,004	20,470
	Проточный режим	368,2	0,991	165,4	0,004	20,417

Анализ структуры песка с помощью Раман-спектрометра показал переход кристаллической структуры SiO_2 в аморфную [19]. Результаты исследований подтверждает и снижение на 10-18 % водопотребности кварцевого песка, обработанного НТНП. Рентгенофазовый анализ кварцевого песка после его обработки НТНП показал, что кратность плазменной обработки заполнителя не влияет на его фазовый состав и минералогический состав затвердевшего цементно-песчаного раствора.

Изменение микроструктуры поверхности кварцевого песка при обработке НТНП приводит к повышению физико-механических свойств цементно-песчаных растворов: прочность при сжатии растворов при однократной обработке НТНП кварцевого песка повышается с 23,5 до 28,3 МПа. При двух и трехкратной обработке низкотемпературной плазмой SiO_2 прочность строительных растворов через 28 суток нормального твердения возрастает соответственно до 33 и 38 МПа (рис. 3).

При обработке низкотемпературной плазмой воды затворения снижается концентрация в воде растворимых солей кальция и магния, вследствие чего ускоряется процесс твердения портландцемента и возрастает прочность цементно-песчаных растворов в первые пять суток их нормального твердения.

При этом эффективность обработанной НТНП воды затворения повышается с увеличением сроков ее хранения (рис. 4). Прочность при сжатии цементно-песчаных растворов через 28 суток нормального твердения при применении воды затворения, обработанной НТНП, выше, чем при использовании неактивированной воды. Так, например, при использовании однократно обработанной НТНП воды затворения прочность при сжатии строительных растворов повышается на 15,4 % (с 18,2 до 21 МПа) по сравнению с необработанной водой. Применение воды затворения, прошедшей двух- и трехкратную обработку НТНП, повышает прочность при сжатии строительных растворов дополнительно на 4,5-6 %. Это свидетельствует о низкой эффективности многократной обработки НТНП воды затворения.

Применение смеси исходной и обработанной НТНП воды затворения при их соотношении, равном 1:1, способствует получению строительных растворов с максимальными показателями прочности. При использовании смеси обработанного и исходного кварцевого песка прочность строительных растворов линейно снижается с уменьшением содержания модифицированного заполнителя. При этом наблюдается синергетический эффект повышения прочности ремонтных строительных растворов при совместном применении однократно обработанного НТНП кварцевого песка и воды затворения. Это обусловлено, по нашему мнению, различными механизмами повышения прочности цементно-песчаных растворов при плазменной обработке воды затворения и мелкого заполнителя.

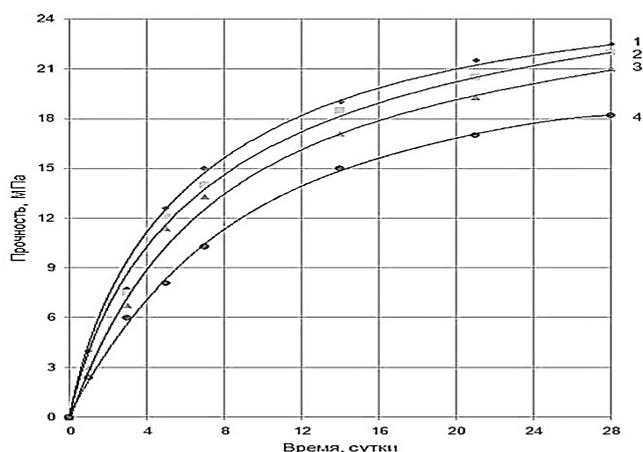


Рисунок 3 - Зависимость прочности при сжатии строительных растворов от кратности обработки НТНП кварцевого песка: 1 — трехкратное; 2 — двукратное; 3 — однократное; 4 — необработанный кварцевый песок.

Следует отметить, что полученные экспериментальные зависимости прочности при сжатии ($R_{сж}$) строительных растворов для различной кратности обработки НТНП кварцевого песка, продолжительности и кратности обработки воды затворения, сроков ее хранения описываются уравнением:

$$R_{сж} = a \log(1 + bx), \quad (1)$$

где x – продолжительность нормального твердения строительных растворов; а и b – коэффициенты.

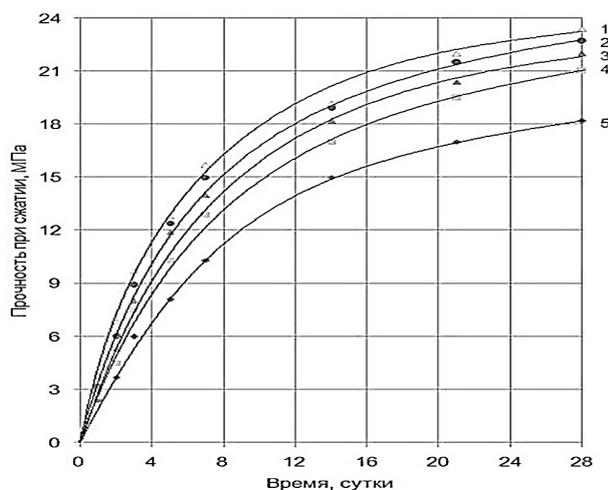


Рисунок 4 - Зависимость прочности при сжатии строительных растворов от сроков хранения обработанной НТНП воды затворения: 1 — 28 сут; 2 — 14 сут; 3 — 7 сут; 4 — 1 сут; 5 — необработанная вода

В качестве примера в табл. 3 представлены значения коэффициентов а и b для кривых, представленных на рис. 4.

Таблица 3 – Значения коэффициентов а и b в уравнении 1

Продолжительность хранения воды затворения, обработанной НТНП	Значения коэффициентов	
	а	б
21	7,4	0,88
14	7,62	0,74
7	7,67	0,64
1	7,82	0,53
Неактивированная вода	7,38	0,45

Результаты изучения прочности исходных и восстановленных модельных железобетонных плит перекрытия представлены в табл. 4.

Высокая эффективность ремонтного состава «CarbonWrap Repair ST» (табл. 4) обусловлена предварительной пропиткой образовавшихся трещин в плитах перекрытия эпоксидным составом «CarbonWrap Resin 230+». Близкие значения несущей способности восстановленных железобетонных плит

перекрытия (табл. 4) показывают, что выбор ремонтных составов целесообразно проводить прежде всего исходя из их технологичности и стоимости. Прочность, прогибы и ширина раскрытия трещин в исследованных плитах перекрытия зависят от расположения металлической арматуры (в растянутой или сжатой зоне). При расположении арматуры в сжатой зоне разрушение модельных плит перекрытия происходит при нагрузке 14,25 – 19,58 кН, а при ее расположении в растянутой зоне – при нагрузке 23,4 – 34,67 кН (табл. 4, 5). Прогибы исходных и восстановленных плит перекрытия представлены на рис. 5. При этом у плиты с арматурой, расположенной в сжатой зоне, раскрытие трещин шириной 0,45 – 0,5 мм происходит при нагрузке 14 кН. У плиты с арматурой, расположенной в растянутой зоне, ширина раскрытия трещин, равная 0,5 мм, наблюдается при нагрузке 30 кН, а разрушающая нагрузка составляет более 34 кН.

Результаты испытания модельных плит перекрытия, восстановленных ремонтными составами на цементной основе (табл. 4), показали, что через 7 суток твердения исследованных составов несущая способность плит перекрытия восстанавливается на 72,1-96,5%.

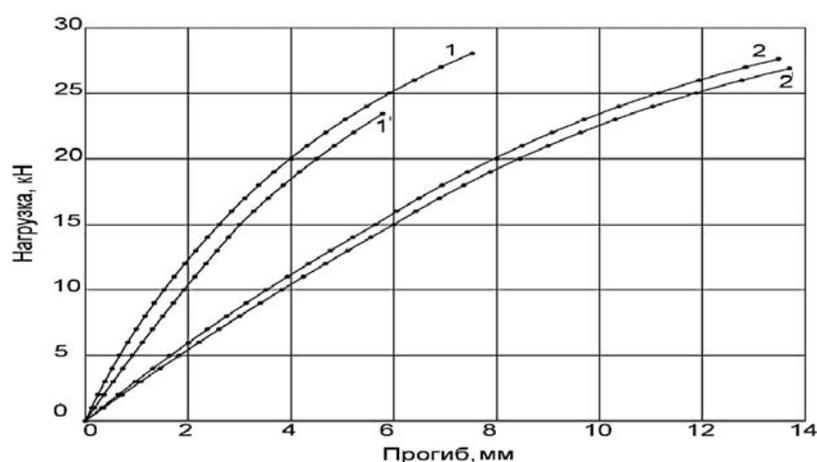


Рисунок 5 – Зависимость прогибов исходных (1, 2) и восстановленных (1', 2') плит перекрытия от величины приложенной нагрузки: 1' – плита, восстановленная ремонтным составом, содержащим обработанные НТНП сырьевые компоненты; 2' – то же, составом «CarbonWrap Repair ST».

Таблица 4 - Разрушающие нагрузки для исходных и восстановленных модельных железобетонных плит перекрытия

Ремонтный состав	Разрушающая нагрузка, кН		Расположение арматуры в плите	Восстановление несущей способности плит, %
	исходные плиты	восстановленные плиты		
«Структурит-100»	17,45	12,59	В сжатой зоне	72,1
Состав на основе сырьевых компонентов, обработанных НТНП	28,04	27,06	В растянутой зоне	96,5
«Mapegrout Tixotropic»	19,58	17,90	В сжатой зоне	91,4
«CarbonWrap Repair ST»	28,46	27,37	В растянутой зоне	96,2

При этом разрушение восстановленных плит перекрытия происходит, как правило, по линии ранее образовавшихся трещин. Более высокая эффективность ремонтного состава, содержащего обработанные НТНП кварцевый песок и воду затворения, обусловлена высокой скоростью набора прочности указанных составов.

Несущая способность восстановленных модельных железобетонных плит перекрытия при их внешнем армировании углеродными лентой марки «CarbonWrap Tape 230/150» или сеткой марки «CarbonWrap Grid 380/1000» возрастает по сравнению с исходной плитой в 1,7-3,6 раза (табл.5). Прогибы исходных, восстановленных и усиленных железобетонных плит перекрытия приведены на рис. 6.

Таблица 5 - Разрушающие нагрузки для исходных, восстановленных и усиленных модельных железобетонных плит перекрытия

Ремонтный состав	Разрушающая нагрузка, кН		Расположение арматуры в плите	Восстановление несущей способности плит, %
	исходные плиты	восстановленные и усиленные плиты		
«Структурит-100»	17,87/27,66	56,98/60,42	В сжатой зоне/растянутой зоне	318,9/218,4
«Mapegrout Tixotropic»	23,40/14,25	40/50,84	В растянутой зоне/ сжатой зоне	170,9/356,8
«CarbonWrap Repair ST»	30,56/34,67	61,6/61,88	В растянутой зоне	201,6/178,5

Примечание. В числителе приведены значения разрушающих нагрузок для плит, усиленных углеродной лентой «CarbonWrap Tape 230/150», в знаменателе – углеродной сеткой «CarbonWrap Grid 380/1000».

Согласно результатам расчета исходной железобетонной плиты перекрытия и усиленной ПКМ деформации в сжатой зоне бетона и

растянутой арматуре существенно уменьшаются, а прочность по наклонным сечениям без поперечной арматуры увеличивается на 22,3%. Прочность по предельному моменту сечения возрастает более чем в 5 раз (коэффициент использования снижается с 5,926 до 1,166), а прочность по наклонным сечениям без поперечной арматуры повышается в 1,29 раза. Коэффициент использования приведен ниже:

прочность по предельному моменту сечения - 5,926/1,166

деформации:

в сжатом бетоне - 331,188/1,672

в растянутой арматуре - 376,288/0,404

прочность:

по бетонной полосе между наклонными сечениями - 0,211/0,164

прочность по наклонным сечениям без поперечной арматуры - 1,869/1,453

Примечание - В числителе даны значения для исходной модельной плиты перекрытия, в знаменателе – для усиленной плиты перекрытия.

Таблица 6 – Несущая способность модельных железобетонных плит перекрытия, усиленных полимерными композитными материалами

Расчетный параметр	Коэффициент использования, K^1/K^2	Повышение несущей способности плиты в N раз, где $N = K^1/K^2$
Прочность по бетонной полосе между наклонными сечениями	0,211/0,164	1,287
Прочность по наклонным сечениям без поперечной арматуры	1,869/1,453	1,286

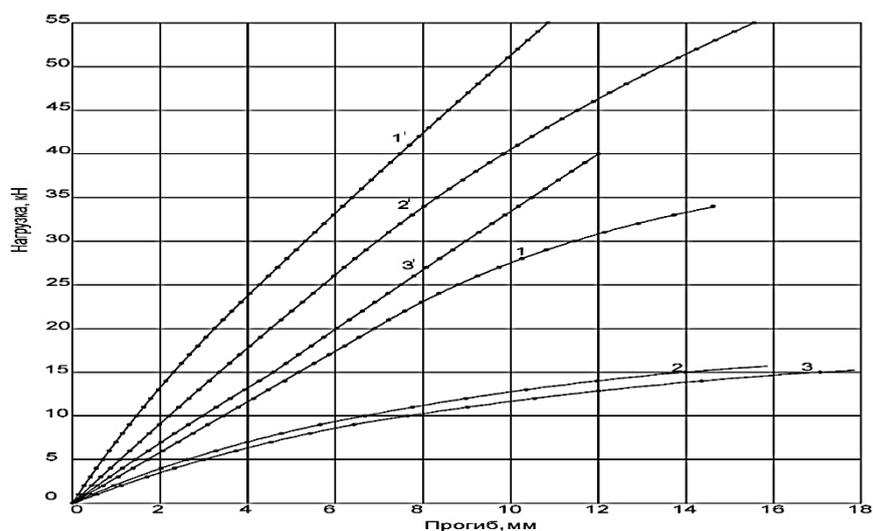


Рисунок 6 – Зависимость прогибов исходных (1 - 3), восстановленных и усиленных (1□ - 3□) железобетонных плит перекрытия от величины приложенной нагрузки: 1□ – плита восстановлена ремонтным составом «CarbonWrap Repair ST» и усилена углеродной сеткой; 2□ – то же, составом «Структурит 100» и усилена углеродной лентой; 3□ - то же, составом «Maregrout Tixotropic» и усилена углеродной лентой; 1 – арматура в растянутой зоне; 2, 3 – то же, в сжатой зоне.

При этом момент, воспринимаемый сечением плиты перекрытия, после усиления ПКМ, вырос в 5,1 раза. Повышение несущей способности усиленных плит перекрытия по другим расчетным параметрам представлено в табл. 6. Результаты поверочных расчетов исходной и усиленной модельной железобетонной плиты перекрытия подтвердили высокую эффективность применения эпоксидных ПКМ для ремонта и усиления железобетонных конструкций различного функционального назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что эффективным направлением модификации сырьевых компонентов ремонтных составов является их обработка НТНП. При плазменной обработке мелкодисперсного заполнителя происходит оплавление его поверхности и снижение на 10-18 % его водопотребности.

Результатом такой обработки является переход кристаллической структуры кварцевого песка в аморфную. Вода затворения, обработанная НТНП, повышает до 50 % динамику набора прочности и до 30 % прочность строительных растворов в возрасте 28 сут. Метод плазменной обработки сырьевых компонентов характеризуется высокой эффективностью и удобством в применении.

Ремонтные составы на цементной основе через 7 суток нормального твердения на 72,1 – 96,6% восстанавливают несущую способность железобетонных плит перекрытия. Низкая эффективность ремонтных составов обусловлена недостаточной их прочностью из-за малого срока твердения. Возможно, что при твердении ремонтных составов в течение 28 суток несущая способность плит перекрытия восстановится до 95-100%. При этом разрушение восстановленных плит перекрытий происходит по ремонтному составу.

Внешнее армирование железобетонных плит перекрытия ПКМ на основе углеродных сетки «CarbonWrap Grid 380/1000» или ленты «CarbonWrap Tape 230/150» повышает их несущую способность более чем в 1,7 раза. При ремонте железобетонных конструкций с плоской поверхностью можно использовать углеродные сетку или ленту, а для ребристых плит перекрытия - углеродную сетку.

Результаты расчета исходной модельной железобетонной плиты перекрытия и после ее усиления ПКМ показали, что деформации в сжатой зоне бетона и растянутой арматуре существенно уменьшаются, а прочность по наклонным сечениям без поперечной арматуры возрастает на 22,3%. Прочность по предельному моменту сечения увеличивается более чем в 5 раз (коэффициент использования снижается с 5,926 до 1,166). Применение внешнего армирования плит перекрытия эпоксидными ПКМ повышает несущую способность и трещиностойкость плит перекрытия более чем в 2 раза.

Литература

1. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of finegrained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses // ZKG International. 2018. Vol. 71. Issue 5. Pp. 28-35.
2. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete // Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54. Issue 2. P. 63. DOI: 10.5862/MCE.54.7
3. Demyanova L.P., Zaeva A.S., Buinovskiy A.S. Influence of activation of quartz grain surface on efficiency of the process of processing the quartz sand grains with fluoride technology // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Vol. 47. Issue 6. Pp. 766-771. DOI: 10.1134/S0040579513040209
4. Mejdoub Roukaya, Hammi Halim, Khitouni Mohamed, Josep Sunol Joan, Mnif Adel. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 1041-1050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.008
5. Sobolev Konstantin, Lin Zhibin, Cao Yizheng, Sun Hongfang, Flores-Vivian Ismael, Rushing Todd et al. The influence of mechanical activation by vibromilling on the early-age hydration and strength development of cement // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 53-62. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.010
6. Mucsi Gabor, Racz Adam, Madai Viktor. Mechanical activation of cement in stirred media mill // Powder Technology. 2013. Vol. 235. Pp. 163-172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005
7. Sekulic Z., Petrov M., Zivanovic D. Mechanical activation of various cements // International Journal of Mineral Processing. 2004. Vol. 74. Pp. S355-

S363. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.07.022

8. Kosobudskii I.D., Gvozdev G.A., Fedorov F.S., Nikitina L.V., Zhimalov A.B., Bondareva L.N. et al. Mechanochemical activation of sand in the Ago-2 centrifugal-planetary mill // *Glass and Ceramics*. 2015. Vol. 72. Issue 5-6. Pp. 199-202. DOI: 10.1007/s10717-015-9755-x

9. Abdullah A., Alhozaimy A. Effect of various activation methods on the reactivity of ground dune sand as partial cement replacement // 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC). 2013. DOI: 10.1109/beiac.2013.6560134

10. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Гужеева О.Н. Регулирование электрических и реологических свойств гетерогенных систем на основе кварцевого песка и графита механической активацией кварцевого песка // *Вестник МГСУ*. 2016. № 8. С. 78-87. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.8.78-87

11. Fedosov S.V., Akulova M.V., Vzinovyeva E. Features of mechanical activation of the distilled water by different nozzles of the rotor agitator // *News of higher educational institutions. Ser.: Textile technology*. 2016. No. 1. Pp. 153 -157.

12. Gaevskaya S.A., Abzaev Yu.A., Safronov V.N., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Ermilova T.A. Effect of mixing water magnetic activation cycle on cement stone structure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899x/71/1/012013

13. Ермолаев Ю.М., Родионов Б.Н., Родионов Р.Б., Стехин А.А., Чистов Ю.Д. Повышение прочности пенобетона при использовании структурированной воды // *Технология бетонов*. 2006. № 2. С. 54-55.

14. Родионов Б.И., Родионова С.В., Стехин А.А., Яковлева Г.В. О релаксации свойств активированной воды и применении ее в строительстве // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2007. № 9 (104). С. 24-25.

15. Баженов Ю.М., Федосов С.В., Ерофеев В.Т., Матвиевский А.А., Митина Е.А., Емельянов Д.В. и др. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения. Саранск: Изд-

во Мордовского ун-та, 2011. 128 с.

16. Федосов С.В., Акулова М.В. Плазменная металлизация бетонов. М.: Изд-во АСВ, 2003. 122 с.
17. Науменко Н.Н., Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А., Подлозный Э.Д. Плазменное оплавление строительных композитов. М.: Изд-во АСВ; Иваново: ИГАСУ, 2009. 228 с.
18. Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Акулова М.В., Науменко Н.Н., Анисимова Н.К. Современные методы отделки стеновых строительных материалов. Иваново: ИГАСУ, 2012. 212 с.
19. Калядин А.Ю., Налбандян Г.В., Соловьев В.Г., Богданова А.А., Ушков В.А. Плазменная модификация компонентов строительных растворов - эффективный метод повышения их эксплуатационных свойств // Вестник МГСУ - 2019. - Том 14. - Выпуск 5 (128). - С. 548 - 558.
20. Nalbandyan G., Soloviev V., Ushkov V. Modification of components of fire-grained concretes by low-temperature nonequilibrium plasma // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 1841 – 1844.
21. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. - М.: Stroyizdat, 2007. - 184 p.
22. The code of rules SP 164.1325800.2014 Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules.
23. Shevtsov D.A. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials // Industrial and Civil Engineering. - 2014. - No. 8. - P. 61 - 65.
24. Tretyakova A.N., Balakirev A.A., Bykov A.A., Kalugin A.V. Determination of the bearing capacity of reinforced concrete flexible elements reinforced with composite materials // Industrial and Civil Engineering. - 2011. - No. 7. - with. - P. 18-21.
25. Esipov S.M. Analysis of design techniques for reinforcing reinforced concrete structures with composite materials // Bulletin of BSTU named after V.G.

Shukhov. - 2015. - No. 6 - P. 114 - 118.

26. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G, Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering // Journal Composite Structures. - 2019. – Vol. 214. – P. 246 – 263.

DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.002.

27. Nihad Tareq Khshain Al-Saadi, Alyaa Mohammed, Riadh Al-Mahaidi, Jay Sanjayan, A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures // Journal Construction and Building Materials. - 2019. – Vol. 209. - P. 748 – 769. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121.

28. Berardi V.P., Feo L. ,Mancusi G., De Piano M., Influence of reinforcement viscous properties on reliability of existing structuresstrengthened with externally bonded composites // Journal Composite Structures. - 2018. – Vol. 200. - P. 532 – 539. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.111.

DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.111.

References

1. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. ZKG International. 2018. Vol. 71. Issue 5. Pp. 28-35.

2. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54. Issue 2. P. 63. DOI: 10.5862/ MCE.54.7

3. Demyanova L.P., Zaeva A.S., Buinovskiy A.S. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Vol. 47. Issue 6. Pp. 766-771. DOI: 10.1134/S0040579513040209

4. Mejdoub Roukaya, Hammi Halim, Khitouni Mohamed, Josep Sunol Joan, Mnif Adel. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 1041-1050. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2017.07.008

5. Sobolev Konstantin, Lin Zhibin, Cao Yizheng, Sun Hongfang, Flores-Vivian Ismael. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 53-62. DOI: 10.1016/j.cemcon- comp.2016.04.010

6. Mucsi Gabor, Racz Adam, Madai Viktor. Powder Technology. 2013. Vol. 235. Pp. 163-172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005

7. Sekulic Z., Petrov M., Zivanovic D. International Journal of Mineral Processing. 2004. Vol. 74. Pp. S355-S363. DOI:10.1016/j.minpro.2004.07.022
8. Kosobudskii I.D., Gvozdev G.A., Fedorov F.S., Nikitina L.V., Zhimalov A.B., Bondareva L.N. et al. Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 5-6. Pp. 199-202. DOI: 10.1007/s10717- 015-9755-x
9. Abdullah A., Alhozaimy A. 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC). 2013. DOI:10.1109/beiac.2013.6560134
10. Lopanov A.N., Fanina E.A., Guzeeva O.N. Vestnik MGSU. 2016. № 8. pp. 78-87. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.8.78-87
11. Fedosov S.V., Akulova M.V., Vzinovyeva E. News of higher educational institutions. Ser.: Textile technology. 2016. № 1. Pp. 153 -157.
12. Gaevskaya S.A., Abzaev Yu.A., Safronov V.N., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Ermilova T.A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 71. P. 012013. DOI: 10.1088/1757899x/71/1/012013
13. Ermolaev YU.M., Rodionov B.N., Rodionov R.B., Stekhin A.A., CHistov YU.D. Tekhnologiya betonov. 2006. № 2. pp. 54-55.
14. Rodionov B.I., Rodionova S.V., Stekhin A.A., YAKovleva G.V. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2007. № 9 (104). pp. 24-25.
15. Bazhenov YU.M., Fedosov S.V., Erofeev V.T., Matvievskij A.A., Mitina E.A., Emel'yanov D.V. i dr. Cementnye kompozity na osnove magnitno - i elektrohimicheski aktivirovannoj vody zatvoreniya. [Cement composites based on magnetically and electrochemically activated mixing water]. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2011. 128 p.
16. Fedosov S.V., Akulova M.V. Plazmennaya metallizaciya betonov. [Plasma Concrete Metallization]. M.: Izd-vo ASV, 2003. 122 p.
17. Naumenko N.N., Fedosov S.V., Akulova M.V., SHCHepochkina YU.A., Podloznyj E.D. Plazmennoe oplavlenie stroitel'nyh kompozitov. [Plasma reflow of building composites]. M.: Izd-vo ASV; Ivanovo: IGASU, 2009. 228 p.
18. Fedosov S.V., SHCHepochkina YU.A., Akulova M.V., Naumenko N.N., Anisimova N.K. Sovremennye metody otdelki stenovyh stroitel'nyh materialov.

[Modern methods of finishing wall building materials]. Ivanovo: IGASU, 2012. 212 p.

19. Kalyadin A.YU., Nalbandyan G.V., Solov'ev V.G., Bogdanova A.A., Ushkov V.A. Vestnik MGSU, 2019. Tom 14. Vypusk 5 (128). pp. 548 - 558.

20. Nalbandyan G., Soloviev V., Ushkov V. Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. pp. 1841 – 1844.

21. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. M.: Stroyizdat, 2007. 184 p.

22. The code of rules SP 164.1325800.2014 Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules.

23. Shevtsov D.A. Industrial and Civil Engineering. 2014. № 8. pp. 61 - 65.

24. Tretyakova A.N., Balakirev A.A., Bykov A.A., Kalugin A.V. Industrial and Civil Engineering. 2011. № 7. pp. 18-21.

25. Esipov S.M. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. № 6. pp. 114 - 118.

26. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. Journal Composite Structures. 2019. Vol. 214. pp. 246 – 263. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.002.

27. Nihad Tareq Khshain Al-Saadi, Alyaa Mohammed, Riadh Al-Mahaidi, Jay Sanjayan Journal Construction and Building Materials. 2019. Vol. 209. pp. 748 – 769. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121.

28. Berardi V.P., Feo L., Mancusi G., De Piano M. Journal Composite Structures. 2018. Vol. 200. pp. 532 – 539. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.111.