

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.535

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-114-127

*И.Г. ЕНДЖИЕВСКАЯ, А.В. ДЕМИНА, М.А. ГАЛКИН,
Сибирский федеральный университет*

ПРИМЕНЕНИЕ СУБМИКРОННЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЦЕМЕНТНЫЕ РАСТВОРЫ

Аннотация. В связи с повышенным круглогодичным образованием отходов крупных промышленных предприятий, актуальной является разработка материалов и технологий, которые эффективно переводят их в повторный жизненный цикл.

Предложен способ переработки фторуглеродсодержащих отходов (ФУС) (АО «РУСАЛ Красноярск») с получением углерода субмикронной размерности в виде водоугольной суспензии для модификации растворов и/или бетонов. Полученные данные физико-механических характеристик цементно-песчаного раствора подтверждают возможность применения предложенных модификаторов, запускающих механизмы, приводящие к получению материалов с высокой прочностью при изгибе в ранние сроки для снижения трещинообразования, особенно в тонких слоях бетона (раствора) при большой площади покрытия.

Образцы растворов с добавкой водоугольной суспензии были исследованы методами электронной микроскопии, термогравиметрии и рентгенофазового анализа.

Установлено, что углерод в водоугольной суспензии представлен плоскими пластинами, размер его частиц соответствует субмикронному диапазону. Степень гидратации цемента повышается в присутствии добавки, свидетельствуя об упрочнении структуры материала, что согласуется с результатами испытаний на прочность. Наблюдается рост и утолщение игольчатых спиц-кристаллов гидросиликатов кальция, что подтверждает предположение об увеличении степени гидратации в присутствии субмикронных частиц углерода.

Ключевые слова: фторуглеродсодержащий отход, раствор, частицы углерода субмикронной размерности, углерод техногенный, водоугольная суспензия

Для цитирования: Енджиевская И.Г., Демина А.В., Галкин М.А. Применение субмикронных добавок на основе отходов промышленности в цементные растворы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 114–127.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-114-127

I.G. ENDZHIEVSKAYA, A.V. DEMINA, M.A. GALKIN,
Siberian Federal University

INDUSTRIAL WASTE-BASED SUBMICRON ADDITIVES IN CEMENT MORTARS

Abstract. Purpose: The aim of this work is the development of materials and technologies, which provide their repeated life cycle. **Methodology/approach:** Scanning electron microscopy, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction analysis. **Research findings:** The processing method is proposed for fluorocarbon-containing waste (RUSAL, Krasnoyarsk) resulting in the formation of submicron-sized carbon in the form of a coal-water slurry for solution and/or concrete modification. It is shown that carbon in the coal-water slurry represents flat plates with the submicron-sized particles. The degree of cement hydration increases with the addition of wastes, indicating the material strengthening, which is consistent with the results of strength tests. The acicular spike crystals of hydrated calcium silicates become larger and thicker, that confirms the assumption that hydration increases with the addition of submicron-sized carbon particles. **Practical implications:** The obtained physical and mechanical properties of the cement-sand mortar show the possibility of using the proposed modifiers in the production of materials with high bending strength at early stages to reduce cracking, especially in thin concrete layers with a large coverage area.

Keywords: fluorocarbon-containing waste, solution, submicron carbon particles, technogenic carbon, coal-water slurry

For citation: Endzhievskaya I.G., Demina A.V., Galkin M.A. *Primenenie submikronnykh dobavok na osnove otkhodov promyshlennosti v tsementnye rastvory* [Industrial waste-based submicron additives in cement mortars]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022. V. 24. No. 3. Pp. 114–127.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-114-127

При производстве алюминия на предприятии АО «РУСАЛ Красноярск» методом электролитического восстановления окиси алюминия или глинозема, растворенной в расплаве на основе криолита, образуются отходы с высоким содержанием углерода.

Содержание фтора в этих отходах колеблется от 9 до 26 %. В результате шламовые поля завода интенсивно заполняются и, как следствие, требуют постоянной чистки или реконструкции. Помимо этих затрат существует ряд обязательных экологических платежей за размещение отходов. При этом экологическая напряженность в регионе не снижается, а с каждым годом растет, что требует незамедлительных решений по разработке и внедрению безотходной технологии на заводах алюминиевого производства [1].

Классическая схема производства вторичного криолита – это флотация угольной пены и переработка растворов мокрой газоочистки с получением регенерационного продукта. Но эти процессы незамкнутые: их побочными продуктами являются хвосты флотации и шламы газоочистки, которые и складываются в накопителях. Проблеме обезвреживания и использования фторсодержащих отходов и возвращения фтора в производство уделяется большое внимание [2]. В литературе [3–7] представлены способы переработки данных отходов, минус которых в том, что конечным продуктом является фторсодержащий раствор, а не конкретный продукт.

В связи с повышенным круглогодичным образованием подобных отходов, актуальной является разработка материалов и технологий, которые эффективно переводят их в повторный жизненный цикл [5]. Ранее авторами разработан способ переработки отхода с получением минерализатора для цементной промышленности – CaF_2 [8]. Также предложен способ разложения отхода на фторсодержащий раствор и углеродную часть, которая может быть использована в качестве субмикронных добавок в цементные растворы и/или бетоны.

Бетон – второй по популярности ресурс в мире после воды [9]. Большинство инфраструктур создано из бетона. Однако из-за деградации бетонных материалов, сложного взаимодействия между цементным камнем и эксплуатационной средой, отсутствия современных инструментов проектирования, оценки состояния и своевременного обслуживания многие конструкции находятся в состоянии полного износа, и требуются значительные усилия для их восстановления.

За счет включения некоторых углеродных нано- и субмикронных наполнителей в виде волокон и трубок в обычный бетон можно улучшить его механические свойства и долговечность [10].

В последние годы некоторые исследователи начали использовать технический углерод [11] для изготовления чувствительных к давлению материалов на основе цемента. Графитовые порошки применяются для приготовления умного бетона, поскольку они легко смешиваются с цементом. Добавление их в значительном количестве приводит к резкому снижению механических свойств [12], поэтому для повышения характеристик материалов на основе цемента требуется небольшой расход углеродных волокон. На сегодняшний день очень мало информации о комплексном влиянии углеродных и графитовых волокон на физико-механические свойства цементных композитов [13].

Однако преимуществом армирования цементов нано- и микроволокнами углерода является то, что при разных расходах, от низких до высоких, они обеспечивают механизмы, приводящие к получению материалов с высокой прочностью при изгибе [14].

Исследователями было установлено, что в зависимости от объемной доли и типа волокна могут быть созданы композиты с заданной комбинацией прочности на первую трещину, упрочнения при растяжении и постпиковой пластичностью.

С учетом разнообразия технологических приемов микроармированные вяжущие композиты могут получить широкое применение. Эти материалы с высокими механическими свойствами обеспечат долговечность при жестких нагрузках и условиях окружающей среды [14]. Традиционно получение таких бетонов было связано с добавлением многослойных углеродных нанотрубок [15], сажи [16], наночастиц оксида железа [17], порошков никеля, графита. Сфера применения этих материалов довольно обширна – от тротуарной плитки [18] до конструкций особо ответственных сооружений [19]. Однако углеродные органические материалы снижают прочность цементного камня. Так, при объемном содержании технического углерода более 30 % происходит полная потеря механической прочности бетона. Одним из решений этой проблемы является уменьшение размеров и расходов углеродных материалов.

В этом плане интересно использование углеродных наночастиц с высокой удельной поверхностью – трубок, пластин.

В работе исследовали характеристики раствора (мелкозернистого бетона) цементно-песчаной стяжки с применением добавки углерода субмикронной размерности, полученного из фторуглеродсодержащего отхода. Требования, предъявляемые к стяжке, – это не только прочность на сжатие, но и растяжение при изгибе, поскольку она служит для выравнивания поверхности нижерасположенного слоя пола или перекрытия и укладывается тонким слоем, т. е. площадь поверхности весьма значительна по отношению к толщине слоя, в связи с чем вероятность образования трещин довольно высокая.

Целью работы является исследование возможности применения модификаторов на основе углерода субмикронной размерности в виде ВУС, полученных из фторуглеродсодержащего отхода (ФУС) (АО «РУСАЛ Красноярск»), для получения материалов с высокой прочностью при изгибе в ранние сроки и снижения трещинообразования, особенно в тонких слоях бетона (раствора) при большой площади покрытия, например для стяжки пола и кровли.

В исследовании использовали фторуглеродсодержащий отход, предоставленный предприятием АО «РУСАЛ Красноярск», портландцемент ЦЕМ I 32,5 Н Красноярского цементного завода, заполнитель – кварцево-полевошпатовый песок месторождения пгт Березовка с модулем крупности 2,2, суперпластификатор Centrament № 10 производства MC-Bauchemie.

Порошковые рентгенограммы отхода ФУС снимали при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (фирмы Bruker), линейный детектор VANTEC. Длина волны излучения (CuK_α) равна 1,54 Å. Идентификация материалов проводилась с использованием информационно-поисковой системы (ИПС ФИ).

Термограммы получали на приборе синхронного термического анализа SDT-Q600 TA Instruments thermal analyzer с ИК приставкой Nikolet 380 в атмосфере аргона. Нагревание проводили в интервале температур от 0 до 1000 °С со скоростью 10 К/мин.

Частицы углерода субмикронной размерности на основе водоугольной суспензии (ВУС) для модификации цементных систем получали обработкой отхода ФУС 2%-м раствором NaOH в соотношении 1:9 и нагревали при $t = 60\text{--}80$ °С в течение 1 ч, далее осадок промывали водой до $\text{pH} = 7$. В осадок добавляли воды в соотношении 1:10 (осадок : вода) и фильтровали на вакуумном фильтре с воронкой Шотта (100 мкм). Концентрацию углеродных частиц в фильтрате определяли методом сухого остатка. Размер частиц углерода в ВУС соответствует субмикронной размерности. Раствор после обработки отхода раствором щелочи в дальнейшем обрабатывали 2%-м раствором щавелевой кислоты и CaCl_2 для получения криолита, который далее подвергался термической обработке при 900 °С с получением минерализатора (CaF_2).

В ходе исследования изготовлены образцы цементно-песчаного раствора состава 1:3 в форме балок размером 40×40×160 мм для определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе. В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 32,5Н, заполнитель – кварцево-полевошпатовый песок с модулем крупности 2,2. Для снижения водопотребности применяли

добавку суперпластификатор Centrament № 10. ВУС добавляли в количестве 0,01, 0,05, 0,1 % от массы цемента, образцы сравнивали с контрольным составом. Образцы хранились в условиях нормальной влажности. Испытания прочности на изгиб проводились с использованием испытательной машины ИП-100 (Россия) с усилием 100 кН. Далее образцы испытывали на сжатие, используя металлические пластины площадью 25 см² с применением испытательной машины МС-500 (Россия) с усилием 500 кН. Для достоверности результатов испытания проводились в трех параллелях.

Микроструктура поверхности образцов цементно-песчаного раствора исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа JEOLJSM-7001F в режиме вторичных электронов (seі). Исследование элементного состава образцов осуществлялось методами микрорентгеноспектрального анализа (EDS) в растровом электронном микроскопе JEOLJSM-7001F. Обработка данных элементного анализа проводилась в программе SmartMap.

Отход ФУС исследовали для установления состава и его стабильности. Рентгенограмма представлена на рис. 1.

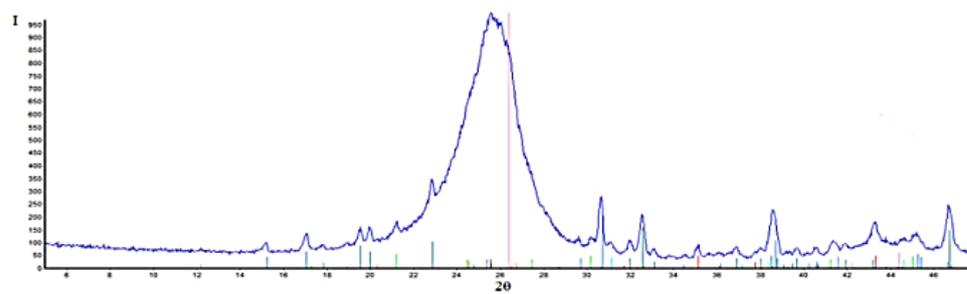


Рис. 1. Рентгенограмма отхода ФУС

Пробы для анализов были отобраны в пяти параллелях для нескольких партий отхода, которые усреднялись квартованием. Результаты рентгенофазового и элементного анализов отхода ФУС представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты рентгенофазового анализа отхода ФУС

Формула	Название минерала	% масс.
Al_2O_3	Корунд	2,4
Na_3AlF_6	Криолит	15,3
$Na_5Al_3F_{14}$	Хиолит	9
$Na_2Ca_3Al_2F_{14}$	Вернеит	3,0
$NaCa(AlF_6)$	Томсенолит	2,2
K_2NaAlF_6	Эльпасолит	0,9
C	Графит	67,1

Таблица 2

Результаты элементного анализа отхода ФУС

Концентрация элемента, % масс.						
O	C	Al	Na	Ca	F	K
1,1	67,1	5,5	7,9	1,2	16,8	0,3

Было исследовано термическое поведение отхода ФУС. Из кривой термогравиметрического анализа (рис. 2) следует, что вещество устойчиво до 550 °С. На стадии термолитиза в температурном интервале 550–1000 °С происходит окислительное разложение вещества с выделением CO₂, что подтверждается результатами ИК-спектроскопического анализа отходящих газов. Потере массы при 725 и 948 °С соответствуют экзоэффекты, а при 929 °С наблюдается эндоэффект.

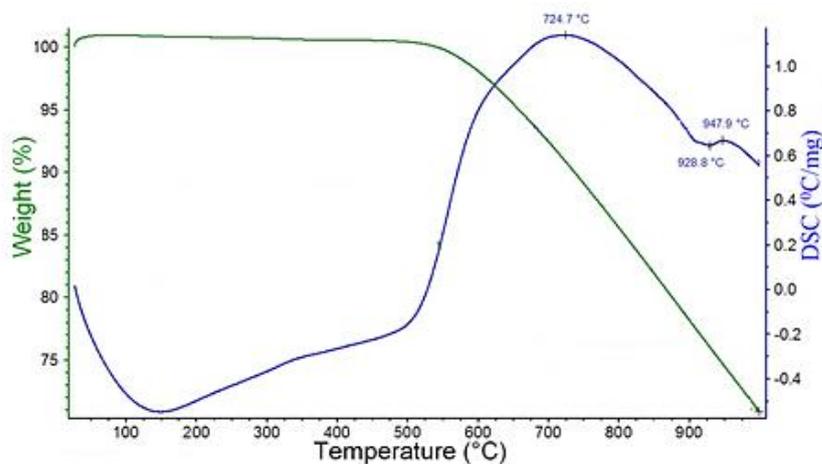


Рис. 2. Термограмма отхода ФУС

Частицы углерода в ВУС были исследованы методом электронной микроскопии. Размер частиц углерода в ВУС соответствует субмикронному диапазону (рис. 3).

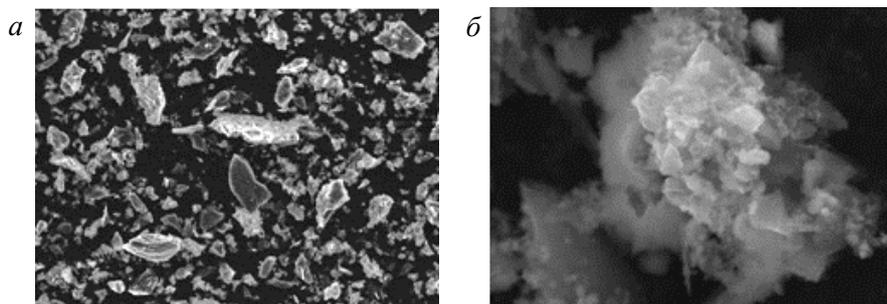


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поверхности частиц углерода в ВУС:
а – ×500; б – ×10 000

Были сняты спектры отдельных частиц для получения элементного состава (рис. 4, табл. 3). По данным спектра 1 вещество состоит на 99 % из углерода, можно утверждать, что его частицы представлены плоскими пластинами.

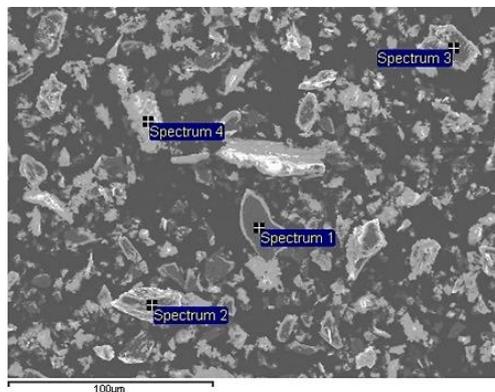


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности частиц углерода в ВУС

Таблица 3

Элементный состав частиц углерода

Спектр	Содержание элемента, ат. %										
	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Спектр 1	99,17	–	0,49	–	–	–	–	0,35	–	–	–
Спектр 2	89,76	6,40	1,93	0,20	–	1,08	–	0,16	0,07	0,39	–
Спектр 3	69,01	17,67	4,69	0,74	0,43	3,12	0,36	0,89	–	1,25	1,85
Спектр 4	72,87	16,81	2,98	0,56	0,19	4,59	0,25	0,60	0,13	0,48	0,55

Физико-механические характеристики образцов цементно-песчаного раствора с добавкой ВУС оценивали в сравнении с контрольным составом. Проводили определение диаметра расплыва растворной смеси на встряхивающем столике с числом встряхиваний 15 за рабочий цикл (рис. 5). Как видно из графика, введение ВУС изменяет свойства растворной смеси.

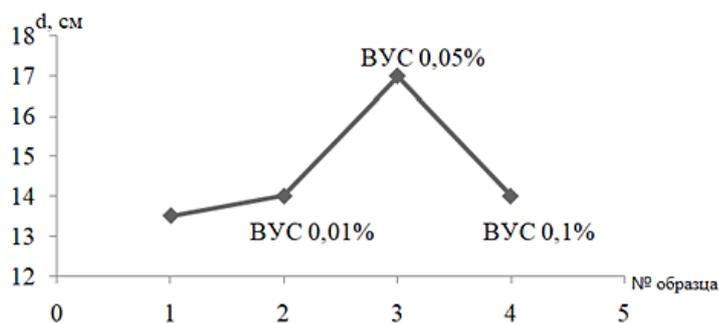


Рис. 5. Определение расплыва раствора на встряхивающем столике с числом встряхиваний 15 за рабочий цикл

Во всех образцах с добавкой ВУС наблюдалось возрастание прочности при изгибе с сохранением постоянной прочности при сжатии (рис. 6 и 7, табл. 4). Испытание прочности в ранние сроки – 3 сут – показало, что в образце с содержанием ВУС 0,1 % прочность при изгибе возрастает на 48,9 % относительно контрольного образца, а в возрасте 28 сут – на 21,7 %.

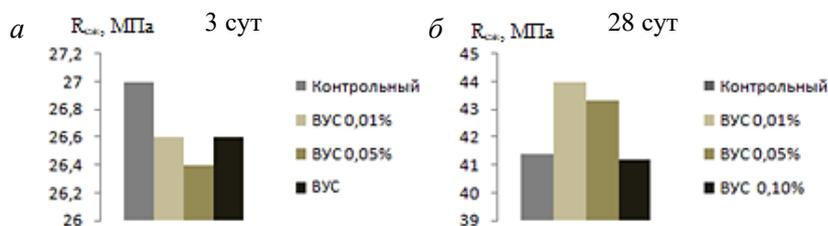


Рис. 6. Результаты испытаний прочности на сжатие:
а – 3 сут; б – 28 сут



Рис. 7. Результаты испытаний прочности на растяжение при изгибе:
а – 3 сут; б – 28 сут

Таблица 4

Результаты испытаний прочности

№ образца	Расход добавки ВУС в составе, %	Возраст, сут	Прочность на сжатие, МПа	Растяжение при изгибе, МПа
1	Контрольный, 0	3	27,0	1,76
		28	41,4	5,75
2	0,01	3	26,6	1,88
		28	44,0	5,80
3	0,05	3	26,4	1,85
		28	43,3	6,15
4	0,1	3	26,6	2,62
		28	41,2	7,0

Был проведен термогравиметрический анализ образцов. Во всех образцах наблюдается три эндозффекта в районе 135–145, 470–485 и 765–775 °С. Потеря массы модифицированных образцов выше относительно контрольного образца (табл. 5), в связи с чем можно предположить, что степень гидратации цемента повышается, свидетельствуя об упрочнении структуры материала, что согласуется с результатами испытаний на прочность.

Таблица 5

Результаты термогравиметрического анализа

Возраст, сут	Контрольный		ВУС 0,01 %		ВУС 0,05 %		ВУС 0,1 %	
	3	28	3	28	3	28	3	28
Эндоэффект 1, °С	138,7	139,3	139,2	144,6	140,2	142,7	136,4	139,9
Потеря массы 1, %	2,75	3,02	2,99	3,42	3,12	3,54	3,53	3,97
Эндоэффект 2, °С	480,2	478,9	480,3	476,6	481,2	474,3	481,5	482,9
Потеря массы 2, %	0,58	0,72	0,62	0,64	0,75	0,99	0,78	0,85
Эндоэффект 3, °С	762,9	771,9	767,4	768,1	769,7	772,3	769,1	771,9
Потеря массы 3, %	1,89	2,32	2,18	2,57	2,63	2,42	2,11	2,25
Остаточная масса, %	93,95	93,05	93,35	93,21	92,51	91,93	92,65	91,94

На термограмме (рис. 8) представлены контрольный образец (зеленая кривая) и с частицами углерода субмикронной размерности на основе ВУС 0,1 % (красная кривая). Как видно из рис. 8, идет рост интенсивности эндоэффекта в районе 480 °С, что также указывает на более глубокую гидратацию.

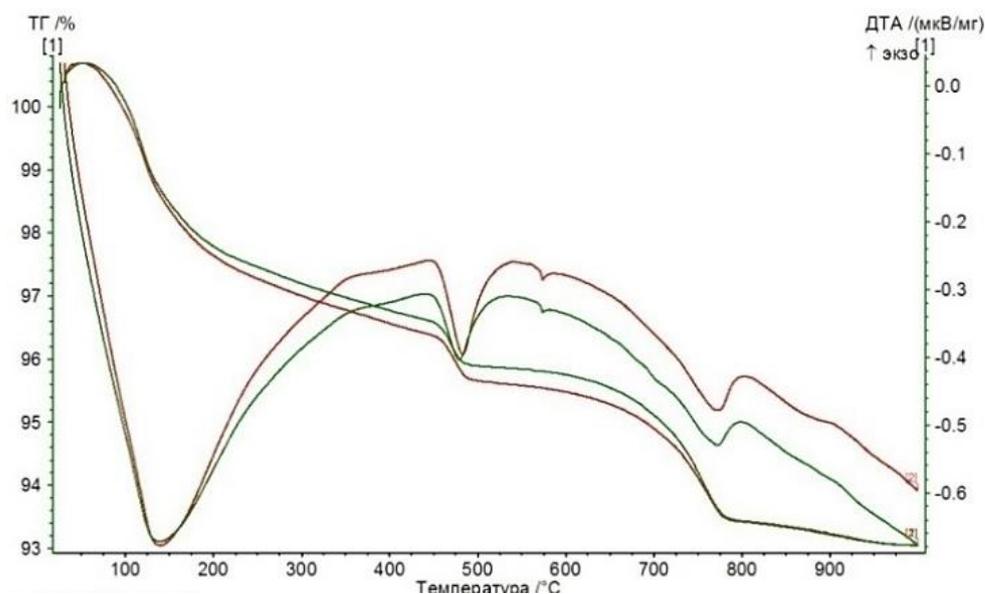


Рис. 8. Термограмма контрольного образца (зеленая кривая) и ВУС 0,1 % (красная кривая)

Образцы контрольного состава и с добавкой частиц углерода субмикронной размерности на основе ВУС 0,1 % исследованы методом электронной микроскопии. Как видно из рис. 9, наблюдается рост и утолщение игольчатых спиц-кристаллов гидросиликатов кальция, что подтверждает предположение об увеличении степени гидратации в присутствии субмикронных частиц углерода в виде ВУС 0,1 % относительно контрольного образца.

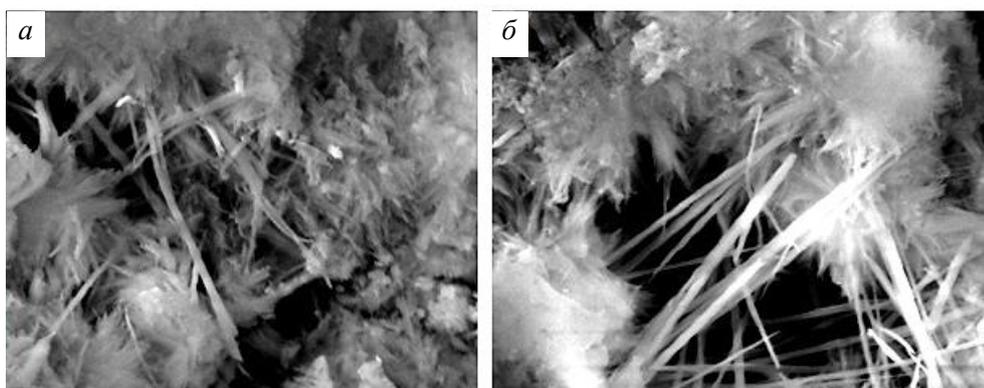


Рис. 9. Изображение затвердевшего цементного раствора:
 а – контрольный образец ($\times 20000$); б – ВУС 0,1 %

Были сняты спектры отдельных точек и областей (рис. 10, табл. 6, 7) с исследуемой поверхности раствора контрольного образца и с добавкой субмикронных частиц углерода в виде ВУС 0,1 %.

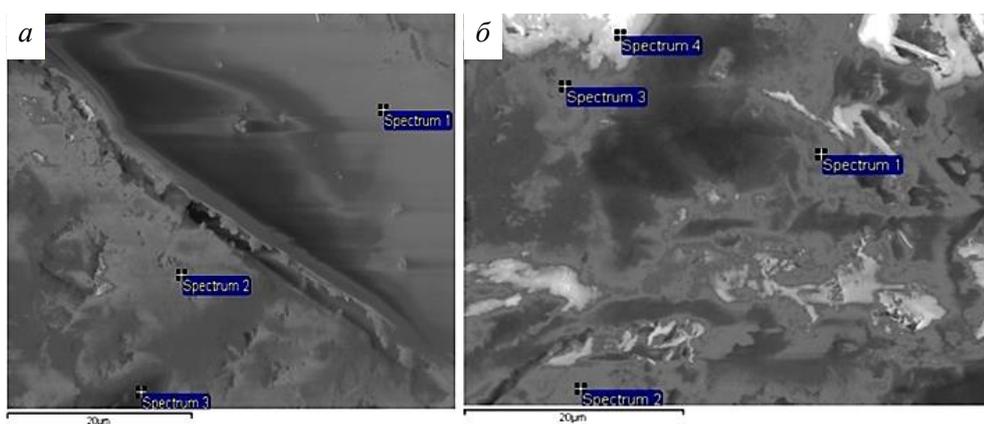


Рис. 10. Электронно-микроскопическое изображение поверхности контрольного образца (а); ВУС 0,1 % (б)

Таблица 6

Элементный состав контрольного образца раствора

Спектр	Содержание элемента, ат. %								
	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Спектр 1	–	44,65	–	–	48,18	–	–	7,17	–
Спектр 2	6,13	55,33	1,09	1,57	11,58	2,00	–	21,59	0,71
Спектр 3	9,84	67,89	–	1,41	8,38	0,68	0,21	11,32	0,27

Таблица 7

**Элементный состав раствора с добавкой частиц углерода
в виде ВУС 0,1 %**

Спектр	Содержание элемента, ат. %								
	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Спектр 1	9,36	60,99	0,59	1,86	10,96	0,94	–	15,30	–
Спектр 2	3,39	58,09	0,55	0,39	9,82	-	0,34	27,42	–
Спектр 3	3,65	42,91	1,46	2,74	13,28	2,31	–	32,48	1,16
Спектр 4	6,84	55,34	0,74	1,60	9,53	1,53	0,29	23,29	0,82

Образцы раствора были исследованы методом рентгенофазового анализа. Результаты качественного рентгенофазового анализа представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты качественного рентгенофазового анализа образцов раствора

Образец	Состав
Контрольный	SiO ₂
ВУС 0,01 %	Ca(OH) ₂
ВУС 0,05 %	Na _{0,685} Ca _{0,347} Al _{1,46} Si _{2,54} O ₈
ВУС 0,1 %	MgSiO ₃
	CaMgCO ₃

В результате исследования установлено, что углерод в ВУС представлен плоскими пластинами, размер его частиц соответствует субмикронному диапазону. Во всех образцах с добавкой ВУС наблюдается возрастание прочности при изгибе с сохранением постоянной прочности при сжатии. Степень гидратации цемента повышается в присутствии добавки, свидетельствуя об упрочнении структуры материала, что согласуется с результатами испытаний на прочность. Наблюдается рост и утолщение игольчатых спиц-кристаллов гидросиликатов кальция, что подтверждает предположение об увеличении степени гидратации в присутствии субмикронных частиц углерода.

Выводы

Предложен способ переработки отходов ФУС с получением углерода субмикронной размерности в виде ВУС для модификации растворов и/или бетонов. Полученные данные физико-механических характеристик цементно-песчаного раствора подтверждают возможность применения предложенных модификаторов, запускающих механизмы, приводящие к получению материалов с высокой прочностью при изгибе в ранние сроки для снижения трещинообразования, особенно в тонких слоях бетона (раствора) при большой площади покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зельберг Б.И., Рагозин Л.В., Баранцев А.Г. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе. Санкт-Петербург : Изд-во МАНЭБ, 2013. 676 с.

2. Baranova A.N., Gavrilenkob L.V., Morenkoc A.V., Gavrilenkod A.A., Timkinaa E.V., Yakushevich P.A. Production of the Calcium Fluoride From Solid and liquid Wastes of Aluminum Production Process // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. V. 4. P. 468–474.
3. Kani E.N., Allahverdi A. Fast set and high early strength cement from limestone, natural poz-zolan, and fluorite // International Journal of Civil Engineering. 2010. V. 8 (4). P. 362–369.
4. Menéndez E., Glasser F.P., Aldea B., Andrade C., Zimmermann Y.C. Effects of the incorpora-tion of aluminum fluoride mineralizers in Portlandcement clinker phases // National Council for Cement and Building materials. 2016.
5. Maheswaran S., Kalaiselvam S., Karthikeyan S.K., Kokila C., Palani G.S. β -belite cements (β -dicalcium silicate) obtained from calcined lime sludge and silica fume // Cement and Con-crete Composites. 2016. V. 66. P. 57–65.
6. Sarmah S., Saikia J., Bordoloi D.K., Kalita P.J., Bora J.J., Goswamee R.L. Immobilization of fluoride in cement clinkers using hydroxyl-alumina modified paddy husk ash based adsor-bent // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2018. V. 93 (2). P. 533–540.
7. Welch B.J. Aluminium production paths in the new millennium // JOM. 1999. V. 51 (5). P. 24–28.
8. Endzhievskaya I.G., Demina A.V., Lavorenko A.A. Synthesis of a mineralizing agent for Port-land cement from aluminum production waste // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 945. P. 012062.
9. Han B., Ding S., Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review // Measurement. 2015. V. 59. P. 110–128.
10. Fiala L., Toman J., Vodička J., Ráček V. Experimental Study on Electrical Properties of Steel-fibre Reinforced Concrete // Procedia Engineering. 2016. V. 151. P. 241–248.
11. Xi L., Mingqing S., Zhuoqiu L. Piezo-resistiveEffects in Carbon Black-filled Cement-matrix Nanocomposites // Journal of Wuhan University of Technology. 2008. V. 30 (3). P. 57–59.
12. Suping C., Yongxiao L., Mingzhang L. Preparation and Properties of Graphite-cement Based Composites // Journal of the Chinese Ceramic Society. 2007. V. 35 (1). P. 91–95.
13. Fan X., Fang D., Sun M., Li Z. Piezoresistivity of carbon fiber graphite cement-based compo-sites with CCCW // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2011. V. 26 (2). P. 339–343.
14. Banthia N., Djeridane S., Pigeon M. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber rein-forced cements // Cement and Concrete Research. 1992. V. 22 (5). P. 804–814.
15. Han B., Yu X., Kwon E., Ou J.P. Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cementcomposites // J. Comp.Mater. 2012. V. 46 (1). P. 19–25.
16. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S., Pankin N.A. Fine-grained fibre concretes modified by complexed nanoadditives // International Journal of Nanotechnology (IJNT). 2017. V. 14. P. 7–8.
17. Vipulanandan C., Mohammed A. Smart cement modified with iron oxide nanoparticles to en-hance the piezoresistive behavior andcompressive strength for oil well applications // Smart Mater. Struct. 2015. V. 24 (12). P. 1–11.
18. Usanova K., Rybakov V., Udalova V., Kovytkov A. Examination of Quality and Operational Properties of Vibropressed Paving Elements // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 73. P. 040131.
19. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S., Svintsov A.P., Ivanov I.A. Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles, Magazine of Civil Engineering. 2019. V. 92 (8). P. 163–172.

REFERENCES

1. Zelberg B.I., Ragozin L.V., Barantsev A.G. Spravochnik metallurga. Proizvodstvo alyuminiya i splavov na yego osnove [Metallurgist's guide. Production of aluminum and aluminum-based alloys]. Saint-Petersburg: MANEB, 2013. 676 p. (rus)
2. Baranova A.N., Gavrilenkob L.V., Morenkoc A.V., Gavrilenkod A.A., Timkinaa E.V., Yakushevich P.A. Production of the calcium fluoride from solid and liquid wastes of aluminum produc-tion process. *Engineering & Technologies*. 2015. V. 4. Pp. 468–474.

3. Kani E.N., Allahverdi A. Fast set and high early strength cement from limestone, natural poz-zolan, and fluorite. *International Journal of Civil Engineering*. 2010. V. 8(4). Pp. 362–369.
4. Menéndez E., Glasser F.P., Aldea B., Andrade C., Zimmermann Y.C. Effects of the incorporation of aluminum fluoride mineralizers in Portland cement clinker phases. *National Council for Cement and Building Materials*. 2016.
5. Maheswaran S., Kalaiselvam S., Karthikeyan S.K., Kokila C., Palani G.S. β -belite cements (β -dicalcium silicate) obtained from calcined lime sludge and silica fume. *Cement and Concrete Composites*. 2016. V. 66. Pp. 57–65.
6. Sarmah S., Saikia J., Bordoloi D.K., Kalita P.J., Bora J.J., Goswamee R.L. Immobilization of fluoride in cement clinkers using hydroxyl-alumina modified paddy husk ash based adsorbent, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2018. V. 93(2). Pp. 533–540.
7. Welch B.J. Aluminium production paths in the new millennium. *JOM*. 1999. V. 51(5). Pp. 24–28.
8. Endzhievskaya I.G., Demina A.V., Lavorenko A.A. Synthesis of a mineralizing agent for Portland cement from aluminum production waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 945. 012062.
9. Han B., Ding S., Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*. 2015. V. 59. Pp. 110–128.
10. Fiala L., Toman J., Vodička J., Ráček V. Experimental study on electrical properties of steel-fibre reinforced concrete. *Procedia Engineering*. 2016. V. 151. Pp. 241–248.
11. Xi L., Mingqing S., Zhuoqiu L. Piezo-resistive effects in carbon black-filled cement-matrix nanocomposites. *Journal of Wuhan University of Technology*. 2008. V. 30 (3). Pp. 57–59.
12. Suping C., Yongxiao L., Mingzhang L. Preparation and properties of graphite-cement based composites. *Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2007. V. 35 (1). Pp. 91–95.
13. Fan X., Fang D., Sun M., Li Z. Piezoresistivity of carbon fiber graphite cement-based composites with CCCW. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2011. V. 26 (2). Pp. 339–343.
14. Banthia N., Djeridane S., Pigeon M. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete Research*. 1992. V. 22 (5). Pp. 804–814.
15. Han B., Yu X., Kwon E., Ou J.P. Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites. *Journal of Composite Materials*. 2012. V. 46 (1). Pp. 19–25.
16. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S., Pankin N.A. Fine-grained fibre concretes modified by complexed nanoadditives. *International Journal of Nanotechnology (IJNT)*. 2017. V. 14. Pp. 7–8.
17. Vipulanandan C., Mohammed A. Smart cement modified with iron oxide nanoparticles to enhance the piezoresistive behavior and compressive strength for oil well applications. *Smart Materials and Structures*. 2015. V. 24 (12). Pp. 1–11.
18. Usanova K., Rybakov V., Udalova V., Kovytkov A. Examination of quality and operational properties of vibropressed paving elements. *MATEC Web of Conferences*. 2016. V. 73. 040131.
19. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S., Svintsov A.P., Ivanov I.A. Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. V. 92 (8). Pp. 163–172.

Сведения об авторах

Енджиевская Ирина Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, icaend@mail.ru

Демина Анастасия Вадимовна, аспирант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, Nastia_95@mail.ru

Галкин Максим Андреевич, аспирант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, gal.maksim2014@yandex.ru

Authors Details

Irina G. Endzhevskaya, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, icaend@mail.ru

Anastasia V. Demina, Research Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia

Maksim A. Galkin, Research Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, gal.maksim2014@yandex.ru