DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-6-5-16

*Федюк Р.С. *, кандидат технических наук, доцент,
Лисейцев Ю.Л.,
Таскин А.В., кандидат химических наук,
Тимохин Р.А.,
Дальневосточный федеральный университет, Россия,
Клюев С.В., кандидат технических наук, доцент,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия,
Сезар Касагранде, PhD,
Федеральный университет Санта Катарины, Бразилия*
*Ответственный автор E-mail: roman44@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ФИБРОЗОЛОБЕТОНА

Аннотация: тенденция строительного материаловедения направлена на замещение долей портландцемента в составе вяжущего иными компонентами. В работе предложены принципы управления статической и динамической прочностью фиброзолобетонных композиций, заключающиеся в комплексном влиянии добавок алюмосиликатной смеси, извлеченной из гидроудаленных золошлаковых отходов ТЭС, и базальтовой фибры, на процессы структурообразования цементного композита. Разработана четырехстадийная схема извлечения алюмосиликатов (АС) из гидроудаленной золошлаковой смеси, включающая дезинтеграцию, флотацию и двухступенчатую магнитную сепарацию. Установлено, что плотность свежей смеси в зависимости от дозы ведет себя закономерно, а плотность твердых образцов при малых дозах слегка падает. Отмечается высокая ранняя прочность разработанных композитов, в частности, для образцов с АС прослеживается полуторное увеличение прочности при сжатии по сравнению с бездобавочными образцами. Значительный эффект на прочность при изгибе оказывают комбинации «фибра + АСС» с учетверением прочности. Прослеживаются удачные аппроксимации прочности при сжатии и при изгибе от дозы алюмосиликатов для разных возрастов (1, 7, 28 суток) с закономерным поведением коэффициентов в степенных зависимостях. Выявлено многократное увеличение ударной вязкости разработанных составов. Использование результатов приведет к возможности проектирования высокопрочных бетонов, в том числе и для специальных сооружений.

Ключевые слова: композит, портландцемент, золошлаковая смесь, алюмосиликаты, механические свойства, ударная вязкость

Введение

Современная мировая строительная индустрия имеет целью минимизацию цементапотребления, в связи с тем, что производство портландцемента является второй загрязняющей отраслью промышленности по выбросам парниковых газов. В частности, при производстве 1 тонны цемента в атмосферу выделяется столько же углекислого газа [1-3]. Поэтому, сейчас во всех научных исследованиях бетонных композитов обязательным условием является замещение различных долей цемента в составе вяжущего [4].

В мировой научно-технической литературе последних лет имеется ряд трудов, посвященных использованию в качестве компонентов вяжущих природных пуццолановых материалов, таких, как вулканический туф, опока, трепел и т.д. [5-8]. Еще более перспективными в этом отношении являются различные промышленные отходы, имеющие в своем составе кремнеземистые и алюмосиликатные фазы [9-12]. При этом дополнительно решается задача утилизации отходов, что может приносить экономию владельцу отходов за счет снижения экологических платежей [13-14].

Достаточно исследованными в этом аспекте являются такие отходы производства, как зола-уноса, гранулированный доменный шлак, зола рисовой шелухи, микрокремнезем и т.д. [15-17]. С другой стороны, по всему миру накоплены огромные запасы гидроудаленных золошлаковых отходов, которые за годы хранения на золоотвалах в значительной степени потеряли свою активность. Поэтому актуальной является разработка технологии подготовки золошлаковой смеси (ЗШС), заключающаяся в ее очистке от посторонних примесей, извлечении целевого компонента и его активации.

Золобетонные вяжущие могут быть эффективны для работы на статическое сжатие [18]. При этом, повышение динамических характеристик, таких, как, например, ударная вязкость, может быть достигнуто применением дисперсного армирования различными видами фибры. Однако, большинство исследований посвящено применению стальной фибры, в то время как, например, базальтовая фибра представляется

весьма перспективной для использования в конструкциях специальных сооружений. Это связано с тем, что базальт является коррозионностойким материалом (в отличие, например, от широко применяемой стали), а также огнестойким, что позволяет использовать его, например, для покрытий космодромов и ракетных шахт.

Соответственно, настоящая статья имеет целью изучение влияния активированных алюмосиликатов, извлеченных из гидроудаленной золошлаковой смеси и базальтовой фибры на механические свойства бетонных композитов, в том числе, на ударную вязкость. Особо актуальным является то, что в работе применяется низкомарочный цемент, что повышает научную и экономическую значимость полученных результатов.

Методы и материалы

В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 32.5Б («Спасскцемент», Россия), химический и минералогический состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический и минералогический состав портландцемента

Table 1

Chemical and mineralogical composition of Portland cement

Химический состав					Минеральный состав			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64,7-65,2	21,1-21,5	5,2-5,4	3,7-4,2	2,3-3,0	62-65	11-14	6-7	11-14

В качестве частичной замены портландцемента применялись микродисперсные алюмосиликаты (АС), извлеченные из гидроудаленных золошлаковых отходов Приморской ГРЭС (Приморский край). АС с размером частиц менее 0,1 мм, высушивались до влажности менее 0,5% и размалывались до тонины помола, соответствующей остатку менее 2% на сите 008. Микроструктурный анализ АС показан на рис. 1. отмечаются гетерозернистые тонкодисперсные сферические зерна с различными размерами частиц вплоть до нанозерен.

Рис. 1. Золошлаковая смеси Приморской ГРЭС. Увеличение в 200 (а) и 2000 (б) раз
Fig. 1. Ash and slag mix of Primorskaya power plant. Magnification of 200 (a) and 2000 (b) times

Варьирование добавки АС проводилось в пределах от 10 до 50% от массы цемента (табл. 2).

Таблица 2

Пропорции смесей, г

Table 2

Mix proportions, g

№ состава	ЦЕМ I	АС	Песок	Вода	СП	Фибра
ЦЕМ	100	-	300	40	-	-
ЦЕМ+СП	100	-	300	39,88	0,2	-
ЦЕМ+Ф	100	-	300	40	-	1,5
ЦЕМ+СП+Ф	100	-	300	39,86	0,22	1,5
90-10	90	10	300	39,74	0,3	-
80-20	80	20	300	39,32	0,5	-
70-30	70	30	300	38,82	0,7	-
60-40	60	40	300	37,62	0,8	-
50-50	50	50	300	35,66	0,9	-
90-10+Ф	90	10	300	39,72	0,33	1,5
80-20+Ф	80	20	300	39,29	0,55	1,5
70-30+Ф	70	30	300	38,77	0,77	1,5
60-40+Ф	60	40	300	37,57	0,88	1,5
50-50+Ф	50	50	300	35,60	0,99	1,5

В качестве суперпластификатора использовался поликарбоксилатный модификатор Master Glenium. Применялась базальтовая фибра ООО «Акстримпромсервис» (г. Владивосток) (рис. 2). Характеристики базальтовой фибры соответствуют требованиям ГОСТ 6943.2-79, ГОСТ 427-2009, ГОСТ 6943.8-79 (табл. 3).

Рис. 2. Базальтовая фибра

Fig. 2. Basalt fiber

Таблица 3

Технические характеристики применяемой фибры

Table 3

Technical characteristics of the applied fiber

Прочность на растяжение, МПа	3500
Диаметр волокна, мм	$13 \cdot 10^{-3}$
Длина волокна, мм	$6 \pm 1,5$
Модуль упругости, ГПа	75
Коэффициент удлинения, %	3,2
Температура плавления, °C	1450
Стойкость к щелочам и коррозии	высокая
Плотность, кг/м ³	2600

Изготавливались образцы размером 40×40×160 мм (для исследования на изгиб), 100×100 мм (для исследования на сжатие) и панели размером 600×600×50 мм (исследование на ударную вязкость). Было изготовлено по 6 образцов каждого состава и размера. Приготовленную смесь вручную послойно укладывали в формы и вибрировали на виброплощадке (СМЖ-539, Россия) в течение 5 сек. Форму с образцами накрывали стеклом, и по истечении 1 суток проводили распалубку. Изготовленные образцы укладывали в камеру нормального твердения (модель КПУ-1М) на подкладки и хранили 27 суток. Температура в камере 20°C, относительная влажность воздуха 95%. По истечении 28 суток с даты изготовления образцы вынимали из камеры. В течение 4 ч образцы находились в естественных условиях помещения, в котором впоследствии испытывались, т. е. при температуре воздуха в пределах 20±5°C и относительной влажности воздуха не менее 55%.

Плотность бетонных образцов определялся путем деления массы образцов размером 100×100 мм на их объем. Предел прочности при изгибе и при сжатии образцов проверялся на гидравлическом прессе Testing (Германия) по ГОСТ 310.4-81.

Испытание на ударную выносливость проводилось с помощью падающего ударника на основе международного нормативного документа ACI Committee 544, в которых ударопрочный образец подвергался повторным ударам на одном и том же месте. В этом испытании молот массой 10 кг падал с высоты 600 мм на панели (рис. 3).

$$E_{уд} = m \cdot g \cdot h \cdot N$$

где $E_{уд}$ – ударная энергия, Дж; m – масса ударника = 10 кг; $g = 9,81$ м/с²; N – количество ударов.

Рис. 3. Исследования ударного взаимодействия
Fig. 3. Studies of impact interaction

Отношение количества ударов, вызывающих отказ, N_f к числу ударов, вызывающих первую трещину, N_c определяется как коэффициент ударной вязкости $\mu_i = N_f / N_c$.

Результаты и обсуждения

Для управления структурообразованием цементного композита необходимо применение новых компонентов. При этом, перспектива использования компонентов повышается, если они извлекаются из техногенных отходов. Большой потенциал имеют алюмосиликаты, выделенные из золошлаковых отходов гидроудаления. Извлечение и подготовка алюмосиликатов проводилась по технологии, разработанной автором совместно с Международным центром технологий обогащения минерального сырья и использования вторичных ресурсов Дальневосточного федерального университета. Технология включает в себя: дезинтеграцию, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию, сушку и механоактивацию (рис. 4).

Рис. 4. Разработанная технологическая схема извлечения алюмосиликатов
Fig. 4. Developed technological scheme for the ASM purification

На блоке дезинтеграции производится разделение по фракциям выше и ниже 100 мкм. Крупная фракция направляется в отвал, а мелкие частицы поступают во флотационную установку, где извлекается недожог. Полученный недожог брикетируется и используется как топливо (рис. 5).

Рис. 5. Полученный брикетированный недожог
Fig. 5. Obtained briquetted underburning

Железосодержащие частицы извлекаются из смеси с двухступенчатой магнитной сепарацией (рис. 6). При этом, слабомагнитная фракция с первого магнитного сепаратора поступает на второй магнитный сепаратор. Немагнитная фракция, содержащая оксиды Al и Si, накапливается и обезвоживается (рис. 7).

Рис. 6. Магнитный сепаратор
Fig. 6. Magnetic separator

Рис. 7. Извлеченные алюмосиликаты разных фракций
Fig. 7. Extracted aluminosilicates of different fractions

В лабораторных условиях обезвоженная алюмосиликатная смесь высушивается в муфельной печи и измельчается до заданной величины на планетарной мельнице-активаторе.

Химический состав полученных алюмосиликатов приведен в табл. 3. Место очищенной золошлаковой смеси в системе « $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ » представлено на рис. 8.

Таблица 4

Химический состав полученных алюмосиликатов

Table 4

Chemical composition of the obtained aluminosilicates

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	др.
57,44	25,03	1,24	11,02	1,93	1,59	0,21	1,54

Рис. 8. Место очищенной золошлаковой смеси в системе «CaO-SiO₂-Al₂O₃»

Fig. 8. Place of the purified ash and slag mix in the "CaO-SiO₂-Al₂O₃" system

В табл. 5 приведены свойства смесей и динамика развития их плотности. Плотность свежей смеси от дозы ведет себя закономерно, а плотность твердых образцов при малых дозах слегка падает.

Таблица 5

Свойства смеси и динамика развития плотности

Table 5

Properties of the mixes and dynamics of the density gain

№ состава	Осадка конуса	Распływ конуса	Плотность смеси	Плотность на 28 сутки
ЦЕМ	18	46	2034	2094
ЦЕМ+СП	20	51	2036	2110
ЦЕМ+Ф	17	45	2057	2092
ЦЕМ+СП+Ф	19	46	2059	2115
90-10	18	46	2041(+0.2%)	2100(-0.47%)
80-20	18	45	2045(+0.5%)	2103(-0.33%)
70-30	18	47	2055(+0.9%)	2099(-0.5%)
60-40	18	46	2061(+1.2%)	2099(-0.5%)
50-50	20	50	2077(+2%)	2121(+0.5%)
90-10+Ф	17	45	2061(+0.1%)	2109(-0.3%)
80-20+Ф	17	46	2065(+0.3%)	2113(-0.1%)
70-30+Ф	17	44	2074(+0.7%)	2092(-1%)
60-40+Ф	17	43	2081(+1%)	2098(-0.8%)
50-50+Ф	19	48	2094(+1.7%)	2126(+0.5%)

Согласно представленным в табл. 6 результатам, отмечается высокая ранняя прочность. В частности, для образцов с АСС прослеживается полуторное увеличение прочности при сжатии. Также, характерно монотонное увеличение прочности с повышением дозы АСС; возможно на это влияет суперпластификатор.

Значительный эффект на прочность при изгибе оказывают комбинации «фибра + АСС» с учетверением прочности. Прослеживаются удачные аппроксимации прочности при сжатии и при изгибе от дозы АСС для разных возрастов (1, 7, 28 суток) с закономерным поведением коэффициентов в степенных зависимостях.

Таблица 6

Механические свойства разработанных композитов

Table 6

Mechanical properties of the developed composites

№ состава	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа			Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа			$R_{изг}^{28}/R_{сж}^{28}$
	1 д.	7 д.	28 д.	1 д.	7 д.	28 д.	
ЦЕМ	7,6	18,8	31,1	0,9	2,1	3,8	0,12
ЦЕМ+СП	7,9	19,5	34,0	0,9	2,2	3,9	0,11
ЦЕМ+Ф	7,7	19,1	32,1	1,0	4,2	8,2	0,24
ЦЕМ+СП+Ф	7,9	19,7	35,0	1,1	4,3	8,6	0,2
90-10	8,5 (+7.6%)	19.9 (+2%)	35.1 (+3%)	1.0 (+11.1 %)	2.2 (0 %)	4.3 (+10.2%)	0,12
80-20	9,6 (+21.5%)	20.4 (+4.6%)	37.2 (+9.4%)	1.3 (+44.4%)	2.3 (+4.5 %)	4.5 (+15.3%)	0,12
70-30	9,9 (+25.3%)	20.8 (+6.6%)	38.6 (+13.5)	1.3 (+44.4 %)	2.4 (+9.0 %)	4.7 (+20.5%)	0,12
60-40	10,5 (+32.9%)	21.3 (+9.2%)	40.2 (+18.2%)	1.4 (+55.5 %)	2.4 (+9.0 %)	4.7 (+20.5%)	0,11
50-50	11,0 (+39.2%)	21.7 (+11.2%)	41.2 (+21.1)	1.5 (+66.6 %)	2.5 (+13.6 %)	4.8 (+23%)	0,11
90-10+Ф	8,7 (+10.1%)	20.2 (+2.5 %)	36.2 (+3.4%)	1,7 (+63.6 %)	4.4 (+2.3 %)	9.0 (+4.6%)	0,28
80-20+Ф	9,5 (+24.0%)	20.6 (+4.5 %)	38.2 (+9.1%)	2,4 (+118.1 %)	4.6 (+6.9 %)	9.6 (+11.6%)	0,28
70-30+Ф	10,0 (+26.6%)	21.1 (+7.1 %)	39.6 (+13.1%)	2,7 (+145.4 %)	4.7 (+9.3 %)	9.9 (+15.1%)	0,28
60-40+Ф	10,7 (+35.4%)	21.5 (+7.6 %)	41.1 (+17.4%)	3,0 (+172.7 %)	4.7 (+9.3 %)	10.1 (+17.4%)	0,29
50-50+Ф	11,1 (+40.5%)	22.0 (+11.6%)	42.2 (+20.5%)	3,0 (+172.7 %)	4.8 (+11.6 %)	10.6 (+23.2%)	0,31

В скобках приведены процентные приращения исследуемых характеристики по сравнению с контрольными образцами. При этом, для неармированных образцов сравнение производилось с образцом ЦЕМ, а для фиброармированных – с образцом ЦЕМ+Ф.

Табл. 7 перечисляет характеристики ударной вязкости разработанных составов.

Таблица 7

Характеристики ударной вязкости разработанных составов

Table 7

Characteristics of the impact strength of the developed compositions

Состав	Кол-во ударов до первой трещины N_{ff}	Ударная энергия (первая трещина), Дж	Количество ударов до разрушения образца, N_{cd}	Ударная энергия (разрушение образца), Дж	Коэффициент ударной вязкости, $\mu (N_{iv})$. N_{cd}/N_{ff}
90-10	8 (+60%)	472	121 (+120%)	7139	15 (+36.3%)
80-20	11 (+120%)	649	163 (+196.3%)	9617	15 (+36.3%)
70-30	13 (+160%)	767	206 (+274.5%)	12154	16 (+45.4%)
60-40	13 (+160%)	767	238 (+332.7%)	14042	18 (+63.6%)
50-50	17 (+240%)	1003	289 (+425.4%)	17051	17 (+54.5%)
90-10+Ф	18 (+12.5%)	1062	396 (+23.3%)	23354	22 (+10%)
80-20+Ф	24 (+50%)	1416	538 (+67.6%)	31742	22 (+10%)
70-30+Ф	30 (+87.5%)	1770	621 (+93.4%)	36639	21 (+5%)

Продолжение таблицы 7
Table 7 continuation

60-40+Ф	31 (+93.7%)	1829	689 (+114.6%)	40651	22 (+10%)
50-50+Ф	34 (+112.5%)	2006	1023 (+218.6%)	60357	30(+50%)
ЦЕМ	5	295	25	1475	5
ПЦ+СП	5	295	55	3245	11
ПЦ+СП+Ф	16	944	321	18939	20

Все кривые зависимости количества ударов до первой трещины, ударов до разрушения и коэффициента ударной вязкости от дозы оказались растущими. Обращает на себя внимание, что кривые зависимости количества ударов до первой трещины $N_{\text{т}}$ и до разрушения $N_{\text{сд}}$ от дозы АСС удается аппроксимировать степенными зависимостями типа $Ax(z)$ с высоким статистическим фактором R^2 .

Выводы

В результате исследования физико-механических свойств фиброзолобетона с замещением портландцемента алюмосиликатной смесью в количестве от 10 до 50 мас. %. выявлено следующее:

1. Разработана схема извлечения и подготовки АСС золошлаковой смеси гидроудаления, включающая дезинтеграцию, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию, сушку и механоактивацию.
2. Установлено, что плотность свежей смеси от дозы ведет себя закономерно, а плотность твердых образцов при малых дозах слегка падает.
3. Отмечается высокая ранняя прочность разработанных композитов, в частности, для образцов с АСС прослеживается полуторное увеличение прочности при сжатии по сравнению с бездобавочными образцами.
4. Значительный эффект на прочность при изгибе оказывают комбинации «фибра + АСС» с учетверением прочности. Прослеживаются удачные аппроксимации прочности при сжатии и при изгибе от дозы АСС для разных возрастов (1, 7, 28 суток) с закономерным поведением коэффициентов в степенных зависимостях.
5. Выявлено многократное увеличение ударной вязкости разработанных составов.

Направление дальнейших исследований может быть нацелено на использование трансдисциплинарных подходов в решении актуальных проблем строительного материаловедения, для разработки технологий производства фиброзолобетонных с применением различных пуццолановых отходов производства и фибр различного состава для широкого спектра строительных композитов, в том числе для специальных сооружений. Составы, разработанные в исследовании, могут найти применение для возведения защитных сооружений, а также покрытий аэродромов, космодромов и федеральных трасс.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект №18-29-24138

Литература

1. Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Effectiveness of Combined Nanoadditives for Cement Systems // Inorganic Materials. 2017. № 53 (10). P. 1105 – 1110.
2. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Kozin A.V., Zhevtun I.G., A V Perfilev. Influence of synthetic calcium silicates on the strength properties of fine-grained concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 347. 012041 doi:10.1088/1757-899X/347/1/012041
3. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 85 – 99.
4. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharensko Yu.V., Klyuev A.V. Fiber Concrete on the basis of composite binder and technogenic raw materials // Materials Science Forum. 2018. № 931. P. 603 – 607.
5. Федюк Р.С. Применение сырьевых ресурсов приморского края для повышения эффективности композиционного вяжущего // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 1. С. 28 – 35.
6. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77 – 85.

7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review // *Cement and Concrete Composites*. 2016. № 73. P. 267 – 280.
8. Low N.M.P., Beaudoin J.J. The effect of wollastonite micro-fibre aspect ratio on reinforcement of Portland cement-based binders // *Cement and Concrete Research*. 1993. № 23. P. 1467 – 79.
9. Ransinchung G.D., Kumar B., Kumar V. Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica // *Construction and Building Materials*. 2009. № 23. P. 1168 – 1177.
10. Kalla P., Misra A., Gupta R.C., Csetenyi L., Gahlot V., Arora A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination // *Construction and Building Materials*. 2013. № 40. P. 1142 – 50.
11. Fediuk R.S. Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. № 125 (1). P. 012019.
12. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Sharma Y.S., Perfilev A.V., Kozin A.V. Industrial Waste as Raw Material for Producing Synthetic Wollastonite in Russia // *International Journal of Environmental Science and Development*. 2017. № 8 (2).
13. Mathur R., Misra A.K., Goel P. Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete // *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2007. № 66. P. 1029 – 1034.
14. Jindal A., Ransinchung R.N., Kumar P. Behavioral study of self-compacting concrete with wollastonite microfiber as part replacement of sand for pavement quality concrete (PQC) // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2019.06.002>
15. Sharma S.K. Properties of SCC containing pozzolans, Wollastonite micro fiber, and recycled aggregates // *Heliyon*. 2019. № 5 (8). e02081. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02081
16. Kumar B.J., Ramujee K. Mechanical and Durability Characteristics of Wollastonite Based Cement Concrete // *I-manager's Journal on Civil Engineering*. 2017. № 7 (1). P. 1 – 7. <https://doi.org/10.26634/jce.7.1.10363>
17. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength. *Solid State Phenomena*. 2018. № 284. P. 1005 – 1011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1005
18. Hossain S.K.S., Yadav S., Majumdar S., Krishnamurthy S., Pyare R., Roy P. A comparative study of physico-mechanical, bioactivity and hemolysis properties of pseudo-wollastonite and wollastonite glass-ceramic synthesized from solid wastes. *Ceramics International*. 2019. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.039

References

1. Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Effectiveness of Combined Nanoadditives for Cement Systems. *Inorganic Materials*. 2017. 53 (10). P. 1105 – 1110.
2. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Kozin A.V., Zhevtun I.G., A V Perfilev. Influence of synthetic calcium silicates on the strength properties of fine-grained concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 347. 012041 doi:10.1088/1757-899X/347/1/012041
3. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Sovremennye sposoby aktivacii vyazhushchego i beton-nykhk smesey (obzor). *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. 4 (37). P. 85 – 99. (rus.)
4. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukhareno Yu.V., Klyuev A.V. Fiber Concrete on the basis of compo-site binder and technogenic raw materials. *Materials Science Forum*. 2018. 931. P. 603 – 607.
5. Fedyuk R.S. Primenenie syr'evykh resursov primorskogo kraja dlya povysheniya effektivnosti kompozicion-nogo vyazhushchego. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2016. 1. P. 28 – 35. (rus.)
6. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.B. Kompozicionnye vyazhushchie i samouplotnyayushchiesya fibrobetony dlya zashchitnykh sooruzhenij. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2018. 7. P. 77 – 85. (rus.)
7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2016. 73. P. 267 – 280.
8. Low N.M.P., Beaudoin J.J. The effect of wollastonite micro-fibre aspect ratio on reinforcement of Portland cement-based binders. *Cement and Concrete Research*. 1993. 23. P. 1467 – 79.
9. Ransinchung G.D., Kumar B., Kumar V. Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica. *Construction and Building Materials*. 2009. 23. P. 1168 – 1177.

10. Kalla P., Misra A., Gupta R.C., Csetenyi L., Gahlot V., Arora A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination. *Construction and Building Materials*. 2013. 40. P. 1142 – 50.
11. Fedyuk R.S. Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 125 (1). P. 012019.
12. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Sharma Y.S., Perfilov A.V., Kozin A.V. Industrial Waste as Raw Material for Producing Synthetic Wollastonite in Russia. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2017. 8 (2).
13. Mathur R., Misra A.K., Goel P. Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2007. 66. P. 1029 – 1034.
14. Jindal A., Ransinchung R.N., Kumar P. Behavioral study of self-compacting concrete with wollastonite microfiber as part replacement of sand for pavement quality concrete (PQC). *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.06.002>
15. Sharma S.K. Properties of SCC containing pozzolans, Wollastonite micro fiber, and recycled aggregates. *Heliyon*. 2019. 5 (8). e02081. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02081
16. Kumar B.J., Ramujee K. Mechanical and Durability Characteristics of Wollastonite Based Cement Concrete. *I-manager's Journal on Civil Engineering*. 2017. № 7 (1). P. 1 – 7. <https://doi.org/10.26634/jce.7.1.10363>
17. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength. *Solid State Phenomena*. 2018. 284. P. 1005 – 1011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1005
18. Hossain S.K.S., Yadav S., Majumdar S., Krishnamurthy S., Pyare R., Roy P. A comparative study of physico-mechanical, bioactivity and hemolysis properties of pseudo-wollastonite and wollastonite glass-ceramic synthesized from solid wastes. *Ceramics International*. 2019. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.039

*Fedyuk R.S. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,*

Liseytshev Yu.L.,

Taskin A.V., Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.),

Timokhin R.A.,

Far Eastern Federal University, Russia,

Klyuev S.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,

César Casagrande, Ph.D.,

Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil

*Corresponding author E-mail: roman44@yandex.ru

INCREASING IN IMPACT VISCOSITY OF FIBER-ASH-CONCRETE

Abstract: the trend in building materials science is to replace the different proportions of Portland cement in the binder. Therefore, the paper proposes the principles of controlling the static and dynamic strength of fiber-reinforced concrete, consisting in the complex effect of the hydro-removed ash and slag mix and basalt fiber on the processes of structure formation of the cement composite. A four-stage purification system for the hydro-removed ash and slag mixture has been developed, including disintegration, flotation and two-stage magnetic separation. It was found that the density of the fresh mix from the dose behaves naturally, and the density of solid samples at low doses slightly decreases. High early strength of the developed composites is noted, in particular, for specimens with ASM, one and a half increase in compressive strength is traced in comparison with non-additive specimens. Combinations of "fiber + ASM" with a quadrupling of strength have a significant effect on bending strength. Successful approximations of the compressive strength and bending strength on the ASM dose for different ages (1, 7, 28 days) are traced with the regular behavior of the coefficients in the power dependences. Revealed a multiple increase in the impact strength of the developed compositions. The use of the results will lead to the possibility of designing high-strength concretes, including for special structures.

Keywords: composite, Portland cement, ash and slag mix, mechanical properties, impact strength

Для цитирования: Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Таскин А.В., Тимохин Р.А., Ключев С.В., Сезар Касагранде. Повышение ударной вязкости фиброзолабетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 6. С. 5 – 16. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-6-5-16

For citation: Fedyuk R.S., Liseytsev Yu.L., Taskin A.V., Timokhin R.A., Klyuev S.V., Cesar Casagrande. Increasing in impact viscosity of fiber-ash-concrete. Construction Materials and Products. 2020. 3 (6). P. 5 – 16. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-6-5-16

Поступила в редакцию 9 октября 2020 г.

Принята в доработанном виде 1 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 12 декабря 2020 г.

Received: October 9, 2020.

Revised: November 1, 2020.

Accepted: December 12, 2020.