САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Р.С. Федюк, А.В. Мочалов¹, Д.Н. Пезин¹, Р.А. Тимохин¹

*¹Дальневосточный федеральный университет, Россия,
г. Владивосток*

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка эффективных самоуплотняющихся бетонов является актуальной задачей для строительного материаловедения. Успешной реализацией задачи может служить применение золы рисовой шелухи в качестве альтернативного материала при производстве бетонов. Целью исследования было изучение влияния минерального наномодификатора на свойства самоуплотняющегося бетона.

Материалы и методы. Минеральный наномодификатор был разработан с применением портландцемента, золы рисовой шелухи и кварцевой муки, совместно помолотых до удельной поверхности 500-900 м²/кг. Суперпластификатор «ХИДЕТАЛ» использовался для снижения водоцементного отношения. Свойства смеси были протестированы на реологические характеристики. Плотность образцов измеряли методом Архимеда. Исследование микроструктуры бетона проводилось электронной микроскопией. Прочность на сжатие образцов была получена в возрасте 7 и 28 дней.

Результаты. Наиболее эффективная тонкость помола наномодификатора – 550 м²/кг. Максимальный прирост прочности и лучшие реологические характеристики в сравнении с чистым тонкомолотым портландцементом достигаются введением наномодификатора в количестве 10,5 %. Однако, по разбросу модуля упругости образцов не прослеживается зависимость от количества наномодификатора. Модуль упругости самоуплотняющегося бетона в первую очередь зависит от количества крупного заполнителя. Пуццолановая реакция способствует увеличению прочности на сжатие бетона в позднем возрасте путем улучшения межфазной связи между цементным тестом и заполнителем.

Обсуждение и заключения. Отходы растениеводства обладают потенциалом для использования в качестве замены портландцемента в самоуплотняющемся бетоне, сохраняющем механические и эксплуатационные характеристики бетонной смеси и готового бетона. Площадь удельной поверхности золы была увеличена механохимической активацией. Включение золы привело к снижению удобоукладываемости бетона, однако с помощью дополнительного суперпластификатора данные свойства для всех образцов были выровнены. Увеличение содержания наномодификатора привело к снижению ранних физико-механических свойств, тогда как конечная прочность самоуплотняющегося бетона, содержащего наномодификатор, была сопоставима с обычными образцами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. цементный камень, композиционное вяжущее, нанодисперсная добавка, самоуплотняющийся бетон, зола рисовой шелухи, пуццолановые материалы, свойства бетонной смеси, механические свойства, удобоукладываемость.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем благодарность за ценные консультации д.т.н., проф. Лесовику В.С. Также выражаем благодарность анонимным рецензентам этой статьи.

ВВЕДЕНИЕ

Самоуплотняющийся бетон (СУБ) характеризуется тем, что под собственным весом дисперсно-армированная бетонная смесь полностью заполняет опалубку без необходимости внешнего уплотнения. Сопротивление расслоению и адаптивность позволяют СУБ оставаться однородным и сохранять стабиль-

ные характеристики. Самоуплотняющийся бетон в основном характеризуется замечательной удобоукладываемостью бетонной смеси. Сокращение трудозатрат и время строительства, улучшение качества готовой поверхности делают самоуплотняющийся бетон лучше обычного бетона. Тем не менее, производство самоуплотняющегося бетона с высокой удо-

боукладываемостью и требуемой прочностью требует большего количества цемента и добавления дорогостоящих химических примесей для уменьшения количества водо-вяжущего отношения, что приводит к увеличению стоимости самоуплотняющегося бетона. Кроме того, при производстве происходит больше выбросов углекислого газа по сравнению с технологией производства обычного бетона. А также, более высокий расход портландцемента в смеси СУБ приводит к увеличению энергии гидратации и высокой аутогенной усадке [1].

Добавление пуццолановых материалов ведет к экономии энергозатрат и материалов, экономической эффективности, долговечности, увеличению производительности рабочих мест [2]. Кроме того, достигаются лучшие эксплуатационные характеристики бетона за счет снижения энергии гидратации и аутогенной усадки. Вдобавок к этому, с точки зрения экологических соображений снижение расхода цемента приводит к экономии энергии и ресурсов, а также к существенному сокращению выбросов парниковых газов [3–4].

Чулкова И.Л. занималась вопросами повышения эффективности строительных композитов с использованием техногенного сырья регулированием процессов структурообразования [5]. Предложен и реализован системный подход к проблеме регулирования и повышения эффективности строительных композитов на основе техногенного сырья, путем варьирования состава и гранулометрии вяжущих и минеральных добавок, электролитов, органических модификаторов и др. факторов. При этом в качестве элементов системного анализа приняты минеральный и гранулометрический состав цементов, минеральных добавок, неорганических и органических добавок, содержание пор различного размера, в том числе нанопор и т.д.

Казлитина О.В. [6] разработала фибробетон для монолитного строительства. В ходе работы было установлено, что домол цемента с пластифицирующей добавкой до удельной поверхности 600 м²/кг, а также с использованием нанодисперсного порошка ($S_{уд}=160000$ м²/кг), полученного из гидротермальных источников вулканогенных областей позволяет получить вяжущее активностью 120 МПа. Нанодисперсный порошок вводится в количестве 0,01 %, что ускоряет процесс синтеза новообразований, связывая выделяющиеся при гидратации алита СаО в гидросиликаты различной основности.

S. Chithra (Индия) исследовал влияние коллоидного нано-кремнезема на удобоукладываемость, механические и долговечные свойства высокоэффективного бетона с медным шлаком в виде мелкозернистого заполнителя [7]. Результаты показывают, что коллоидный нанокремнезем действует как наполнитель, который улучшает микроструктуру, а также активатор для стимуляции пуццоланового действием.

Коллектив испанских ученых (M. Sánchez, M.C. Alonso, R. González) занимался уплотнением схватившегося раствора путем управлением миграцией коллоидного нанокремнезема за счет электрохимической обработки [8].

Средневосточный технический университет (Анкара, Турция) разработал гибридный самоуплотняющийся бетон с крупнозернистой золой уноса, которая не соответствует требованиям к тонкости ASTM C 618. Результаты показали, что крупнозернистая зола может быть использована для производства самоуплотняющегося бетона, армированного волокнами, однако, отмечается некоторое снижение прочности бетона. [9,10].

В мире ежегодно образуется почти сто миллионов тонн обычной рисовой шелухи, являющейся прекрасным сырьём – дешёвым, возобновляемым, с химическим составом, постоянным для данного региона и сорта растения, пригодным для получения около 15 миллионов тонн чистого аморфного кремнезёма. В частности по данным проф. Л. Земнуховой, из 1 тонны рисовой шелухи возможно получить от 120 до 200 кг кремнезёма с содержанием SiO₂ от 90 до 99,999%. Кроме того, с позиций защиты окружающей среды, утилизация отходов является одной из приоритетных задач. Успешной реализацией этой задачи может служить применение золы рисовой шелухи (ЗРШ) в качестве альтернативного материала при производстве бетонов [11-12].

Поэтому обилие ЗРШ, сопряженное с большим содержанием в них SiO₂, открывает путь для ее использования в качестве частичной замены портландцемента и разработки бетона с высокими физико-механическими характеристиками [13]. В частности, добавка ЗРШ улучшает прочность бетона, из-за увеличения количества CSH геля в процессе гидратации с течением времени. Однако, насколько известно авторам, использование ЗРШ в качестве пуццоланового материала в качестве частичной замены портландцемента не было широко исследовано в самоуплотняющемся бетоне. Учитывая агломерацию частиц и присущие им

высокие требования к водопотреблению при добавлении ЗРШ, ожидается, что ее включение в самоуплотняющийся бетон на основе портландцемента уменьшит жесткость смеси и, следовательно, будет оказывать неблагоприятное воздействие на свойства матрицы схватывающегося бетона.

Таким образом, целью данного исследования было изучение влияния минерального наномодификатора (МН) на свойства самоуплотняющегося бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Минеральный наномодификатор был разработан с применением портландцемента, золы рисовой шелухи и кварцевой муки, взятых в равных пропорциях.

Для образцов применялся Спасский товарный цемент марки ЦЕМ I 42,5Н. Химический состав цемента, определенный методом рентгенофазового анализа приведен в таблице 1. Соотношение содержания основных компонентов представленного образца цемента указывает на его соответствие ГОСТ 31108-2003.

Рисунок 1 – Микрофотографии образцов аморфного кремнезема, полученных из рисовой шелухи
Figure 1 – Microphotographs of amorphous silica samples obtained from rice husk

Таблица 1
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СПАССКОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Table 1
CHEMICAL COMPOSITION OF THE SPASSKY PORTLANDCEMENT

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO _{св}	п п п
66,2-67	20,2-20,9	6,0-6,7	3,5-4,0	1,4-2,0	До 1,2	0,18

Таблица 2
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ЕЕ ЗОЛЫ [14]

Table 2
CHEMICAL COMPOSITION OF RICE HUSK AND ITS ASH [14]

Сырье	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	п п п
Шелуха	0,61	15,64	0,24	0,12	0,45	0,18	0,48	0,28	82
Зола	3,36	85,48	1,33	0,64	1,93	0,45	2,09	1,57	1,68

Таблица 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ПЕСКА

Table 3
DETERMINATION OF THE GRAIN COMPOSITION OF SAND

№ пробы	Содержание грубозернистых примесей, %		Остатки на ситах, %	Гранулометрический состав Размеры сит, мм						Модуль крупности
	св. 10 мм	св 5 мм		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,15	
1	-	-	частные	-	0,5	11,5	62,0	23,5	2,5	1,8
			полные	-	0,5	12,0	74,0	97,5	100	
2	-	-	частные	2,0	6,5	34,5	41,5	13,0	2,5	2,4
			полные	2,0	8,5	43,0	84,5	97,5	100

Рисунок 2 – Распределение частиц по размерам для доизмельченной золы и портландцемента
Figure 2 – Particle size distribution for pre-ground ash and Portland cement

В качестве компонента минерального наномодификатора применялась зола рисовых растений, выращенных в Ханкайском районе Приморского края (табл. 2).

Микрофотографии образцов аморфного кремнезема, полученных из рисовой шелухи, приведены на рис 1. Видно, что в случае кислотного гидролиза сырья с последующим прокаливанием, полученный кремнезем в некоторой степени сохраняет структуру растительных тканей. Образец состоит из частиц размером до 300 мкм, поверхность которых повторяет рельеф плодовой оболочки. На разломе этих частиц при большем увеличении видно, что их толща не монолитная, а состоит из тонких ажурных структур с толщиной элементов 1 мкм и менее [15].

На рисунке 2 приведено распределение частиц по размерам для доизмельченной золы и портландцемента.

В качестве инертного наполнителя применялась кварцевая мука SILVERBOND (Раменский горно-обогатительный комбинат). SILVERBOND полностью инертен, pH нейтрален и поэтому не будет изменяться или вступать в реакцию при введении в катализированные или многокомпонентные химические системы, а также не будет разрушаться при

Рисунок 3 – Микроструктура кварцевой муки
Figure 3 – Microstructure of quartz flour

воздействию экстремальных температур или агрессивных сред. Микроструктура кварцевой муки приведена на рисунке 3.

Минеральный наномодификатор готовился совместным помолом портландцемента, золы рисовой шелухи и кварцевого микронаполни-

Рисунок 4 – Определение осадки конуса: а – для обычной бетонной смеси;
б – для самоуплотняющейся бетонной смеси
Figure 4 – Determination of the slump: a – for a typical concrete mix;
b – for self-compacting concrete

теля до различной удельной поверхности от 500 до 900 м²/кг.

В качестве мелкого заполнителя применялся песок Раздольненского месторождения, зерновой состав которого приведен в табл. 3.

По зерновому составу и значению модуля крупности песок № 1 относится к очень мелким, кроме того, имеет повышенное содержание пылевидных примесей, поэтому применение данного вида песка экономически невыгодно. Песок №2 относится к средним пескам и удовлетворяет по всем показателям требованиям ГОСТ 8735–88. Поэтому для дальнейших исследований применялся песок № 2.

Суперпластификатор «ХИДЕТАЛ-ГП-9 альфа А» (СКТ-Стандарт, Россия) использовался в самоуплотняющемся бетоне для снижения водоцементного отношения.

Свойства бетонной смеси были протестированы в соответствии с [16–18] для удобоукладываемости и сопротивления расслоению после смешивания. Первоначально смеси исследовались на осадку конуса за 50 секунд (рис. 4)

Если оба теста соответствуют стандартным требованиям, то смеси будут подвергаться тестам V-funnel, L-box, U-box и тесту на расслаиваемость с использованием Static Segregation Column Mold– HC-3666.

Прочностные характеристики бетонной смеси определялись сразу же после смешивания. Затем из бетонной смеси заформова-

ли кубы с ребром 100 мм и призмы 100 x 100 x 500 мм в два слоя по 5 см каждый. Бетонная смесь заполняла формы под собственным весом, без дополнительного уплотнения. Затем верхнюю поверхность образцов сглаживали и выравнивали вручную. После заливки все образцы выдерживались в течение 24 ч в условиях окружающей среды. Затем образцы вынимались из формы и выдерживались в воде при 25±3°C до дня тестирования.

Объемную плотность конечных образцов измеряли с использованием метода Архимеда. Для наблюдения влияния содержания минерального наномодификатора на микроструктуру самоуплотняющегося бетона были получены снимки электронной микроскопии (FESEM Carl Zeiss CrossBeam 1540XB). Прочность на сжатие образцов была получена на 100 мм кубках в возрасте 7 и 28 дней. Все механические тесты были выполнены с использованием Servo-hydraulic Fatigue and Endurance Tester Shimadzu Servopulser U-типа с максимальной нагрузкой 200 кН в соответствии с BS EN 12390-3:2002.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Составы разработанных бетонных смесей приведены в таблице 4.

С целью определения максимальной эффективности действия МН на цементный камень было произведено двухфакторное варьирование: первый фактор - оптимальная

Таблица 4
СОСТАВЫ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ (В КГ НА 1 М³ СМЕСИ)
Table 4
COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES (KG PER 1 M³ MIXTURE)

№ п/п	Цемент	Наномодификатор	Песок	Суперпластификатор	Вода
1	336	0	1648	3,9	170
2	331,5	4,5	1648	3,9	170
3	327	9	1648	4,0	170
4	322,5	13,5	1648	4,0	170
5	318	18	1648	4,1	170
6	313,5	22,5	1648	4,1	170
7	309	27	1648	4,2	170
8	304,5	31,5	1648	4,2	170
9	300	36	1648	4,3	170

Рисунок 5 – Зависимость прочности на сжатие от количества введенного ОНМ
Figure 5 – Dependence of compressive strength on the amount of injected ONM

дозировка (0-12%), второй фактор – тонкость помола (500 – 900 м²/кг). В качестве контрольного образца выступал чистый цементный камень.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее эффективная тонкость помола наномодификатора – 550 м²/кг. Дальнейшее увеличение тонкости помола, судя по рис. 5, оказывает отрицательное влияние на структу-

рообразование и не приводит к росту прочности. Максимальный прирост прочности порядка 25 % в сравнении с чистым тонкомолотым портландцементом достигается при введении наномодификатора в количестве 10,5 %. Дальнейшее увеличение содержания добавки в системе приводит к сбросу прочности, что обусловлено разбавлением системы, а также увеличением водопотребности смеси.

Таблица 5
СВОЙСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ
Table 5
PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURE

Кол-во введенного МН, %	Неограниченная текучесть			Ограниченная текучесть		Стабильность Тест на расплаиваемость (%)
	Осадка конуса (мм)	Осадка конуса (Т _{50см})	V-funnel тест (с)	U-box H ₂ -H ₁ (мм)	L-box H ₂ /H ₁	
0	710	3	6,1	3	0,97	6,7
1,5	680	4,25	8,7	14	0,88	10,9
3	700	3	6,5	6	0,93	8,8
4,5	690	4,16	8,5	12	0,89	10,7
6	700	3	6,5	6	0,93	8,8
7,5	700	4,10	8,3	10	0,90	10,5
9	710	4,05	8,2	9	0,91	10,3
10,5	730	3	6,0	3	0,98	6,3
12	670	4,55	8,7	20	0,84	13,8

Таблица 6
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА
Table 6
MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Кол-во введенного МН, %	Предел прочности при сжатии (7 дней), МПа	Предел прочности при сжатии (28 дней), МПа	Призменная прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа
0	36,1	48,2	38,0	27,2
1,5	35,6	49,3	38,9	26,1
3	37,0	50,0	40,2	26,2
4,5	37,4	52,2	41,0	25,6
6	34,6	55,5	37,0	27,8
7,5	35,2	58,2	38,0	32,3
9	35,6	60,9	38,9	33,6
10,5	36,3	64,2	40,0	32,3
12	33,1	62,1	36,3	34,5

Для снижения водоцементного отношения в самоуплотняющемся бетоне применялся суперпластификатор «ХИДЕТАЛ-ГП-9 альфа А» в количестве 1,1-1,4% от массы цемента. Результаты исследований свойств бетонной смеси приведены в табл. 5.

Для определения параметров неограниченной текучести все бетонные смеси были спроектированы таким образом, чтобы иметь осадку конуса среднего диаметра 680 ± 30 мм, который был достигнут за счет использования различных величин суперпластификатора. Наилучшие реологические характеристики были выявлены в бетонной смеси с введенным МН в количестве 10,5%.

Прочностные характеристики определялись в возрасте 7 и 28 суток (табл. 6).

Прочность на сжатие для образца с введенным МН в количестве 10,5% показывает наи-

лучшие характеристики. Однако, по разбросу модуля упругости образцов не прослеживается зависимость от количества введенного органо-минерального наномодификатора. Очевидно, что модуль упругости самоуплотняющегося бетона в первую очередь зависит от количества крупного заполнителя, что было выявлено ранее [19, 20].

Как правило, процесс гидратации композиционного вяжущего можно разделить на две основные стадии [21,22]. Первая стадия в основном связана с реакцией цемента и воды; вторая стадия связана с пуццолановой активностью золы с новообразованиями портландита от гидратации цемента. В результате реакции алита и воды образуется C-S-H гель и портландит. Поскольку упрочнение геля C-S-H является основным фактором увеличения прочности бетона, уменьшение содержания

а

б

Рисунок 6 – Микрофотографии цементного камня без добавок (а) и цементного камня с заменой 10,5% цемента золой рисовой шелухи (б)
Figure 6 – Microphotographs of cement stone without additives (a) and cement stone with replacing 10,5% of cement by rice husk ash (b)

портландцемента привело к снижению прочности бетона. Между тем, аморфный диоксид кремния (зола рисовой шелухи) способен реагировать с портландитом и генерирует вторичный гель C-S-H (рис. 6).

Поэтому упрочнение бетона происходит на более позднем этапе по сравнению с цементным бетоном. С другой стороны, пуццолановая реакция в основном способствует увеличению прочности на сжатие бетона в более позднем возрасте путем улучшения межфазной связи между цементным тестом и заполнителем. Кроме того, мельчайшие частицы золы улучшают прочность бетона, заполняя промежутки между частицами цемента.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Таким образом, в ходе исследования физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона с частичной заменой портландцемента минеральным наномодификатором было выявлено следующее. Как правило, зола рисовой шелухи в качестве вторичного материала обладает большим потенциалом для использования в качестве замены портландцемента в самоуплотняющемся бетоне, сохраняющем механические и эксплуатационные характеристики бетонной смеси и готового бетона в приемлемом диапазоне. Площадь

удельной поверхности ЗРШ была увеличена с использованием механо-химической активации.

Включение ЗРШ привело к снижению удобоукладываемости бетона, однако с помощью дополнительного суперпластификатора данные свойства самоуплотняющегося для всех образцов были почти одинаковыми. Увеличение содержания минерального наномодификатора привело к снижению ранних физико-механических свойств, тогда как конечная прочность самоуплотняющегося бетона, содержащего ОМН, была сопоставима с обычными образцами. Это было достигнуто за счет пуццолановой активности ЗРШ. Включение ЗРШ уменьшило количество портландита в системе за счет получения дополнительного геля C-S-H, что привело к уплотнению матрицы и блокированию сетей с открытой пористостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ranjbar N., Behnia A., Alsubari B., Birgani P.M., Jumaat M.Z. Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash. Journal of Cleaner Production. 2016. No. 112. Pp. 723-730.
2. Fediuk R.S., Yevdokimova Y.G., Smoliakov A.K., Stoyushko N.Y., Lesovik V.S. Use of geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 221(1). Pp. 012011

3. Lesovik V.S., Urkhanova L.A., Gridchin A.M., Lkhasaranov S.A. Composite binders on the basis of pearlite raw material of Transbaikalia. Research Journal of Applied Sciences. 2014. No. 9(12). Pp. 1016-1020.
4. Ranjbar N., Kuenzel C. Influence of preheating of fly ash precursors to produce geopolymers. J Am Ceram Soc. 2017. No. 00. Pp. 1-10.
5. Чулкова И.Л. Повышение эффективности строительных композитов с использованием техногенного сырья регулированием процессов структурообразования. – автореф. дисс. ...д.т.н. 05.23.05. Белгород, 2011. 39 с.
6. Казлитина О.В. Фибробетон для монолитного строительства. – автореф. дисс. ... к.т.н. 05.23.05. – Белгород, 2013. 22 с.
7. S. Chithra, S.R.R. Senthil Kumar, K. Chinnaraju. The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. Construction and Building Materials, Vol. 113, 2016. Pp. 794-804.
8. Sánchez M., Alonso M.C., González R.. Preliminary attempt of hardened mortar sealing by colloidal nanosilica migration. Construction and Building Materials. Vol. 66, 2014. Pp. 306-312.
9. Aydin A.C. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials. Vol. 21, Is. 6, 2007. Pp. 1149-1154.
10. Sahmaran M, Yaman I.O.. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. Construction and Building Materials. Vol. 21, Is. 1, 2007. Pp. 150-156.
11. Zemnukhova L.A., Panasenkov A.E., Artemyanov A.P., Tsou E.A. Dependence of porosity of amorphous silicon dioxide prepared from rice straw on plant variety. BioResources. 2015. No.10(2). Pp. 3713-3723.
12. Pelin G., Pelin C.-E., Ștefan, A., Dincă I., Andronescu E., Ficai A. Mechanical and tribological properties of nanofilled phenolic-matrix laminated composites. Materiali in Tehnologije. 2017. No.51(4). Pp. 569-575
13. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zheng J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. Cement and Concrete Composites. 2018. No.86. Pp. 130-138
14. Голубев В.А., Пузырёв Е.М., Мухомедов И. Разработка технологии производства аморфного диоксида кремния из рисовой лузги // Горение топлива: теория, эксперимент и приложения: Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015 [Электронный ресурс]. Адрес доступа: http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D2_S2-9.pdf.
15. Земнухова Л.А., Панасенко А.Е., Цой Е.А., Федорищева Г.А., Шапкин Н.П., Артемьянов А.П., Майоров В.Ю. Состав и строение образцов аморфного кремнезема // Неорганические материалы, т. 50, № 1, 2014. С. 82-89.
16. Self-compacting concrete: Test methods for SCC. Nordic Innovation Centre. 2005.
17. Inspection manual for self-consolidating concrete in precast members. The University of Texas at Austin. 2007.
18. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC. 2002.
19. Федюк Р.С., Смоляков А.К., Тимохин Р.А. Строительные материалы для войсковой фортификации // В сборнике: XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием, посвященной 25-летию со дня образования Технического института (филиала) СВФУ Материалы конференции. Секции 1-3. 2017. С. 109-113.
20. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 1 (47). С. 65-72.
21. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Влияние составов материалов на формирование структуры строительных композитов // Вестник СибАДИ, 2015. № 4 (44). С. 69-79.
22. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов // Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Омск, 2011. 420 с.

SELF-COMPACTING CONCRETE WITH THE USE OF PLANT WASTE

R.S. Fediuk, A.V. Mochalov, D.N. Pezin, R.A. Timokhin

ABSTRACT

Introduction. The development of efficient self-compacting concrete is an urgent task for building materials science. A successful implementation of the task can be the use of ash of rice husk as an alternative material in the production of concrete. The aim of the research is to study the influence of the organo-mineral nanomodifier on the properties of self-compacting concrete.

Materials and methods. The organomineral nanomodifier is developed using Portland cement, rice husk ash and quartz flour, which are milled together to a specific surface of 500-900 m²/kg. Superplasticizer "Hidetal" is used to reduce the water-cement ratio. The properties of the mixture are tested for rheological characteristics. The bulk density of the samples is measured by the Archimedes method. An investigation of the concrete microstructure is carried out by electron microscopy. The compressive strength of the samples is obtained at the age of 7 and 28 days.

Results. The most effective fineness of grinding of nanomodifier is 550 m²/kg. The maximum increase in strength and the best rheological characteristics in comparison with pure thin-grained Portland cement are achieved by the introduction of a nanomodifier in an amount of 10.5%. However, the variation in the modulus of the samples' elasticity does not reveal the dependence on the amount of nanomodifier. The modulus of elasticity of self-compacting concrete primarily depends on the amount of coarse aggregate. Therefore, the pozzolanic reaction helps to increase the compressive strength of concrete by improving the interfacial bond between the cement paste and the aggregate.

Discussion and conclusions. Plant waste has the potential to be used as a replacement for Portland cement in self-compacting concrete that retains the mechanical and operational characteristics of the concrete mix and ready-mixed concrete. The surface area of the ash is increased by mechanochemical activation. The inclusion of ash led to a reduction in the workability of concrete, but with the help of an additional superplasticizer, these properties for all samples are aligned. An increase in the nanomodifier content leads to a decrease in the early physical and mechanical properties, while the final strength of self-compacting concrete containing a nanomodifier is comparable to conventional samples.

KEYWORDS: cement stone, composite binder, nanodispersed additive, self-compacting concrete, rice husk ashes, pozzolanic materials, properties of the concrete mix, workability.

REFERENCES

1. Ranjbar N., Behnia A., Alsubari B., Birgani P.M., Jumaat M.Z. Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash. *Journal of Cleaner Production*, 2016, no. 112, pp. 723-730.
2. Fediuk R.S., Yevdokimova Y.G., Smoliakov A.K., Stoyushko N.Y., Lesovik V.S. Use of geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, no. 221 (1), Pp. 012011
3. Lesovik V.S., Urkhanova L.A., Gridchin A.M., Lkhasaranov S.A. Composite binders on the basis of pearlite raw material of Transbaikalia. *Research Journal of Applied Sciences*, 2014, no. 9 (12), pp. 1016-1020.
4. Ranjbar N., Kuenzel C. Influence of preheating of fly ash precursors to produce geopolymers. *J Am Ceram Soc*, 2017, No. 00, Pp. 1-10.
5. Chulkova I.L. *Povyshenie effektivnosti stroitel'nykh kompozitov s ispol'zovaniem tehnogennogo syr'ya regulirovaniem processov strukturoobrazovaniya* [Increasing the effectiveness of building composites using technogenic raw materials by regulating the processes of structure formation]. Author's abstract. diss. ... Doctor of Technical Sciences. 05.23.05. Belgorod, 2011. 39 p.
6. Kazlitina O.V. *Fibrobeton dlja monolitnogo stroitel'stva* [Fiber reinforced concrete for monolithic construction] Author's abstract. diss. ... Cand. of Technical Sciences. 05.23.05. Belgorod, 2013. 22 p.
7. Chithra S. R.R. Senthil Kumar, K. Chinnaraju. The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 113, Pp. 794-804.
8. Sánchez M., Alonso M.C., González R.. Preliminary attempt of hardened mortar sealing by colloidal nanosilica migration. *Construction and Building Materials*. Vol. 66, 2014. Pp. 306-312.
9. Aydin A.C. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, Is. 6, 2007. Pp. 1149-1154.
10. Sahmaran M., Yaman I.O. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, Is. 1, 2007. Pp. 150-156.
11. Zemnuhova L.A., Panasenکو A.E., Artemyanov A.P., Tsoy E.A. Dependence of porosity of amorphous silicon dioxide prepared from rice straw on plant variety. *BioResources*, 2015, no. 10(2), pp. 3713-3723.
12. Pelin G., Pelin C.-E., Ștefan, A., Dincă I., Andronescu E., Ficai A. Mechanical and tribological properties of nanofilled phenolic-matrix laminated composites. *Materiali in Tehnologije*, 2017, no. 51(4), pp. 569-575.
13. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zheng J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*, 2018, no. 86, pp. 130-138.
14. Golubev V.A., Puzyrjov E.M., Muhoedov I. *Razrabotka tehnologii proizvodstva amorfnoгo dioksida kremnija iz risovoj luzgi* [Development of technology for the production of amorphous silica from rice husks]. Fuel combustion: theory, experiment and applications: Proceedings of the 9th All-Russian Conference with international participation. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS, 2015. http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D2_S2-9.pdf.
15. Zemnuhova L.A., Panasenکو A.E., Coj E.A., Fedorishheva G.A., Shapkin N.P., Artem'janov A.P., Majorov V.Ju. Sostav i stroenie obrazcov amorfnoгo kremnezema [Composition and structure of amorphous silica samples]. *Inorganic materials*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 82-89.
16. Self-compacting concrete: Test methods for SCC. Nordic Innovation Centre. 2005.
17. Inspection manual for self-consolidating concrete in precast members. The University of Texas at Austin. 2007.
18. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC. 2002.
19. Fediuk R.S., Smoliakov A.K., Timokhin R.A. *Stroitel'nye materialy dlja vojskovoj fortifikacii* [Building materials for military fortification]. XVIII All-Russian scientific practical conference of young scientists, graduate students and students in Neryungi, with international participation, dedicated to the 25th anniversary of the formation of the Technical Institute (branch) NEFU Conference proceedings. Sections 1-3. 2017, pp. 109-113.
20. Lesovik V.S., Fediuk R.S. Teoreticheskie predposylki sozdaniya cementnykh kompozitov povyshennoj nepronaemosti [Theoretical prerequisites for the creation of cement composites of increased impermeability]. *Vestnik SibADI*, 2016, no. 1, pp. 65-72.
21. Lesovik V.S., Chulkova I.L. Vliyanie sostavov materialov na formirovanie struktury stroitel'nykh kompozitov [The influence of the composition of materials on the formation of the structure of building composites]. *Vestnik SibADI*, 2015, no. 4, pp. 69-79.
22. Lesovik V.S., Chulkova I.L. *Upravlenie strukturoobrazovaniem stroitel'nykh kompozitov* [Control of the structure formation of building composites]. Siberian State Automobile and Highway Academy. Omsk, 2011. 420 c.

Поступила 16.03.2018, принята к публикации 20.04.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федюк Роман Сергеевич (Владивосток, Россия) – доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Су-ханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvvfu.ru).

Roman S. Fediuk – Associate Professor of the Department «Hydraulic Engineering, Theory of Buildings and Structures», Far Eastern Federal University (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvvfu.ru).

Мочалов Александр Викторович (Владивосток,