

Жесткие бетонные смеси с добавкой микрокремнезема в производстве тротуарной плитки

С.В. Дружинкин, Е. В. Пересыпкин, О.С. Мицкевич, О.С. Никитина,

Г.В. Василловская, И.В. Мисютина

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: Рассмотрено влияние зернового состава и активной минеральной добавки микрокремнезема на свойства жесткой бетонной смеси. Осуществлен выбор способа производства тротуарной плитки с учетом технологических режимов по технологии вибропрессования. Определена оптимальная дозировка микрокремнезема положительно влияющая на качество бетона.

Ключевые слова: зерновой состав, жесткая смесь, процессы гидратации, микрокремнезем, тротуарная плитка, тяжелый бетон, прочность на сжатие, истираемость.

На сегодняшний день приобрело особую актуальность качество проживания населения в городской среде. Важное значение в передвижении человека в городе носит пешеходная зона в виде благоустроенных площадок и тротуаров. Среди тротуарных покрытий, применяемых на городских улицах, в настоящее время лидирующие позиции занимает искусственная тротуарная плитка, постепенно замещающая асфальтобетонное покрытие. Тротуарная плитка отличается долговечностью, надежностью, большим разнообразием форм, размеров, широким спектром цветов и фактур; они легки в применении, эстетичны, относительно просты в производстве [1, 2].

Показатели качества тротуарной плитки должны удовлетворять требованиям ГОСТ 17608–91: класс по прочности не менее В 22,5; марка по морозостойкости должна соответствовать F200; истираемость бетона должна соответствовать 0,7 г/кв. см.

Бетон является основным материалом для производства тротуарной плитки. Выбор исходных материалов для бетона, таких как: цемент, мелкий и крупный заполнители, тонкомолотые минеральные добавки, химические добавки, их оценка качества является важным этапом в технологическом

процессе изготовления тротуарной плитки, влияющим на условия ее эксплуатации.

Тонкомолотые минеральные добавки разделяют на активные техногенного характера, такие как зола-унос, микрокремнезем, шлаки, они обладают гидравлической активностью, способны вступать во взаимодействие с гидроксидом кальция, содержащимся в цементе, образуя более стойкие и прочные соединения.

Неактивные добавки в эту группу можно отнести тонкомолотые известняки и цеолитсодержащую породу, молотые кварцевые пески, глины. Данный вид добавок не обладает гидравлической активностью, химически не взаимодействуют с составляющими вяжущего, способны придать бетонным смесям пластичность, связность и уплотнить структуру твердеющего бетона, что позволяет уменьшить расход цемента [3-5].

Следует отметить, что изготовление тротуарной плитки осуществляется по двум основным технологиям:

- виброформование из подвижных смесей с применением пластифицирующих добавок, где бетонная смесь укладывается в форму, затем уплотняется посредством простого вибрирования на виброплощадке;

- виброформование с пригрузом (виброштампование) из жестких смесей, где уплотнение верхних слоев смеси производят с применением пригрузочного щита на верхней открытой поверхности формуемого изделия, что значительно сокращает время процесса [6];

- вибропрессование из жесткой смеси с пониженным водоцементным отношением, которая сначала укладывается в пресс-форму, затем уплотняется в направлении движения прессующего штемпеля вибропресса под давлением [7] и вибрацией.

Тротуарная плитка, изготовленная по технологии вибропрессования, имеет точные геометрические размеры, высокую прочность и

морозостойкость, следовательно, высокий срок эксплуатации, чем у плитки, изготовленных по способу виброформования [8].

Выбор материалов для бетона предопределяет его состав, обеспечивающий заданные технические свойства бетона, технологию изготовления тротуарной плитки, а также экономические показатели производства.

Для приготовления бетонной смеси в качестве исходных компонентов применяли следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I–32,5 Н (ГОСТ 31108–2016) ООО «Красноярский цемент»; заполнители Березовского месторождения - природный кварцевый песок с $M_k=2$, содержание пылевидных и глинистых частиц не превышает 2 %, (ГОСТ 8736–2014); щебень фракции 5–10 мм, марка по дробимости 1000 (ГОСТ 26633–2015, ГОСТ 8267–93); активная минеральная добавка микрокремнезем МКУ–85 (ТУ 5743–048–02495332–96, ГОСТ 31108–2016) ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк. Химический состав микрокремнезема, (%): SiO_2 –93,9; MgO –0,81; Na_2O –0,68; K_2O –1,6; Al_2O_3 –0,44; CaO –0,41; CO_3 –0,41; Fe_2O_3 –1,3; ппп–0,45;

Подбор состава тяжелого бетона подбирался расчетно-экспериментальным методом с расчетом расхода материалов на пробные замесы по абсолютным объемам (метод Б.Г. Скрамтаева). Расход компонентов для контрольного состава на 1 м³ бетона составил: портландцемент – 400 кг; песок – 491,1; щебень – 1390,8 кг; вода – 160 л.

Для изучения свойств бетонной смеси и готового бетона были приготовлены жесткие смеси (по метод Скрамтаева ГОСТ 10181–2014) время уплотнения контрольного состава составила 100 сек и $V/Ц=0,4$, эти показатели необходимо соблюдать с учетом технологических режимов изготовления тротуарной плитки по технологии вибропрессования [9].

Особое внимание при подборе состава тяжелого бетона было уделено зерновому составу с оптимальным соотношением заполнителей в смеси.

Для создания подобия процесса виброштампования изделий из жесткой смеси мы использовали лабораторную виброплощадку, стальную калиброванную лабораторную опалубку типа 2ФК-100, пригруз с площадью нагружения 100x100 мм и лабораторный калиброванный разновес для моделирования нагрузки на штамп. Форму устанавливали на виброплощадку, укладывали бетонную смесь в необходимом для формирования количестве, а затем сверху на бетонную смесь укладывали металлическую пластину и пригруз массой 5 кг, таким образом осуществляя уплотнение.

Площадь виброштампа составила:

$$F = ab = 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (1)$$

Уравнение для удельного давления виброштампа на бетон жесткостью 50...200 с [6]

$$p_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{п}} \rho_{\text{б}}}{F} + 0.3 \text{ кПа} \quad (2)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем погружения виброштампа в бетон; $\rho_{\text{б}}$ – средняя плотность бетонной смеси. Допустим, что пластина виброштампа может максимально погружаться на глубину до 50 мм. Тогда среднее удельное давление виброштампования должно быть не меньше

$$p_{\text{уд}} = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot \frac{2450}{0.01} + 300}{1000} = 1.525 \text{ кПа}$$

Полная статическая масса пригруза составит

$$P = p_{\text{уд}} F = \frac{1.525 \cdot 10^{-3} \cdot 0.01}{10} = 1.5 \text{ кг}$$

Принимая во внимание, что закономерность (2) учитывает преимущественно линейный характер развития процесса уплотнения и деформаций в структуре формуемой смеси, то величина статического давления штампа увеличена приблизительно в 3 раза, для учета нарастающих пластических деформаций, тогда необходимая масса пригруза составит не менее 4,5 кг.

В результате проведенных исследований, было установлено, что наибольший показатель прочности бетонных образцов при сжатии на 28 сут. имеет состав №2 ($R_{сж} = 55,5$ МПа) с оптимальным соотношением мелкого и крупного заполнителя 50:50, по сравнению с контрольным составом №1 ($R_{сж} = 50,2$ МПа). Уменьшение доли крупного заполнителя приводит к незначительному снижению прочности бетона состав №3 ($R_{сж} = 52,5$ МПа). Результаты испытания представлены на (рис. 1).

Полученные результаты испытаний можно объяснить тем, что жесткие смеси с низким В/Ц под действием внешних сил хорошо уплотняются и уменьшают первоначально занимаемый ими в рыхлом состоянии объем формы. В процессе уплотнения бетонной смеси зерна крупного заполнителя образуют непрерывный каркас и цементное тесто в смеси распределено равномерно, это приводит к повышению плотности и прочности бетона [10].

В дальнейшем все исследования проводились на составе №2 содержанием заполнителей 50:50.

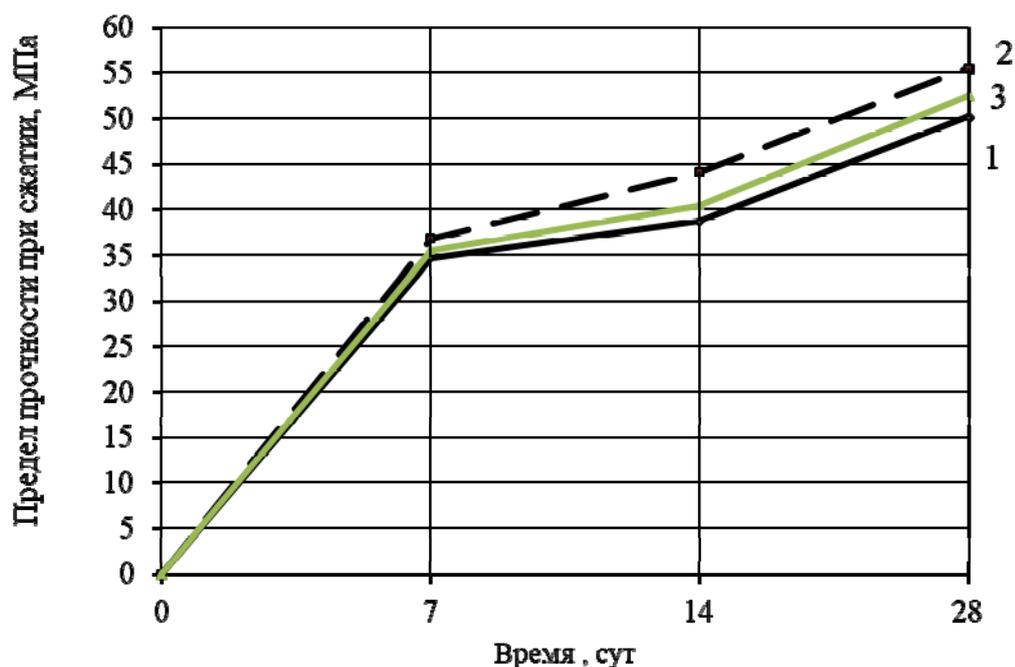


Рис.1. – Предел прочности при сжатии бетонных образцов: 1 – контрольный состав; 2 – состав (соотношение заполнителей 50:50); 3 – состав (соотношение заполнителей 75:25)

Следует отметить, что бетон для тротуарной плитки должен иметь высокую прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, повышенную антикоррозионную стойкость к химическим агрессивным средам и обеспечивать стойкость к истиранию и др., все эти показатели качества бетона можно достичь путем введения микрокремнезема в количестве 5–15 % от массы цемента.

Введение микрокремнезема взамен части вяжущего обусловлено его высокой пуццолановой активностью. Высокая активность микрокремнезема, влияет на процессы гидратации, структура затвердевшего цементного камня и бетона становится более плотной, соответственно идет уменьшение проницаемости бетона, что существенно влияет на морозостойкость, истираемость и долговечность бетона [11].

Установлено, что основным фактором в механизме действия микрокремнезема является реакция взаимодействия диоксида кремния и гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов CSH (I) [11,12].

Известно, что содержание диоксида кремния в микрокремнеземе способствует увеличению количества низкоосновных гидросиликатов кальция, соответственно повышается прочность цементного камня и бетона. Повышение дисперсности микрокремнезема уменьшает капиллярную пористость цементного камня и проницаемость бетона [13].

С увеличением доли микрокремнезема возрастает степень гидратации вяжущего, улучшается сцепление цементного камня с заполнителем в бетоне, за счет перехода извести в стабильные гидросиликаты, увеличивается содержание низкоосновных гидросиликатов кальция, что приводит к повышению прочности бетона в составах № 5 ($R_{сж}=68,0$ МПа) и №6 ($R_{сж}=70,0$ МПа) по сравнению с контрольным №2 ($R_{сж}=55,5$ МПа). Дальнейшее увеличение микрокремнезема взамен части цемента приводит к незначительному повышению прочности бетона, так как идет естественное уменьшение в составе вяжущего минерала C_3A и C_3S . Результаты испытаний представлены на рис. 2.

Долговечность тротуарной плитки напрямую зависит от качества применяемых материалов, способа изготовления и показателя истираемости.

Испытания по истираемости бетонных образцов размером 7X7X7 см проводили на круге истирания с сухим абразивом, согласно требованиям ГОСТ 13087–81. Результаты испытаний по истираемости бетона в составах составили: №3 – 0,25 г/см²; №4 – 0,2 г/см²; №5 – 0,16 г/см²; №6 – 0,15 г/см², все испытываемые составы соответствуют марке G1.

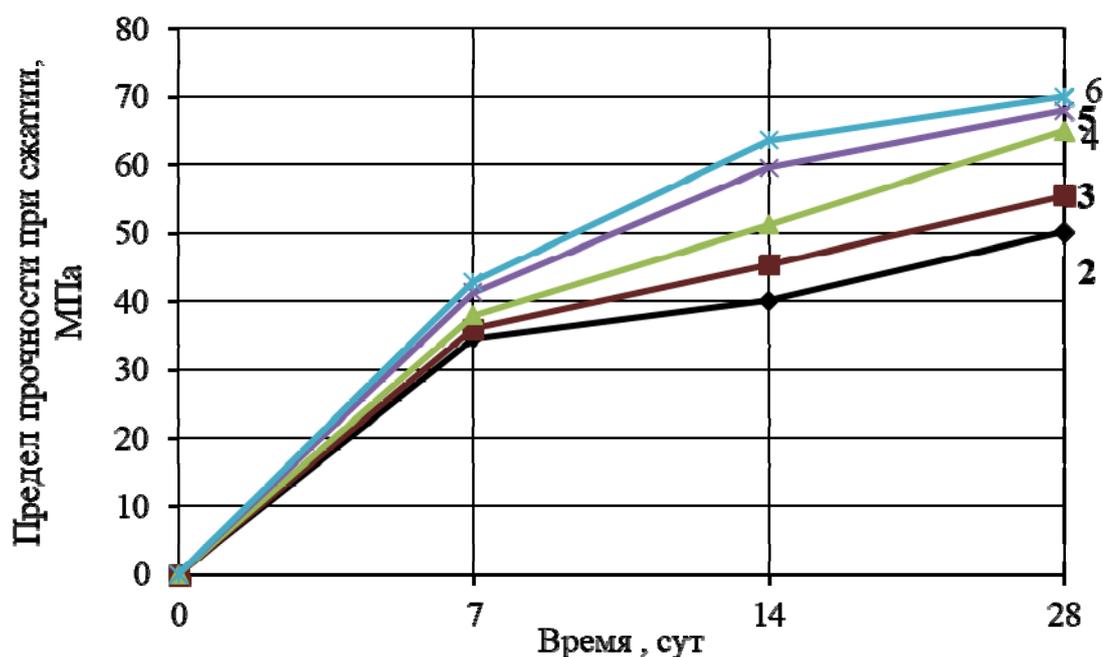


Рис.2. – Влияние микрокремнезема (МК) на прочность бетона:
2 – контрольный состав; 3 – состав МК 5 %; 4 – состав МК 10 %; 5 – состав МК 15 %; 6 – состав МК 20 %

Выявлено, что увеличение содержания низкоосновных гидросиликатов кальция в бетонном камне с добавкой микрокремнезема, увеличивает прочность бетона на 26% по сравнению с контрольным составом.

Таким образом, высокая прочность полученных составов бетона с добавкой микрокремнезема обусловлена:

- высокой активностью микрокремнезема влияющего на процессы гидратации, структурообразования и в дальнейшем на структуру затвердевшего цементного камня и бетона;
- структурообразованием твердеющего бетона, который в результате взаимодействия диоксида кремния добавки и гидроксида кальция цемента становится более плотным;
- возрастанием степени гидратации вяжущего и улучшением сцепления цементного камня с заполнителем в бетоне, за счет перехода извести в стабильные гидросиликаты [14, 15].

Литература

1. Разманкулов Д.Л., Габитов А.И., Чуйкин А.Е., Мунасипов Р.Т. Исторические аспекты производства и использования мелкоштучных бетонных стеновых и дорожных изделий // Башкирский химический журнал. 2006. Том 13 №2 С. 77–83.
 2. Полтояйнен А.И. Современный подход в вопросе штучных цементнобетонных изделий для дорог и тротуаров // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. №2 (19) С. 82–86.
 3. Шляхова Е.А., Шляхов М.А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394.
 4. Дружинкин С.В., Василовская Н.Г., Краснова Е.А., Немыкина Д.А. Влияние тонкомолотой цеолитсодержащей породы на свойства мелкозернистого бетона // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4980.
 5. Высоцкий С.А. Минеральные добавки для бетонов // Бетон и железобетон. 1994. №2. С. 7–10.
 6. Афанасьева В.Ф., Ипполитов Е.Н., Подлубная М.С. Технология железобетонных изделий в примерах и задачах / под ред. Л.Н. Попова – М.: Изд – во Высшая школа, 1987. – 192 с.
 7. Еремин Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов – М.: Высшая школа, 1986. – 280 с.
 8. Бабков В.В., Колесник Г.С., Габтов А.И. и др. Каменные и армокаменные конструкции на основе вибропрессования бетонных изделий. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. –182 с.
 9. Баженов, Ю. М. Технология бетона. – М.: Изд – во АСВ, 2002. – 472 с.
-

10. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Издательство литературы по строительству. 1965. –327 с.

11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на основе бетона // Бетон и железобетон. 1992. №7 С. 5–7.

12. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. Influence of cement stone structure with silica fume and superplasticizer admixtures on concrete strength and permeability // Blended cements in construction - Structural Integrity Research Institute, University of Sheffield, UK, 1991, pp.317-328.

13. Василевская Н.Г., Рубайло И. С., Баранова Г.П., Табакова Н.С. Изучение структуры высокопрочного бетона с комплексными добавками // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии Сб. науч. Тр. Вып. 4 // Под ред. В.Д. Надеяев. – Красноярск: КрасГАСА С. 48–52.

14. Куртович А., Адемич Н. Параметрический анализ воздействия кремнезема на высокопрочный состав бетона. Лекционные заметки в сетях и системах. 76. 2020. С. 514-522.

15. Gaitero, J.J., Campillo, I., Guerrero, A.: Reduction of the calcium-leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. Cem. Concr. 2008. №38. pp. 1112–1118.

References

1. Razmankulov D.L., Gabitov A.I., Chuikin A.E., Munasipov R.T. Historical aspects of the production and use of small-piece concrete walling and road products. Bashkir Chemical Journal. 2006. Vol. 13 No. 2. pp. 77–83.

2. Poltoyajnen A.I. Vesnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura 2015. №2 (19) pp. 82–86.



3. Shlyakhova E.A., Shlyakhov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394.
4. Druzhinkin S.V., Vasilovskaya N.G., Krasnova E.A., Nemykina D.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4980.
5. Vysotsky S.A. Mineralnyye dobavki dlya betonov [Mineral additions for concrete]. Beton i zhelezobeton. 1994. №2. pp. 7–10.
6. Afanasyeva V.F., Ippoloitov E.N., Podlubnaya M.S. Tekhnologiya zhelezobetonnykh izdeliy v primerakh i zadachakh [The technology of reinforced concrete products in cases and exercises]. Popova L.N. M.: Graduate School Publishers, 1987. 192 p.
7. Eremin N.F. Protsessy i apparaty v tekhnologii stroitelnykh materialov [Processes and apparatus in the technology of building materials]. M.: Vysshaya shkola. 1986. 280 p.
8. Babkov V.V., Kolesnik G.S., Gabtov A.I. Kamennyye i armokamennyye konstruksii na osnove vibropressovaniya betonnykh izdeliy [Stone and armo-stone constructions on the basis of vibropressing concrete products. Ufa: Izd-vo «Reaktiv». 2001. 182 p.
9. Bazhenov, Yu. M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. M.: Izd – vo ASV. 2002. 472 p.
10. Gershberg O.A. Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy [Technology of concrete and reinforced concrete products]. M.: Publishing house of literature on construction. 1965. P. 327.
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Krivoborodov Yu.R. Beton i zhelezobeton 1992. №7. pp. 5–7.
12. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. Influence of cement stone structure with silica fume and superplasticizer admixtures on concrete strength and permeability.



Blended cements in construction - Structural Integrity Research Institute, University of Sheffield, UK.1991. pp. 317-328.

13. Vasilovskaya N.G., Rubailo I.S., Baranova G.P., Tabakova N.S. Vestnik Krasnoyarskoj gosudarstvennoj arhitekturno-stroitel'noj akademii Sb. nauch. Tr. Vyp. 4. Pod red.Nadelyaev V.D. Krasnoyarsk: KrasGASA, pp. 48–52.

14. Kurtović, A., Ademović, N. Parametricheskiy analiz vozdeystviya kremnezema na vysokoprochnyy sostav betona [Parametric Analysis of Silica Fume Effects on the High Strength Concrete Composition]. Lekcionnye zametki v setyah i sistemah. [Lecture Notes in Networks and Systems]. 76. 2020. pp. 514-522.

15. Gaitero. J.J. Campillo. I. Guerrero. A.: Cem. Concr. 2008. №38. pp. 1112–1118.