

14. Response to Bridge Impacts – An Overview of State Practices. FHWA-HIF-20-087 / Federal Highway Administration. Office of Bridges and Structures. DC 20590. – September 2020. – 15 p.

15. A Study of U.S. Bridge Failures (1980-2012). MCEER-13-0008 / G. C. Lee [et al.] / University at Buffalo. – 2013. – 148 p.

УДК 624.26:666.97

## **ФИБРОБЕТОН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЗОЛОЙ ОТ СЖИГАНИЯ БУРОГО УГЛЯ БЕЛАРУСИ**

Г. Д. Ляхевич<sup>1)</sup>, И. И. Лиштван<sup>2)</sup>, В. А. Гречухин<sup>1)</sup>, А. В. Кулан<sup>1)</sup>,  
Е. Н. Савина<sup>1)</sup>, В. М. Дударчик<sup>2)</sup>, В. М. Крайко

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 146а, 220114, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2)</sup> Институт природопользования НАН Беларуси  
ул. Франциска Скарины, 10, 220076, г. Минск, Республика Беларусь

Одним из основных путей улучшения физико-механических свойств цементобетона является введение в бетонную смесь волокон, например, полипропиленовых волокон, модифицированных золой от сжигания бурого угля, микрокремнезема, суперпластификатора, при низком водоцементном отношении 0,28 - 0,35.

Факторы положительного влияния полипропиленовых волокон на структуру и физико-механические характеристики армобетона следующие: снижение общей пористости цементного камня при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция кремнеземом. Использование исследованных зол Республики Беларусь совместно с микрокремнеземом МК-85, суперпластификатором С-3 для производства мостовых и тоннельных конструкций будет способствовать решению важных задач:

- расширение сырьевой базы для изготовления строительных конструкций;
- уменьшение расхода цемента;
- обеспечение высоких физико-технических параметров армобетонов;
- обеспечение высокой долговечности и надежности мостовых и тоннельных конструкций, продолжительной эксплуатационной пригодности их и др.;
- обеспечение более длительного межремонтного периода;
- защиты окружающей среды от дисперсных зол, загрязняющих воздушный бассейн, землю, воду.

**Ключевые слова:** полипропиленовые волокна, зола, сжигание, бурый, уголь, Беларусь, микрокремнезем, суперпластификатор, цементобетон, физико-механические свойства, бетонные, железобетонные, мостовые, тоннельные, конструкции, эффективность использования.

### 1. Введение: теоретические аспекты.

Ранее нами и другими исследователями [1-26] показано, что дисперсное армирование волокнистой арматурой обеспечивает трехмерное упрочнение композитов и позволяет принципиально изменять свойства цементного камня и других видов искусственных композитов, повышая сопротивление ударным и динамическим нагрузкам, создавая необходимый запас прочности, сохраняя целостность конструкции, даже после появления сквозных трещин и др. Высокодисперсные волокнистые наполнители в цементных композициях оказывают положительное влияние на процессы структурообразования. Наличие границы раздела между армирующими элементами и цементной матрицей существенно повышает деформативные свойства материала.

В наших и в других работах [27-51] показано, что улучшение физико-механических свойств цементобетона может быть достигнуто путем введения в бетонную смесь различных добавок, и прежде всего, зол от сжигания твердого топлива. В мире ежегодно образуется более 390 млн. т зол, при этом объём их использования составляет менее 15% [27]. Бетонные смеси с золами обладают большей связностью, меньшим водоотделением и расслоением. Бетон имеет при этом большую прочность, плотность, водонепроницаемость, стойкость к сульфатной коррозии, меньшую теплопроводность.

Строение и состав зол зависит от целого комплекса одновременно действующих факторов: вида и морфологических особенностей сжигаемого топлива; тонкости помола в процессе его подготовки; зольности топлива; химического состава минеральной части топлива; температуры в зоне горения; времени пребывания частиц в этой зоне и др.

Одной из существенных характеристик золы как активной минеральной добавки в бетон является ее гидравлическая активность. Традиционными методами она определяется по способности зол поглощать известь из известкового раствора, а также проявлять вяжущие свойства в сочетании с гидратной известью.

Требования к золам, как к активным минеральным добавкам в бетонную смесь, обусловлены физико-химическим механизмом их влияния на процессы твердения и структурообразования бетона. Гидравлическая активность зол, как и других веществ пуццоланового типа, в значительной мере обусловлена химическим взаимодействием входящих в них оксидов кремния и алюминия с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе клинкерных минералов, с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Гидратации зол способствует их стекловидная фаза, кристаллическая фаза в этом процессе практически инертна. Химическая активность зол непосредственно связана также с их дисперсностью.

Зола представляет собой преимущественно силикатное стекло, слагающий его аморфный кремнезем химически активен по отношению к  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяющемуся при гидратации цемента (т.н. пуццоланическая активность). Реакция между ними приводит к образованию высокодисперсных гидросиликатов кальция (типа  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) с высокой связующей способностью взамен мало прочного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Кроме пуццоланического эффекта, зола оказывает на бетон и значительное физическое воздействие, которое принято называть «эффектом микронаполнителя». В чистом виде он проявляется в повышении прочности при введении в бетон инертных порошков, например, пылевидных отходов дробления. Его основой можно считать увеличение концентрации дисперсных частиц в цементном тесте, что вызывает снижение его пористости. Другой аспект этого эффекта проявляется в бетонных смесях с низким расходом цемента, где имеет место явный дефицит дисперсных частиц. Введение золы его ослабляет или ликвидирует, в итоге улучшается зерновой состав цементно-песчаной составляющей, уменьшается расслоение бетонной смеси и повышается однородность бетона. Следует отметить, что «стабилизирующая» роль золы возрастает в связи с тенденцией применения в монолитном строительстве все более подвижных смесей, с повышенной склонностью к расслоению.

При увеличении расхода цемента расслоение бетонной смеси снижается, но повышается тепловыделение твердеющего бетона, что может привести к образованию микротрещин уже на ранних стадиях твердения. Сокращение расхода цемента при введении золы снижает тепловыделение и вероятность образования термических микротрещин, что также улучшает структуру бетона. В массивном бетоне опасность микротрещин существенно возрастает, и положительная роль золы проявляется во всем диапазоне расхода цемента.

Существенный вклад в технологию использования зол в неорганических вяжущих, бетонных смесях, в механизм взаимодействия высокодисперсных наполнителей – зол с цементным камнем, установлении роли и влияния зол на физико-механические свойства бетона внесли научно-исследовательские учреждения и высшие учебные заведения, а также

целая плеяда замечательных ученых и практиков, как отечественных, так и зарубежных, таких как: И.А. Рыбьев, П.А. Ребиндер, А.В. Волженский, В.В. Бабков, В.С. Рамачандран, А.Г. Ольгинский, С.С. Каприелов, Ж.А. Ларби, Л. Опоски, Ж.М. Бижен, В.К. Власов, В.Е. Крекшин, И.М. Красный, М.С. Шендипа, А.Г. Комар, А.Г. Зоткин, И.Ю. Данилович, Е.Е. Бери, М. Мальхотра, Ю.М. Баженов, В.А. Выров, В.И. Соломатов и многие другие [30-40].

Положительному влиянию золы на структурообразование бетона способствует «эффект мелких порошков», расширяющих свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации, что ускоряет процесс твердения цемента [35-49]. Факторы, которые считаются основными при оценке влияния высокодисперсных наполнителей на свойства цементного камня и бетона связаны с физическим эффектом – «эффект микронаполнителя», либо с реакциями активных гидравлических составляющих. «Эффект микронаполнителя» проявляется в том, что мелкие частицы золы обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент. Пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, а микро наполняющий эффект – лишь при росте содержания дисперсных частиц в смеси. Но при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетонов, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня, вследствие, ухудшения сцепления наполненного цементного камня с заполнителем. Увеличение количества наполнителя выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности. При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента, или достижение максимального насыщения цемента наполнителем без образования контактов частиц наполнителя между собой, если частицы наполнителя и цемента соизмеримы. Экспериментальные данные на цементном тесте с добавкой 20% кремнеземистой пыли показали, что кремнеземистая пыль – побочный продукт производства ферросилиция ускоряет гидратацию портландцемента и шлакопортландцемента уже в первые часы после затворения. Изучено влияние высокодисперсной золы на свойства бетона. Введение в бетон добавки – высокодисперсной золы заметно влияет на его свойства. Рассматриваемая добавка снижает водопотребность бетонных смесей. При осадке конуса бетонных смесей, равной 165-210 мм, добавка высокодисперсной золы снижает расход суперпластификатора на 10%, расход воды на 8% по сравнению с бездобавочными бетонными смесями. Добавка высокодисперсной золы оказывает также положительное влияние на удобоукладываемость бетонных смесей. При этом с ростом количества золы снижается расход суперпластификатора (в отличие от микрокремнезёма, наличие которого бетонных смесях требует увеличения количества суперпластификатора). Исследования выявили также, что добавка высокодисперсной золы способствует повышению сульфатостойкости бетона (при использовании добавки в сочетании с высокоалюминатным цементом). Установлено, что при содержании в бетоне золы в количестве 8% от массы цемента он отличается высокой, а при содержании золы 12 и 16% – очень высокой сульфатостойкостью.

### **Экспериментальная часть**

Цель и задачи исследования

**Цель** – улучшить физико-технические свойства фибробетона путем модификации его золой от сжигания бурого угля Белоруси.

**Задачи исследования:** с использованием фундаментальных и специальных методов исследования изучить характеристику исходных, промежуточных и конечных материалов – золы, микрокремнезема, цемента, суперпластификатора, бетонных смесей. Показать возможность использования полипропиленовых волокон, золы от сжигания бурого угля

Беларуси, микрокремнезема МК-85 и суперпластификатора С-3 для получения бетона с повышенными физико-механическими свойствами.

#### **Экспериментальные исследования**

Для решения поставленной задачи были использованы: – цемент марки М-500 (ГОСТ 10178-85), ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЦ-Д0, с тонкостью помола 93,4%, истинной плотностью 3,1051 г/см<sup>3</sup>, величиной удельной поверхности 3048 см<sup>2</sup>/г, активностью 52,1 МПа.

– крупный заполнитель – щебень производства ГП «Гранит» (г.п. Микашевичи) с максимальной крупностью зерен 10 мм. Физико-механические свойства щебня: насыпная плотность 1514 кг/м<sup>3</sup>, плотность 2676 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение 1,37 мас. %, дробимость 5,4 %, содержание глинистых и пылеватых частиц 0,38 мас. %, влажность 0,32 мас. %. Марка щебня 1200, соответствует ГОСТ 8267;

– песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 6139-78, с модулем крупности –  $M_k = 2,12$ ; плотность 2586 кг/м<sup>3</sup>; влажность 0,25 мас. %; содержание глинистых и пылеватых частиц – 0,11 мас. %;

– для затворения бетонных смесей применялась водопроводная вода, которая отвечала требованиям СТБ 1114;

– стабилизированная зола от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения (Республика Беларусь); химический состав в мас. %: SiO<sub>2</sub> – 54,46; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 19,23; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,94;

CaO – 22,59; MgO – 0,14; MnO – 0,06; TiO<sub>2</sub> – 0,25; SO<sub>3</sub> – 0,21; потери при прокаливании – 0,56; влажность 0,41; остаток на сите 0,15. Необходимо отметить, что зола от сжигания бурых углей получена и изучена в лаборатории академика Лиштвана И.И. НАН Беларуси.

– микрокремнезём марки МК-85 (ТУ5743-048-02495332);

– суперпластификатор «по от сжигания липласт СП-1» – смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфоокислот различной молекулярной массы по ТУ 5870-005-58042865-05 с характеристикой: массовая доля сухих веществ – 63,6%; плотность при 20 °С – 1,2784 г/см<sup>3</sup>; показатель активности водородных ионов – 8,7;

– полипропиленовые фибры ВСМ-II-20/6 по ТУ 2272-006-1349727-2007. Диаметр фибр – 20 мкм, длина – 12 мм, прочность на разрыв – 364 МПа, температура размягчения – 169°С, химическая устойчивость – полная ко всем кислотам, щелочам, растворителям. Содержание фибр в бетоне составляло 2,4 кг/м<sup>3</sup>, плотность полипропилена – 0,92 г/см<sup>3</sup>.

#### **Технология приготовления бетонной смеси**

В соответствии с инструкцией стандарта ASTM C192 приготовление бетонной смеси осуществлялось следующим образом: первоначально в бетономешалку подавался щебень и 1/5 часть воды от расчетного количества. При вращении щебень равномерно увлажнялся водой, в этот момент добавлялся песок и перемешивание продолжалось. Полипропиленовая фибра предварительно обрабатывалась золой, затем смесь затворялась пластификатором и после полного распределения волокон смесь добавлялась в бетономешалку. После перемешивания в течение 6 мин. в бетономешалку вводились смесь цемента, микрокремнезёма, остаток воды и перемешивание продолжалось еще в течение 8 минут. Приготовленная бетонная смесь заливалась в формы и уплотнялась. Образцы изготовили в соответствии со стандартом ASTM C192 и АСІ [6]. Образцы в течение 24 часов выдерживались в металлической опалубке во влажной среде. Для набора проектной прочности бетона опытные образцы хранили в течение 28 суток в воде.

#### **Методы исследования**

Определение оксидов, исследуемых образцов золы проводили по ГОСТ 10538-87. Определение плотности, водопоглощения бетона осуществляли по ГОСТ 12730.1, ГОСТ 12730.3; а предела прочности при осевом сжатии, предела прочности при осевом растяжении бетонов, насыпной плотности, удельной поверхности, влажности цемента, зол и других высокодисперсных материалов по методикам, представленным в источниках [52-54]. Определение водонепроницаемости бетона осуществлялось по ГОСТ 12730.5

ускоренным методом. При определении водонепроницаемости бетона используют устройство типа "Агама-2Р", в котором герметизирующая мастика удовлетворяет ГОСТ 14791.

#### Составы бетонных смесей

В таблице указаны материалы и их содержание, необходимые для приготовления образцов высокопрочного бетона.

Анализ данных таблицы показывает, что увеличение содержания золы от сжигания бурых углей от 12 до 22 мас. % (см. составы 1-5 таблица 1), способствует улучшению пределу прочности при осевом сжатии, предел прочности на растяжение при изгибе водонепроницаемости бетонов: так марки по водонепроницаемости заявляемых бетонов были W4 – W23 против W3 для контрольного состава.

Таблица 1. Составы смесей и физико-механические показатели армобетонов, содержащих золу от сжигания бурого угля Беларуси

Наименование	Номер состава					
	1	2	3	4	5	6
Составы бетонных смесей, мас. %:						
щебень	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2
песок	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
цемент ПЦ-Д0	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9	25,9
вода	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Добавки в % от массы цемента						
полипропиленовая фибра	-	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
зола	-	12	16	20	22	24
микрокремнезем МК-85	-	6	6	6	6	6
суперпластификатор С-3	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6
Физико-механические показатели образцов бетона						
плотность, кг/м <sup>3</sup>	2248	2337	2342	2356	2354	2353
предел прочности при осевом сжатии, МПа	58	84	92	113	95	86
предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	4,8	10,3	11,7	12,5	10,4	8,5
марка по водонепроницаемости	W 4	W10	W 14	W 18	W 12	W8

Экспериментальные данные показывают, что увеличение количества наполнителя выше оптимального (см. состав 5, таблица 1) приводит к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера. При 12-22% золы в бетоне (см. составы 2 – 5, таблица) структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента. В смешанной системе цемента с дисперсным материалом важно, чтобы частицы золы способствовали образованию контактов срастания между кристаллогидратами и полипропиленовыми волокнами. Это условие может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации дисперсного материала в смешанной системе с учетом гидравлической активности микронаполнителя. Для инертного микронаполнителя оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотнения структуры. Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от

гидравлической активности дисперсного материала. Однако увеличение дозировки сверх объема указанных пор в зависимости от гидравлической активности может привести к противоположным результатам, т.е. ухудшению физико-механических показателей армобетона (см. состав 6, таблица). Таким образом для исследуемого бетона оптимальное количество высокодисперсной золы составляет 12-22 мас. % от цемента.

### **Заключение**

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что благодаря модификации полипропиленовых волокон, золой от сжигания бурых углей достигнуты различные технологические и экономические эффекты при изготовлении бетонов. Модифицирующий эффект проявился в повышении прочности, что способствует долговечности бетона. Эффективность применения ППВ, модифицированных золой, определяли сравнением показателей качества контрольного образца бетона и исследуемых образцов армобетона, а также способностью модифицированных волокон принимать участие в структурообразовательных процессах, оценки их влияния на физико-механические характеристики армобетонов. Наряду с основным положительным эффектом армирования цементного камня полипропиленовыми волокнами и золой от сжигания бурых углей, определяли наличие положительных эффектов, например, ускорение процесса твердения. Эффективность применения полипропиленовых волокон, высокодисперсных зол основана на модифицирующем, армирующем и уплотняющем действии их на цементный камень.

### **Литература**

1. Ляхевич Г.Д. Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность использования высокопрочных бетонов для мостовых конструкций. / Ляхевич Г.Д., Звонник С.А., Ляхевич А.Г., Альаззави Аюб Басим Абдулхуссейн // "Наука и техника". – Минск: БНТУ, 2014, N5. – С. 48-54.
2. Теоретические аспекты создания фибробетона для мостовых и тоннельных конструкций метрополитена / Ляхевич Г.Д., Гречухин В.А. // Материалы 17-й международной научно-технической конференции (72-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). - Минск: БНТУ, 2019. - С. 39.
3. Шепелевич Н.И. О дисперсном армировании бетонных безнапорных труб с использованием фиброволокна из полипропилена. / Шепелевич Н.И. - Минск: Ин-т БелНИИС. Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС. – 2014. – Вып. 6. – С. 459-467.
4. Ляхевич Г.Д., Физико-механические свойства высокопрочного бетона, армированного полипропиленовыми волокнами / Ляхевич Г.Д., Гречухин В.А., Мотамеди Сайед // Сборник научных трудов, Проблемы современного бетона и железобетона, Выпуск 12. - Минск: «Колорград», 2020. -132 – 152 с.
5. Ляхевич Г.Д., Звонник С.А., Волкович А.А., Андреева А.А. Влияние высокодисперсной добавки на активность цемента // Материалы девятой междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике». – Мн.: Технопринт, 2012. - Т.3. – С. 159.
6. Урецкая Е.А. Сухие строительные смеси: материалы и технологии / Е.А. Урецкая, Э.И. Батяновский. – Минск: НПООО «Стринко», 2001. – 208 с.
7. Органические добавки в бетон [Электронный ресурс] / Экология на предприятии. – Минск, 2015. – Режим доступа: [http://ecologia.by/number/2011/2/\\_ispolzovanie\\_dobavok\\_v\\_betonk](http://ecologia.by/number/2011/2/_ispolzovanie_dobavok_v_betonk). – Дата доступа: 24.03.2015.
8. Hertz, K.A. Heat Induced Explosion of Dense Concretes / K.A. Hertz. – Report No. 166. – Copenhagen: Institute of Building Design, Technical University of Denmark, 1984. – pp 128.

9. Hertz, K.A. Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures / K.A. Hertz. – Copenhagen: ACI Spring Convention, Beton, 1991. – 200 pp.
10. Diederichs, U.L. Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures / U.L. Diederichs, U.M. Jumppanen, V.A. Penttala. – Helsinki: IABSE 13th Congress, 1988. – 150 pp.
11. Castillo, C.C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C.C. Castillo, A. J. Durrani. – Rome: ACI Material Journal, 1990. – 47-53 pp.
12. Felicetti, R.B. Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles / R.B. Felicetti, P.G. Gambarova, G.P. Rosati. – Paris: Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-performance Concrete, 1996. – 250 pp.
13. Phan, L.T. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures / L.T. Phan, N.J. Carino. – London: ACI Materials Journal, 2002. – 54-66 pp.
14. Han, C.G. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement / C.G. Han, Y.S. Hwanga, S.H. Yangb. – New York: Cement and Concrete Research, 2004. – 1747-1753 pp.
15. Behnood, A.H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures / A.H. Behnood, H.C. Ziari. – Paris: Cement & Concrete Composites, 2008. – 106-112 pp.
16. Sahmaran, M.N. Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites / M.N. Sahmaran, M.R. Lachemi, V.C. Li. – Tehran: ACI Materials Journal, 2010. – 297-304 pp.
17. Применение добавок в бетоны [Электронный ресурс]/ Эффективность применения волокнистых добавок в бетон. – Минск, 2014. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2008/02/sn80215.html>. – Дата доступа: 03.04.2014.
18. Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity: BS EN 14889-1:2006. – Publication Date 29.09.06. – The European Committee for Standardization: BSI, 2006 – 30 pp.
19. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C116 / C116-03. – Publication Date 10.05.08. – ASTM International: West Conshohocken, 2008 – 22 pp.
20. Корнеев В.И. Сухие строительные смеси (состав, свойства, применение): учеб. пособие / В.И. Корнеев, П.В. Зозуля, И.Н. Медведева. – М.: СПбГТИ (ТУ), 2008. – 319 с.
21. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов / И.А. Рыбьев. – М.: Высш.шк., 2002. – 701 с.
22. Родионов, Р.Б. Перспективы применения волластонита в строительной отрасли. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. №4 / Р.Б. Родионов – М.: Высш.шк., 2009. – 44-45 с.
23. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
24. Пухаренко, Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю.В. Пухаренко. – М.: Строительные материалы №10, 2004. – 47-50 с.
25. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory: ASTM C192 / C192M-14. – Publication Date 01.01.14. – ASTM International: West Conshohocken, 2014 – 25 pp.
26. Иранское научное издание [Электронный ресурс] / Строительство Ирана. – Тегеран, 2009. – Режим доступа: <http://www.sedika.ir/articles-info>. – Дата доступа: 15.05.2012.
27. Геополимербетон с золой уноса. [Электрон. ресурс]/Строительный мир. – 11.01.2006. – Режим доступа: <http://www.stroinauka.ru/d19dr5492m2.html>.

28. Ляхевич Г.Д. Инновационная технология получения бетона, содержащего золу от сжигания твердого топлива. / Ляхевич Г.Д., Ортнер Д.В. // *Материалы РНТК.* – Минск.: БНТУ, 2014, – С. 63-67.
29. Ляхевич Г.Д. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементобетоне. / Ляхевич Г.Д., Ляхевич А.Г., Ортнер Д.В. // «Наука и техника». – Минск.: БНТУ, 2015, № 2. – С. 16-23.
30. Лиштван И.И. Утилизация зольных отходов сжигания торфо-древесного и торфяного топлива с получением материалов строительного назначения. / Лиштван И.И., Ляхевич Г.Д., Дударчик В.М., Крайко В.М., Ануфриева Е.В., Смолячкова Е.А. // IV Международная научная Экологическая Конференция на тему: «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства». – Краснодар. – Кубанский госагроуниверситет, 2015. – Ч. I. – 805 с.; Ч. II. – 519-524 с.
31. Ляхевич Г. Д., Лиштван И.И., Ляхевич А.Г., Дударчик В.М., Крайко В.М., Звонник С.А. Технология и эффективность использования золы бурых углей Лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях. // *Наука и техника.* – Мн.: БНТУ, Том 16, 2017, N2. – С. 104-112.
32. Геополимербетон с золой уноса. [Электрон. ресурс]/*Строительный мир.* - 11.01.2006. – Режим доступа: <http://www.stroinauka.ru/d19dr5492m2.html>
33. Волженский А.В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. / А.В. Волженский, И.А. Иванов, Б.Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1984. – 247 с.
34. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
35. Баженов Ю.М. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин // *Изв. вузов. Строительство.* 1996. – № 7. – С. 55-58.
36. Рамачандран В.С и др. Добавки в бетон: Справ. Пособие / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.Коллепарди и др.; Под ред. В.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – С. 168-184.
37. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // *Бетон и железобетон.* – 1993. – №4. – С.10-12.
38. Власов В.К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя // *Бетон и железобетон.* –1988. – №10. – С.9-11.
39. Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", 22-29 July, 2001, Chennai (Madras), INDIA. Editor V.M. Malhotra, Volume 2, pp.815-834, 2001 // Printed in USA, ACI, Farmington Hills, Michigan, SP 199-47.
40. Berry E.E., Malhotra V.M. Fly Ash for Use in Concrete – A Critical Review // *ACI Journal.* – 1982. – V2. – №3. – pp. 59-73.
41. Composite Cementless Binder From Mechanical Active Industrial Wastes Text. / Yu.M. Bazhenov, U.Kh. Magdejev, S.I. Pavlenko, N.M. Kulagin, A.V. Aksenov, V.V. Tkachenko, N.L. Dobretsov, N.Z. Lyakhov, E.G. Avvakumov Proceedings of the 5 International Symposium on the Cement and Concrete Shanghai, China, Oct. 28Nov. 1, 2002. pp. 832-840.
42. Feng Nai-Qian, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu. High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture // *Cem., Concr., and Aggreg.* – 1990. – V12. – №2. –pp. 61-69.
43. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems // *Cem. and Concr. Res.* –1990. – V20. – №5. – pp. 783-794.
44. Malhotra, V.M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and case Histories Text. / V.M. Malhotra, P.K. Mehta -Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd., 2002. - pp. 101



45. Sarcar Shondeep L., Diatta Yaya, Autcin Pierre-Claude. Microstructural study of aggregate /hydrated paste interface in very high strength rivet gravel concretes //Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec.2-4, 1987. – Pittsburgh. –1988. – pp.111-116.
46. Xu Ziyi, Liu Linzhy. Research on superfineflyashactivity// Proc.Beijing Int. Symp. Cem. and Concr., Beijing, May 14-17, 1985. Vol.1. –Beijing. – 1986. – pp.493-507.
47. Sarkar Shendeep L. Mikrostruktura of a very low water/cement silica fume concrete //Microscope –1990. – V38. – №2. – pp.141-152.
48. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связей в технологии бетонов / Бабков В.В., Каримов И.Ш., Комохов П.Г. //Известия ВУЗов. Стр-во. – 1996. – №4. –С.41-48.
49. Зоткин А.Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне // Бетон и железобетон. – 1994. – №3. – С.7-9.
- Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – №6. – С.16-20.
50. Красный И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей //Бетон и железобетон. – 1987. – №5. – С.10-11.
51. Леонович И.И. Испытание дорожно-строительных материалов / И.И Леонович, В.А. Стрижевский, К.Ф. Шумчик. - Минск: «Высшая школа», – 1991. - 232 с.
52. Попов Л.Н. Лабораторный контроль строительных материалов и изделий /Л.Н. Попов. Справочник. - М.: Стройиздат, 1986. - 349с.
53. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В Тимашев, В.Г. Савельев. - М.: Высш. шк., 1981. – 333 с.

УДК 669.14.018.29:620179.13

## **ТЕПЛОЙ КОНТРОЛЬ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ**

Е. А. Мойсейчик<sup>1)</sup>, С. Д. Шафрай<sup>2)</sup>, А. Е. Мойсейчик<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет,

пр. Независимости, 146а, 220114, г. Минск, Беларусь, [emoisseitchik@mail.ru](mailto:emoisseitchik@mail.ru)

<sup>2)</sup> Новосибирский государственный университет архитектуры дизайна и искусств,

Красный пр-т, д. 38, 630099, г. Новосибирск, Россия

Приведены характеристики наиболее вероятных зон расположения дефектов в мостовых пролетных строениях из стали. Рассмотрены часто используемые на практике приемы выявления трещиноподобных дефектов в стальных элементах мостов. Показано, что более эффективными методами выявления дефектов могут быть тепловые методы, основанные на анализе инфракрасного излучения с поверхности исследуемых элементов. Рассмотрены достоинства и недостатки теплового контроля трещин и приведены рекомендации по его применению в пролетных строениях мостов.

**Ключевые слова:** тепловой контроль, мосты, стальные элементы, повреждения, выявление.

При эксплуатации стальных мостовых конструкций обращают пристальное внимание на развитие повреждений конструкций, дефекты в металле элементов, в заклепочных, болтовых, сварных соединениях (коррозия, трещины, различные повреждения соединений, расслаивание металла, «распучивание» клепанных листовых пакетов и сдвоенных элементов), на проверку состояния элементов конструкций (искривленных, деформированных с потерей устойчивости и др.). Особое внимание уделяют местам, в которых наиболее вероятно появление трещин.