

Применение клетчатки в производстве строительных изделий

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Романенко

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Целью работы является исследование возможности использования в качестве демпфирующей добавки минерализованной клетчатки в производстве тротуарной плитки и бордюров. Минерализация клетчатки осуществлялась раствором электролита и силикатом натрия. Производилась оценка физических свойств клетчатки и их влияния на физико-механические свойства мелкозернистых бетонов, твердеющих как в нормальных условиях, так и прошедших тепло-влажностную обработку. Выявлено, что прочность бетонов, модифицированных клетчаткой и твердеющих в нормальных условиях, выше бетонов, прошедших тепло-влажностную обработку, на 4,2 %.

Ключевые слова: клетчатка, органические соединения, сахара, цементный клинкер, блокировка, твердение, гидратация, прочность, тротуарная плитка.

Введение

Городская среда обитания неизбежно способствует образованию большого количества ила на площадках, который требует переработки с последующей утилизацией отходов. На данный момент указанная проблема окончательно не решена. При этом в активном иле содержится огромное количество органических и минеральных веществ, а также присутствует патогенная микрофлора. Следовательно, необходимо проведение исследований, результаты которых позволят полученные после переработки активного ила продукт утилизировать, а вредные токсичные вещества подвергнуть уничтожению [1, 2].

Клетчатка образуется в результате обработки активного ила с полей обезвоживания и извлечения аминокислот. После сушки и измельчения клетчатка находится в мелкодисперсном состоянии с удельной поверхностью $S_{уд} = 4000 \div 5000 \text{ см}^2/\text{г}$ и содержит значительную долю органических веществ.

Из-за высокой дисперсности клетчатка интенсивно поглощает влагу, загустевает, превращаясь в пасту, а наличие органических веществ и сахаров оказывает блокирующее действие на гидратацию цементного клинкера [3-5]. Проведенные ранее исследования установили, что предельная дозировка

активного ила и клетчатки в цементные композиции обычно не превышает 5 % от массы портландцемента [6-8].

Для того, чтобы обеспечить бетону высокие эксплуатационные свойства, необходимо сформировать оптимальную структуру цементного камня. Это обусловлено требованиями, предъявляемыми к бетонным конструкциям, условиями твердения и внешними факторами воздействия, включая природные условия [9, 10].

Реальное применение цементных композиций, модифицированных органической добавкой на основе клетчатки, возможно в мелкогабаритных вибропрессовых изделиях, таких, как бордюрные камни, тротуарная плитка различных форм, мелкогабаритные стеновые камни.

Известно [8, 11], что высокая прочность бетона обеспечивается при низких значениях водоцементного отношения ($В/Ц \leq 0,3$) и с использованием виброуплотнения с пригрузом.

Такие строительные изделия, как тротуарные плитки, работают в тяжелых природных условиях при воздействии агрессивных сред, а также испытывают действие изгиба и сжатия. Поэтому к бетону предъявляются высокие требования по прочности на сжатие, водопоглощению, морозо- и солестойкости. Марка бетона по морозостойкости ГОСТ 26633-2015 должна соответствовать не менее F 300 и марке по прочности на сжатие не менее В30.

Материалы и методы

Продукты, полученные после извлечения аминокислот из активного ила городских очистительных систем, например, такие, как клетчатка являются типичными поверхностно-активными веществами, которые существенным образом изменяют энергетические условия взаимодействия частиц минерального вяжущего в высокодисперсных системах в процессе их структурообразования. Органоминеральные вещества одновременно

выполняют роль регуляторов реологических характеристик композиций и модификаторов свойств готовой продукции.

Химический состав клетчатки весьма сложен и включает как минеральные, так и органические вещества (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав клетчатки

рН	Содержание органической части, % от сухого в-ва	Процент от органической части			Процент от неорганической части			
		Липиды	Угле воды	Амино кислоты	Белки	Хло риды	Фос фаты	Суль фаты
6,6÷7,0	75-80	12-16	24-29	3,0-5,0	12-18	50	10	40

Клетчатка образована переплетением относительно толстых гриф толщиной 3÷6 МКм и длиной 10÷60 МКм. После выделения аминокислот из ила и обезвоживания на вакуум-фильтрах, клетчатка представляет собой пасту влажностью 70÷85 %. В таблице 2 представлены основные физические свойства клетчатки.

Таблица 2

Основные физические свойства клетчатки

Наименование	Внешний вид	Общая влага, %	Сухое вещество	Запах	Зольность, %	рН
Клетчатка	Паста зеленовато-коричн. цвета	75-80	20-25	Специфический	18-21	6,6

Клетчатка характеризуется большой влажностью и, вследствие значительного содержания остатков пищевой среды, подвергается анаэробному или аэробному брожению при температуре 20÷25 °С. Величина рН при биологических процессах понижается вследствие накопления органических кислот. Клетчатка, как и большинство высокомолекулярных соединений, способна образовывать пространственные сетки, «загущающие

раствор», в петлях которых находится молекула растворителя, т.е. воды. В результате чего мицелий (клетчатка) способен отбирать воду из системы и создавать отрицательный баланс по содержанию воды [12].

Для длительного хранения клетчатки требуется обработка минерализатором в виде раствора силиката натрия или хлоридом кальция, сушка, измельчение и упаковка в 3 слойные крафт мешки.

С целью определения оптимальной дозировки органического вещества, в мелкозернистые бетоны на основе портландцемента апробировались составы бетонов с дозировкой клетчатки 5, 10, 30 % от массы цемента; изменялась величина В/Ц от 0,22 до 0,6; в качестве гиперпластификатора применяли Sika ViscoCrete-5-600 SP, изучалось влияние электролитов на прочностные свойства бетонов в индивидуальном виде и в комплексе. Для качественного уплотнения бетонная смесь подвергалась вибропрессованию с пригрузом $P = 240 \text{ кг/см}^2$.

В качестве исходных материалов для приготовления бетонов использовали: портландцемент Вольский СЕМ I 42,5N, Старооскольский СЕМ I 42,5N; песок Сурский, рядовой с модулем крупности $M_{кр} = 1,1-1,3$ минерализатор – CaCl_2 и раствор силиката натрия. Наполнение композиционного материала на основе портландцемента осуществлялось клетчаткой. Клетчатка – вторичный материал, получаемый в Санкт-Петербурге на предприятиях ВНИА.

Испытание мелкозернистого бетона на сжатие, водопоглощение, морозостойкость проводили на образцах размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$, $70 \times 70 \times 70 \text{ мм}$ и $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ (ГОСТ 10180-2012 Методы определения прочности по контрольным образцам, ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения, ГОСТ 10060-2012 Методы определения морозостойкости). Результаты испытаний образцов на мелкозернистом бетоне с наполнением клетчаткой в количестве 30 % от массы цемента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства мелкозернистых бетонов на Вольском
портландцементе СЕМ I 42,5N

№ п.п	Ингредиенты, свойства	Расход на 1 м ³ , кг			
		№ состава			
		1	2	3	4
1	СЕМ I 42,5N	600	600	600	600
2	Песок Сурский, рядовой	1500	1300	1000	1040
3	Клетчатка	–	180	180	180
4	Минерализатор, CaCl ₂	–	–	18	20,4
5	Вода	168	204	204	204
6	Водоцементное отношение (В/Ц)	0,28	0,34	0,34	0,34
7	Предел прочности на сжатие в возрасте:				
	3 суток	18,6	0,25	3,05	3,42
	28 суток	48,1	2,0	3,5	5,0
8	Погружение в воду на сутки через 28 суток твердения в камере нормального твердения	–	саморазрушение	–	–

Данные по набору прочности образцов из мелкозернистого бетона в 28 суточном возрасте при хранении в камере нормального твердения (температура $t = 20 \pm 5$ °C, влажность $W = 90 \pm 5$ %, табл. 3) показали, что клетчатка оказывает блокирующее действие на кинетику набора прочности цементного камня при дозировке 30 % от массы цемента и вызывает саморазрушение после погружения в воду через 28 суток. Образцы набухают, увеличиваются в геометрических размерах, происходит миграция частиц клетчатки в воду, в результате чего происходит ее окрашивание в коричневый цвет.

Введение в состав бетона CaCl₂ позволяет повысить прочность композита и обеспечить сохранность образцов после погружения в водопроводную воду на 24 часа (табл. 3). Составы 4 и 5 после погружения в воду не разрушились. Таким образом, дозировка клетчатки в качестве наполнителя минерального композита на основе портландцемента в количестве 30 % от массы вяжущего неприемлемо. Такое количество клетчатки для получения хорошо формирующейся смеси требует большого

количества воды, что негативно сказывается на прочностных показателях бетона.

В дальнейшем рассмотрены составы с дозировкой клетчатки в количестве 5 и 10 % от массы вяжущего. Результаты испытаний мелкозернистых бетонов и их составы представлены в таблице 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства мелкозернистых, мало наполненных бетонов

№ п/п	Ингредиенты, свойства	Расход на 1 м ³ , кг			
		№ состава			
		5	6	7	8
1	СЕМ I 42,5N	600	600	600	600
2	Песок Сурский, рядовой	1500	1300	1000	1040
3	Клетчатка	30	60	30	60
4	Минерализатор: CaCl ₂	–	–	18	20,4
	Силикат натрия, водный раствор	0,15	0,30	–	–
5	Sika ViscoCrete-5-600 SP	3	3	3	3
6	Вода	156	156	156	156
6	Водоцементное отношение (В/Ц)	0,26	0,26	0,26	0,26
7	Предел прочности на сжатие в возрасте:				
	3 суток	24,4	20,0	18,8	14,7
	28 суток	54,9	48,5	39,4	32,6
8	Погружение в воду на сутки через 28 суток твердения в камере нормального твердения	Разрушения нет	Разрушения нет	Разрушения нет	Разрушения нет
9	Окрашивание воды при суточном погружении	нет	светло коричневый	коричневый	темно коричневый

Обсуждение

Полученные результаты показали (табл. 4), что сокращение расхода клетчатки до 5÷10 % от дозировки вяжущего и проведение минерализации самой клетчатки способствует получению качественных и прочных бетонов. Причем, дозировка клетчатки в количестве 5 % обеспечивает после вибропрессования выход более качественных образцов. Так, при их

визуальном осмотре отмечены ровные грани, плотная структура, однородный внешний вид, отсутствие непроформовок. Выявлено, что при погружении в воду не происходит фильтрация органических соединений, что подтверждается окрашиванием воды в коричневый цвет. Погружение на сутки образцов бетона в воду не приводит их саморазрушению.

За счет введения в бетонную смесь гиперпластификатора Sika ViscoCrete-5-600 SP в количестве 0,5% от массы вяжущего удалось снизить потребность воды (табл. 3, 4) и тем самым повысить прочностные показатели.

Таким образом, выявлена особенность формирования мелкозернистых бетонов с модификаторами структуры на основе органических веществ – клетчатки, которая полностью исключает возможность использования традиционных технологий приготовления смесей для изготовления бетонных изделий.

Анализ литературы [13-15] и проведенных исследований с учетом закономерностей перераспределения межклеточной и внутриклеточной влаги клетчатки, находящейся в контакте с минеральными ингредиентами, указывает на необходимость полностью изменить технологию приготовления цементно-песчаных смесей. В связи с этим была предложена отдельная технология приготовления бетонных смесей из мелкозернистого бетона.

На первом этапе производится минерализация клетчатки водным раствором силиката натрия и сушка в распылительной сушилке.

Подготовленные ингредиенты для получения мелкозернистой бетонной смеси затворяются водным раствором гиперпластификатора и перемешиваются до однородного состава в бетоносмесителе принудительного действия в течении 4 мин. Затем вводится нужное количество минерализованной клетчатки и состав перемешивается еще 2 минуты, а в дальнейшем производится вибропрессование с пригрузом 240 кг/см². Для

следующих исследований отобрали состав № 5 (табл. 4). Результаты испытаний представлены в таб. 5.

Таблица 5

Физико-механические свойства мелкозернистых бетонов, прошедших тепловую обработку (ТВО) при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ п/п	Ингредиенты, свойства	Расход на 1 м^3 , кг
		№ состава 5*
1	СЕМ I 42,5N	600
2	Песок Сурский, рядовой	1500
3	Клетчатка	30
4	Силикат натрия, водный раствор	0,15
5	Sika ViscoCrete-5-600 SP	3
6	Вода*(корректировка расхода воды)	132
7	Водоцементное отношение (В/Ц)	0,22
8	Предел прочности на сжатие после ТВО в возрасте 28 суток	52,6
9	Водонасыщение, %	3,86%
10	Морозостойкость, циклы (методика 3)	300

Применение отдельной технологии позволило получить смеси с содержанием клетчатки 5 % и с более низким водоцементным отношением (по сравнению с составом 5, табл. 4), что сказалось на водонасыщении и морозостойкости бетонов для производства тротуарной плитки и бордюров. Клетчатка в данном случае выступает как демпфер и снижает внутренние напряжения при замораживании и оттаивании образцов бетона в солевом растворе.

Выводы:

1. побочный продукт от производства аминокислот из активного ила – клетчатка может использоваться в производстве строительных материалов;
2. применение мелкозернистых бетонов, модифицированных клетчаткой, целесообразно для дорожного строительства, а именно – для производства тротуарной плитки и бордюрного камня;

3. минерализованная клетчатка в бетонной композиции выполняет роль демпфера, что позволяет повысить морозостойкость образцов бетона до F300;

4. использование клетчатки позволяет одновременно решать экологические вопросы по ее утилизации и сокращению полей захоронения промышленных отходов.

Литература

1. Martins A.M., Pagilla K., Heijnen J.J., Van Loosdrecht M.C. Filamentous bulking slug—a critical review // *Water Research*, 2004, vol. 38, № 4, pp. 793-817.

2. Abdul-Malik, Yemen's Q.Y. Water Resources and Treated Wastewater. Sana'a: Ministry of Agriculture and Irrigation of Yemen // *Characteristics and costs of MF and UF plants*, *Journal AWWA*, 1996, pp. 56-58.

3. Nachbaur L., Mutin J. C., Nonat A., Choplin L. Dynam mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting // *Cem. Concrete Res*, 2001, vol. 31, № 2, pp. 72-75.

4. Toutou Z., Roussel N., Lanos C., Mélinge Y., Monnet P., Pantet A., Le Roy R. Rhéologie des suspensions à matrice cimentaire // *Approche expérimentale multi-échelle*, *Rev. Eur. Genie Civ*, 2005, vol. 9, № 3, pp. 142-146.

5. Ahn T-H, Kishi T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures // *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2010; vol. 8, pp. 171-186.

6. Van Tittelboom K, Gruyaert E, Rahier H, de Belie N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation // *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 37, pp. 349-359.

7. Garrett T.M. Jr. Instrumentation, Control and Automation Progress in the United States in the Last 24 Years // Water Science and Technology, 2015, vol. 37, pp. 21-25.

8. Balkema A. Sustainability criteria for the comparison of wastewater treatment technologies // Paper prepared for the Eleventh European Junior Scientist Meeting, The Myth of Cycles versus Sustainable 4. Water and Material Flux Management, Wildpark Eekholt, Germany, 12-15 February 1998, pp. 32-37.

9. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Модифицирование вяжущего тонкомолотыми компонентами // Дневник науки, 2018, № 2 URL: dnevniknauki.ru/index.php/number2-2018/tekhnicheskie-nauki-2-2018.

10. Романенко И.И., Пинт Э.М., Романенко М.И. Деформации цементного камня приводящие к образованию поверхностных трещин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2012, № 4, С. 32-36.

11. Qureshi T, Kanellopoulos A, Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing // Construction and Building Materials, 2018, vol. 192, pp.768-784.

12. Kanellopoulos A, Qureshi TS, Al-Tabbaa A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites // Construction and Building Materials, 2015, vol. 98, pp.780-791.

13. Романенко И.И. Модифицированные шлакощелочные бетоны с добавками побочных продуктов биосинтеза. Автореферат дис. ... кандидата технических наук / Саратовский гос. техн. ун-т. Саратов, 1993, 15 с.

14. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2013/1562.



15. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование // Инженерный вестник Дона, 2021, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076.

References

1. Martins A.M., Pagilla K., Heijnen J.J., Van Loosdrecht M.C. Water Research, 2004, vol. 38, № 4, pp. 793-817.
2. Abdul-Malik, Yemen's Q.Y. Characteristics and costs of MF and UF plants, Journal AWWA, 1996, pp. 56-58.
3. Nachbaur L., Mutin J. C., Nonat A., Choplin L. Cem. Concrete Res, 2001, vol. 31, № 2, pp. 72-75.
4. Toutou Z., Roussel N., Lanos C., Mélinge Y., Monnet P., Pantet A., Le Roy R. Approche expérimentale multi-échelle, Rev. Eur. Genie Civ, 2005, vol. 9, № 3, pp. 142-146.
5. Ahn T-H, Kishi T. Journal of Advanced Concrete Technology, 2010; vol. 8, pp. 171-186.
6. Van Tittelboom K, Gruyaert E, Rahier H, de Belie N. Construction and Building Materials, 2012, vol. 37, pp. 349-359.
7. Garrett T.M. Water Science and Technology, 2015, vol. 37, pp. 21-25.
8. Balkema A. Paper prepared for the Eleventh European Junior Scientist Meeting, The Myth of Cycles versus Sustainable 4. Water and Material Flux Management, Wildpark Eekholt, Germany, 12-15 February 1998, pp. 32-37.
9. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Dnevnik nauki, 2018, № 2 URL: dnevnika.nauki.ru/index.php/number2-2018/tekhnicheskie-nauki-2-2018.
10. Romanenko I.I., Pint E.M., Romanenko M.I. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova, 2012, № 4, pp. 32-36.



11. Qureshi T, Kanellopoulos A, Al-Tabbaa A. Construction and Building Materials, 2018, vol. 192, pp.768-784.

12. Kanellopoulos A, Qureshi TS, Al-Tabbaa A. Construction and Building Materials, 2015, vol. 98, pp. 780-791.

13. Romanenko I.I. Modificirovannye shlakoshchelochnye betony s dobavkami pobochnyh produktov biosinteza. Avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk [Modified slag-alkaline concretes with the possibility of delivering biosynthesis products. Abstract dis. ... candidate of technical sciences]. Saratovskij gos. tekhn. un-t. Saratov, 1993, 15 p.

14. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2013/1562.

15. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 7 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076.