

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА И ДИСПЕРСНОСТИ ЗОЛЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

А.М. Махмудов, Б.Я. Трофимов, Ф.А. Гафоров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Экологические вопросы требуют большого внимания со стороны общественности и экологических организаций. Зола – мелкая, состоящая преимущественно из шарообразных стекловидных частиц, образующаяся при сжигании мелко молотого угля и обладающая пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью. Использование золы в производстве бетона представляет экономичный и экологический способ ее утилизации по сравнению с доменным граншлаком, также распространенной пуццолановой добавкой, золу не нужно гранулировать и размалывать. В этой статье рассмотрена замена части портландцемента отвальной и дополнительно измельченной золой. Уменьшение размера частиц золы приводит к увеличению площади поверхности, в то время как добавление в качестве частичной замены цемента улучшает прочность, долговечность и микроструктурные характеристики цементного камня. Представлены результаты определения физико-химических характеристик цементного камня с различным зольным замещением.

Ключевые слова: зола, цементный камень, пуццолан, прочность, структура гидратных фаз.

Введение

Бетон – это основной строительный материал, который будет пользоваться спросом и в будущем, производится с применением в основном цементов типа ЦЕМ I и ЦЕМ II. Каждая тонна произведенного портландцемента приводит к выбросу в атмосферу в среднем одинакового количества CO_2 – около 6 % всех антропогенных выбросов углерода, что вредно для окружающей среды [1–4].

Следовательно, бетон должен быть изготовлен с минимальным количеством цемента, насколько это возможно и практично. Это может быть достигнуто путем замены части цемента пуццолановыми материалами (промышленными побочными продуктами) тепловых электростанций и металлургической промышленности, особенно золой уноса и доменным шлаком.

Несмотря на растущее значение возобновляемых источников энергии (геотермальной, ветровой и солнечной энергии), доля угля в мировом энергетическом балансе продолжает расти. Поэтому мировое производство угольной золы увеличивается и существует настоятельная необходимость ее переработки и утилизации [5, 6].

В процессах слоевого или факельного сжигания углей на ТЭС образуются газообразные продукты и твердые золошлаковые отходы – золы (размер частиц менее 0,315 мм) и шлаки. Это продукты высокотемпературной (1200–1700 °С) переработки минеральной части топлива [7–9].

Зола состоит в основном из SiO_2 , но может также содержать значительные количества Al_2O_3 . Количество CaO ограничено, но сильно варьируется в зависимости от происхождения летучей золы [10].

Когда зола используется в сочетании с портландцементом, гидроксид кальция, выделяющийся при гидролизе силикатов кальция портландцемента, вступает в реакцию с алюмосиликатным стеклом, присутствующим в золе, с образованием цементных соединений, обладающих когезионными и адгезионными свойствами. Продукты этих реакций, гидросиликаты кальция, зависят от времени, но в основном имеют тот же тип и характеристики, что и продукты гидратации цемента. Однако пуццолановые реакции протекают намного медленнее, чем реакции гидратации цемента [11–14].

Пуццоланы снижают количество гидроксида кальция в цементном камне за счет образования вторичного геля гидрата силиката кальция (CSH) с более низким отношением Ca/Si [15, 16].

Зола может сильно различаться по своим физическим и химическим характеристикам, поэтому контроль качества особенно важен. Необходимо проверять содержание углерода и степень кристалличности [17].

Некоторые из преимуществ бетона на ЦЕМ I с добавкой золы включают улучшенную обрабатываемость, пониженную проницаемость, повышенную предельную прочность, лучшую поверхность и пониженную теплоту гидратации.

Зола в целом очень неоднородна, состоит из смеси стекловидных частиц с различными идентифицируемыми кристаллическими фазами, такими как кварц, муллит и различные оксиды железа. Однако медленное развитие прочности на начальном этапе ограничивает ее дальнейшее применение в области гражданского строительства в качестве хорошего экологически чистого материала.

В своих исследованиях Мехта [18] проверил 11 видов летучей золы из разных источников и обнаружил, что содержание кальция и гранулометрический состав являются решающими параметрами, определяющими скорость развития прочности.

Увеличение степени измельчения золы также увеличивает ее пуццолановую активность и плотность цементного камня. Это положительно сказывается на прочности и долговечности бетонов, содержащих золу [19].

Замена цемента исходной золой уменьшает размеры пор цементной пасты, а включение измельченной золы приводит к дальнейшему уменьшению размеров пор цементного камня [20]. Исследования показывают, что чем меньше размер частиц золы, тем выше ее активность и скорость гидратации.

Материалы и методы исследования

На кафедре «Строительные материалы и изделия» ЮУрГУ проведены исследования с целью изучения влияния количества золы на формирование структуры и свойств цементного камня.

В этом исследовании использовались:

– портландцемент 52,5Н производства «Дюккерхофф Коркино цемент» с истинной плотностью $3,1 \text{ г/см}^3$, НГ = 28,2 %;

– отвальная зола Троицкой ГРЭС. Химический состав материалов показан в табл. 1;

– вода, соответствующая ГОСТ 23732–2011.

Портландцемент имеет следующий минералогический состав: C_3S – 64,2 %; C_2S – 10,0 %; C_3A – 6,3 %; C_4AF – 14,1 %.

Тонкость помола, нормальную плотность и сроки схватывания цемента и золы определяли согласно ГОСТ 310. 2,3-81.

Для замены части портландцемента использовали 10, 20, 30 и 40 % исходной и дополнительно измельченной золы от массы вяжущего. Нормальная плотность (НГ) цементного теста составляет 28,2 %, при увеличении количества исходной золы до 30 % НГ уменьшается до 27,4 %. Цементные

пасты с измельченной золой имеют нормальную плотность от 29,5 % до 31,0 %, увеличивающуюся с повышением дисперсности измельченной золы в смеси.

Шаровая мельница использовалась для уменьшения размера частиц золы за счет ударов и истирания с использованием стальных шаров.

Из смеси ЦЕМ I и золы готовили тесто нормальной плотности и формовали образцы – кубики с ребром 20 мм. Образцы выдерживали в нормальных условиях твердения при температуре $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности более 95 %. Испытания на прочность при сжатии проводили по ГОСТ 10180-2012 в возрасте 28, 42, 56 и 90 суток.

При подготовке проб к термоанализу для остановки процесса гидратации и карбонизации цементного камня образцы предварительно обрабатывали этиловым спиртом, дополнительно высушивали при $60 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 часов и измельчали в ступке для прохождения через сито 80 мкм [21].

Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в гидратированных цементных пастах определяли термогравиметрическим анализом (ТГА).

В этом исследовании рентгенофазовый анализ был использован для изучения минералогического состава образцов цементного камня с добавками в возрасте 90 суток.

Результаты

Как правило, зола снижает прочность в раннем возрасте, однако значение $R_{сж}$ увеличивается в более позднем возрасте.

Согласно полученным данным (табл. 2), прочность цементного камня в основном зависит от сроков твердения, количества и дисперсности золы. Результаты исследования показывают, что через 28 и 42 суток нормального твердения прочность цементного камня с золой ниже, чем беззольного. После 56 суток прочность цементного камня с заменой 10 и 20 % золой выше, чем без неё, и при 30–40%-ной замене приближается к прочности контрольных образцов. Прочность цементного камня без золы в возрасте 90 суток нормального твердения составила $97,6 \pm 2,7 \text{ МПа}$, а максимальное значение до $100 \pm 3 \text{ МПа}$ выявлено при 20 %. При 30%-ной замене получено $98,5 \pm 2,3 \text{ МПа}$, что ниже максимального и выше беззольного. Однако при 40%-ной замене получено минимальное значение прочности $84,3 \pm 3,7 \text{ МПа}$.

Прочность цементного камня с измельченной золой превышает прочность беззольного цемент-

Таблица 1

Химический состав портландцемента и золы

Материалы	Содержание оксидов, % масс.							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	ппп
ЦЕМ I	19,9	5,1	4,5	63,2	1,6	0,5	3,0	0,9
Зола	62,53	28,75	4,1	7,64	2,61	2,35	0,2	0,61

Строительные материалы и изделия

ного камня в возрасте 42 суток при 20%-ной замене, а в 56 суток – при 30%-ной. В 90 суток при замене цемента на 40 % измельченной золой значение прочности уравнивается с прочностью контрольного.

Значительное повышение прочности на сжатие цементного камня с золой объясняется высокой пуццолановой активностью золы и ее способностью выполнять функции микронаполнителя (см.табл. 2).

Коэффициент вариации прочности образцов составляет менее 5 %.

Развитие прочностных характеристик образцов кубиков портландцемента с различной дозировкой золы показано на рис. 1.

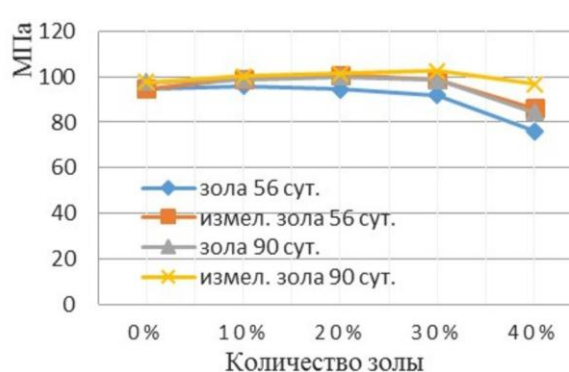
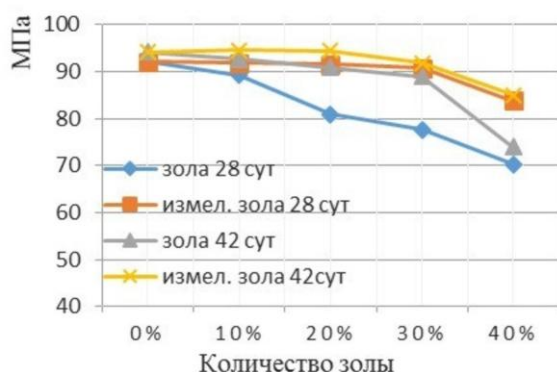
Результаты показывают, что замена части цемента золой снижает прочность цементного камня в раннем возрасте по сравнению с контрольными образцами. Однако в более позднем возрасте образцы либо набрали высокую прочность, либо очень приблизились к прочности контрольных образцов цементного камня. Образцы с 20 и 30 % золы показали более высокий прирост прочности, чем с 40 % золы. Прочность цементного камня с измельченной золой нарастала быстрее, чем у контрольного.

Непрерывная гидратация цемента приводит к постоянному увеличению содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$, но пуццолановая реакция золы поглощает некоторое количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Согласно полученным результатам по данным дифференциального термического анализа (ДТА) (рис. 2, 3), замена части цемента золой в возрасте 90 суток нормального твердения снижает количество портландита. При замене 30 % исходной золой содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне снижается до 7,03 % по сравнению с контрольным составом без золы – до 9,95 %. При замене 40 % цемента измельченной золой снижается количество портландита до 4,07 %. Это указывает на то, что пуццолановая активность измельченной золы выше, чем у исходной золы, и что измельченная зола оказывает более значительное влияние на гидратацию цемента. Также на дериватограммах при температуре 830–860 °С наблюдается экзотермический эффект, свидетельствующий об образовании слабо-закристаллизованной фазы C-S-H (I). Эндотермический пик примерно при 920–950 °С на кривых ДТА вызван разложением небольшого количества CaCO_3 .

Таблица 2

Прочностные характеристики цементного камня

Состав образцов			НГ	Прочность цементного камня, МПа			
Цемент, %	Зола, %	Зола молотая, %		28 сут	42 сут	56 сут	90 сут
100	–	–	28,2	92,15	94,18	94,88	97,63
90	10	–	28,2	89,27	92,65	95,78	98,72
80	20	–	28,0	80,97	90,88	94,42	100
70	30	–	27,5	77,64	89,0	91,8	98,42
60	40	–	28,5	70,22	73,95	76,0	84,35
90	–	10	29,5	91,81	94,53	99,13	100,33
80	–	20	30,0	91,5	94,45	100,77	101,2
70	–	30	30,5	90,77	91,78	98,82	102,42
60	–	40	31,0	83,77	85,0	86,28	96,83



а)

б)

Рис. 1. Развитие прочности при сжатии цементного камня без и с заменой части портландцемента золой:

а – в возрасте 28 и 42 сут с отсечкой и дополнительно измельченной золой;
б – в возрасте 56 и 90 сут с отсечкой и дополнительно измельченной золой

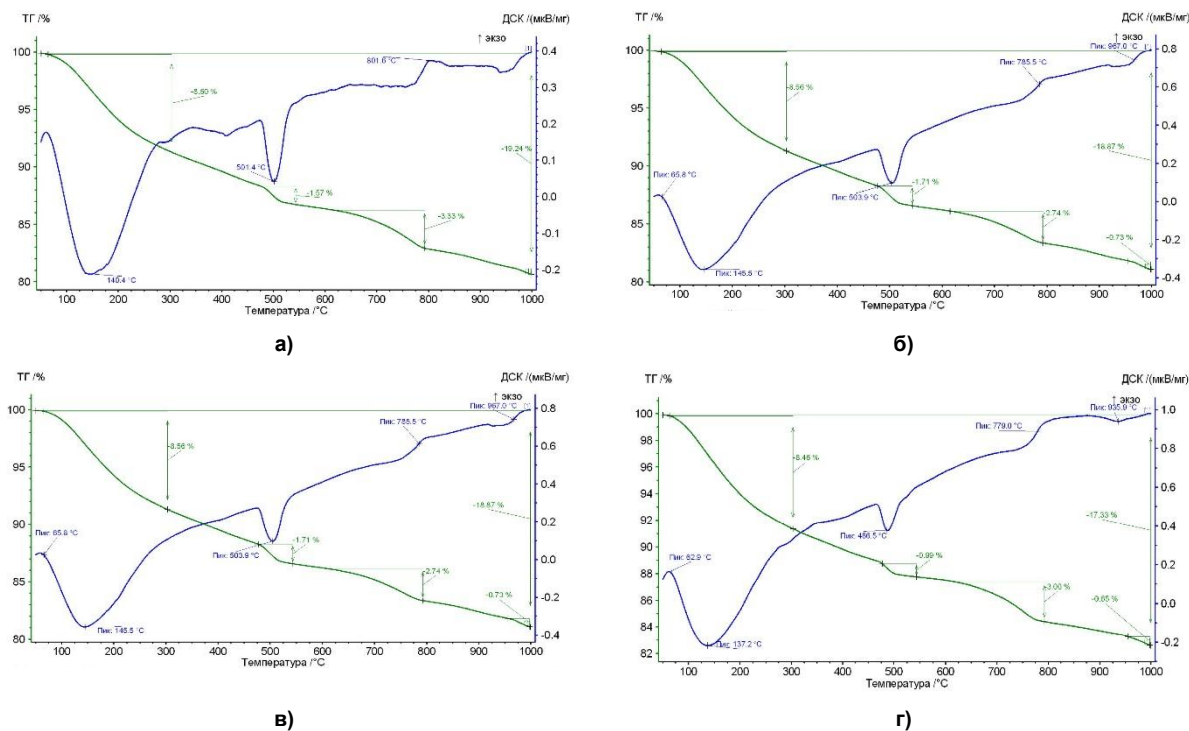


Рис. 2. Дериватография цементного камня без золы (а), 30 % зола (б), 30 % измельченная зола (в) и 40 % измельченная зола (г)

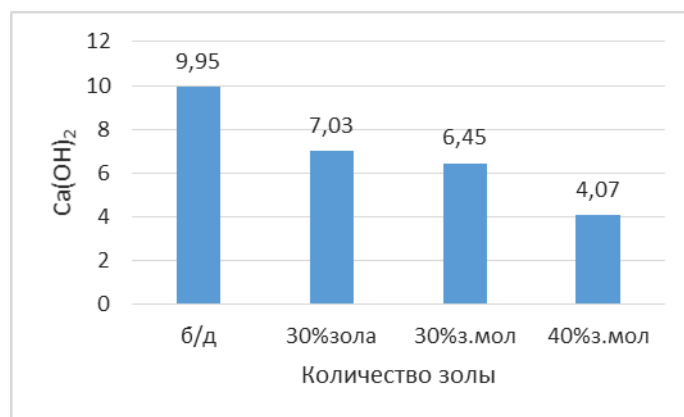


Рис. 3. Влияние количества и дисперсности золы на содержание портландита в цементном камне

Гель С-S-H не только является наиболее распространенным продуктом гидратации, но также отвечает за многие важные свойства цементного камня и, следовательно, за бетон в целом. Это наиболее плотная фаза, которая склеивает продукты гидратации и зерна заполнителя, придавая материалу плотность и прочность. Другие продукты гидратации, например, Ca(OH)_2 , образуют прочные отдельные твердые кристаллы, которые не вносят большого вклада в прочность материалов.

Рентгенофазовый анализ подтверждает, что структура цементного камня без и с золой представлена слабокристаллизованными гидросиликатами С-S-H(I) 12,5; 3,032; 2,09; 1,52 нм, С-S-H(II) 9,8; 4,92; 3,032; 2,883; 2,09; 1,728 нм,

Ca(OH)_2 4,92; 3,115; 2,63; 1,926; 1,796; 1,688; 1,485 нм, $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ 2,747; 2,544; 2,186; 1,926; 1,76; 1,523; 1,36 нм.

Рентгенограмма образцов цементного камня и с добавлением золы в возрасте 90 суток представлена на рис. 4–6.

Пики интенсивности Ca(OH)_2 появляются при 18,07; 28,75; 34,13; 47,12 и 50,85 градуса. Замена цемента измельченной золой более эффективно снижает интенсивность Ca(OH)_2 , чем исходная зола. Хорошо известно, что снижение Ca(OH)_2 зависит от степени пуццолановой реакции. Факторами, влияющими на пуццолановую реакцию, являются дисперсность и содержание стеклообразной фазы в золе. Более мелкая зола

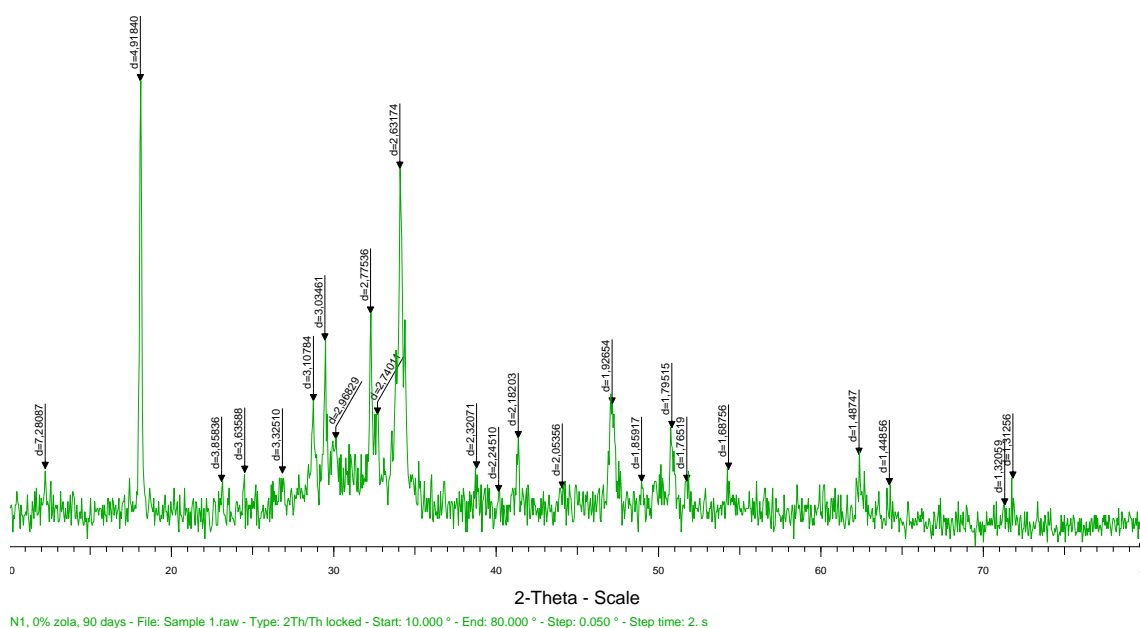


Рис. 4. Рентгенограмма цементного камня без золы

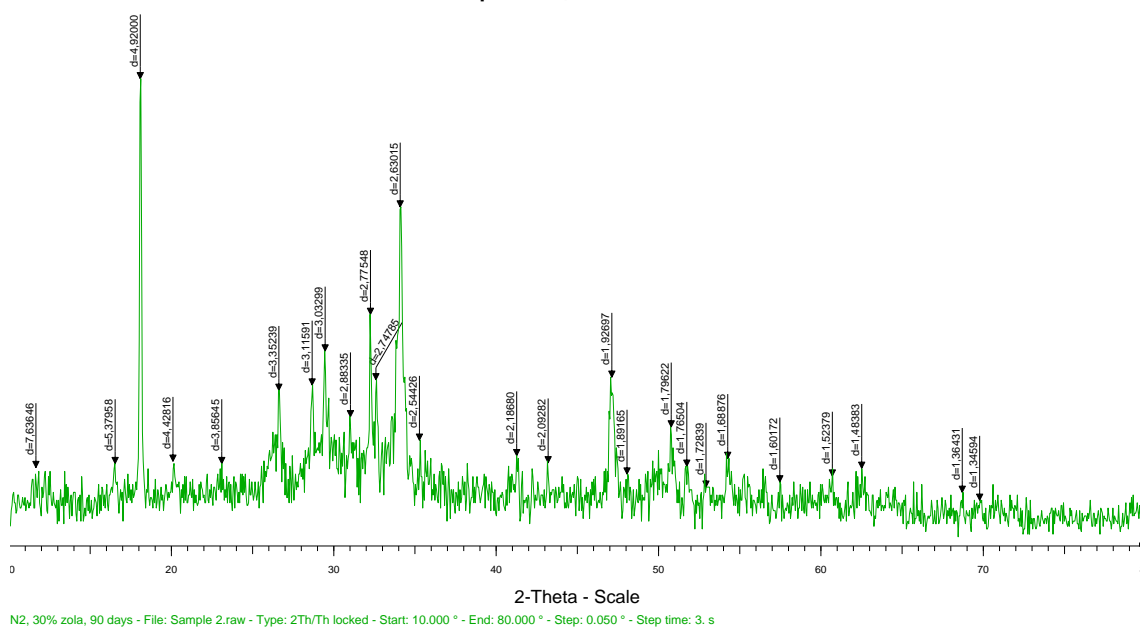


Рис. 5. Рентгенограмма цементного камня с заменой 30 % цемента золой

имела большую площадь поверхности и повышенную пуццолановую реакционную способность, чем исходная зола.

Выводы

На основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

Замена части портландцемента золой снижает водопотребность цемента и прочность при сжатии цементного камня в раннем возрасте. При 30%-ной замене цемента золой в возрасте 90 суток нормального твердения прочность цементного камня превышает прочность контрольных образ-

цов (без замены цемента золой), а при 30%-ной замене цемента измельченной золой прочность выше чем у беззолного образца начиная с 56-суточного возраста.

Замена части цемента золой снижает количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из-за пуццолановой реакции и повышает содержание цементного геля – низкоосновного гидросиликата кальция (C-S-H), что увеличивает прочность, плотность, водонепроницаемость и в целом долговечность цементного камня и бетона.

Благодаря оптимизационной роли измельченной золы процесс гидратации цемента ускоряется,

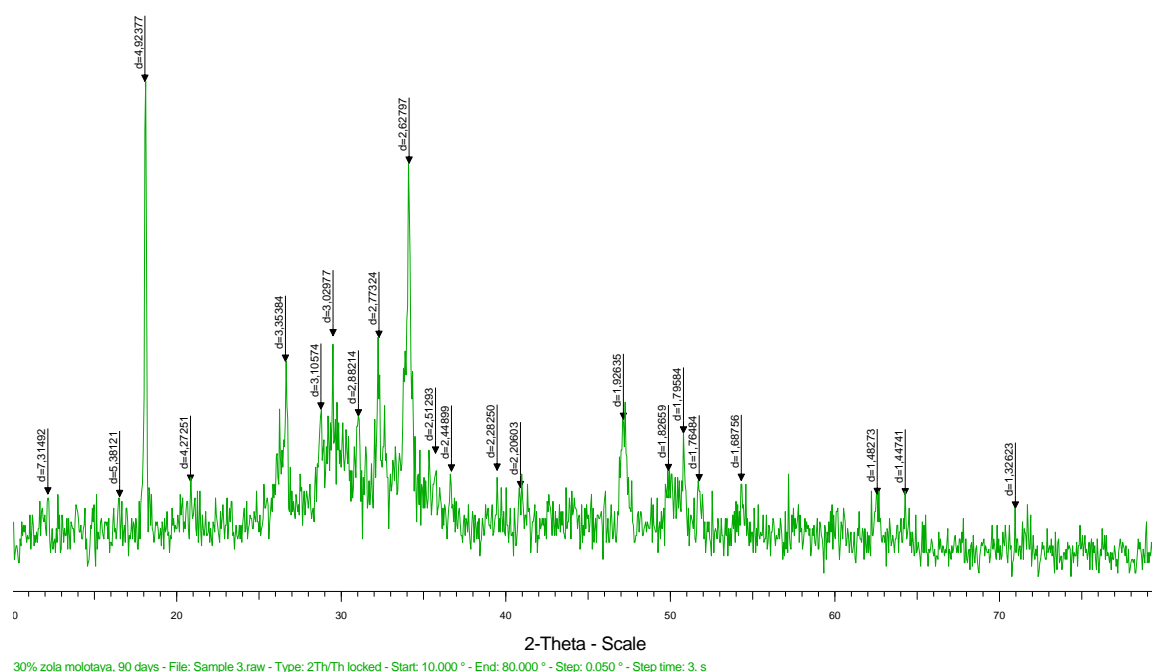


Рис. 6. Рентгенограмма цементного камня с заменой 30 % цемента измельченной золой

а количество, однородность и плотность продуктов гидратации повышаются.

Исходя из полученных результатов, дисперсность и количество золы, замещающей ЦЕМ I, оказывают значительное влияние на структуру и свойства цементного камня.

Литература

1. Benhelal, E. Green cement production: potentials and achievements / E. Benhelal, A. Rafiei, E. Shamsaei // *International journal chemical engineering*. – 2012. – Vol. 3. – P. 407–409.

2. IEA, *Technology Roadmap – cement*. – 2018 <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

3. Shihwen Hsu. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar / Shihwen Hsu, Maochieh Chi, Ran Huang // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 10. – P. 250–258.

4. Технология получения бикарбоната аммония при утилизации выбросов углекислого газа цементной промышленности России и Украины / Г.Р. Мингалева, И.В. Дмитриенко, А.И. Здоров и др. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5.

5. Franus, W. Coal fly ash as a resource for rare earth elements / W. Franus, M.M. Wiatros-Motyka, M. Wdowin, // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – Vol. 22. – P. 9464–9474. DOI: 10.1007/s11356-015-4111-9

6. Худякова, Л.И. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций. XXI век /

Л.И. Худякова, А.В. Залуцкий, П.Л. Палеев // *Техносферная безопасность*. – 2019. – № 4. – С. 290–306.

7. Панибратов, Ю.П. К вопросу применения зол ТЭС в бетонах / Ю.П. Панибратов, В.Д. Староверов // *Технологии бетонов*. – 2011. – № 1–2. – С. 43–47.

8. Адеева, Л.Н. Зола ТЭЦ перспективное сырье для промышленности / Л.Н. Адеева, В.Ф. Борбат // *Вестник Омского университета*. – 2009. – № 2. – С. 141–145.

9. Фоменко, Н.А. Применение окисленных бурных углей для повышения экологической безопасности утилизации золошлаковых отходов: дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Фоменко. – М., 2019.

10. Navdeep, S. Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement / S. Navdeep, Shehnaazdeep, B. Anjani // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 233. – P. 117276.

11. Joshi, R.C. Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization / R.C. Joshi // *Indian Geotechnical Conference*. – 2010. – P. 16–18.

12. Коровкин, М.О. Высокопрочные бетоны с высоким содержанием золы Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна / М.О. Коровкин, А.В. Петухов // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 1. – С. 106–112.

13. Siddique, R. *Supplementary Cementing Materials, Engineering Materials* / R. Siddique, M.I. Khan. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. – 297 p. DOI: 10.1007/978-3-642-17866-5_1.

14. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства) / А.В. Волжен-

ский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – М.: Стройиздат. 1979. – 476 с.

15. Lothenbach, B. *Supplementary cementitious materials* / B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol. 41. – P. 1244–1256.

16. Парфенова, Л.М. *Применение зол тепловых электростанций в бетонах* / Л.М. Парфенова // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F*. – 2013. – № 16. – С. 68–72.

17. Mohammad, Sh.A. *Effects of systematic increase of pozzolanic materials on the mechanical, durability, and microstructural characteristics of concrete: A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy* / Sh.A. Mohammad. – Canberra, 2007.

18. Mehta, P.K. *Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures* / P.K. Mehta // *Cement and Concrete Research*. – 1985. – Vol. 15 (4). – P. 669–674.

19. Semsî, Y. *Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete* / Y. Semsî, S.A. Hasan // *Sadhana – Indian Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 37. Part 3. – P. 389–403.

20. *Properties of cements and concretes containing fly ash* / R.E. Davis, R. Carlson, J.W. Kelly, H. Davis // *Journal of the American Concrete Institute*. – 2008. – Vol. 33 (5). – P. 577–611.

21. Горшков В.С. *Методы физико-химического анализа вяжущих веществ* / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа. 1981. – 335 с.

Махмудов Азамджон Махмудович, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), azamsho.89@mail.ru,

Трофимов Борис Яковлевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tbya@mail.ru.

Гафоров Фазлиддин Абдухалимович, магистрант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), fazliddin.gaforov@inbox.ru

Поступила в редакцию 19 мая 2021 г.

DOI: 10.14529/build210405

INFLUENCE OF THE QUANTITY AND DISPERSION OF ASH ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CEMENT STONE

A.M. Makhmudov, azamsho.89@mail.ru

B.Ya. Trofimov, tbya@mail.ru

F.A. Gaforov, fazliddin.gaforov@inbox.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Environmental issues require big attention from the public and environmental organizations. Ash is fine, consists mainly of spherical glassy particles, is formed during the combustion of finely ground coal, and has pozzolanic properties and/or hydraulic activity. The use of ash in concrete production offers an economical and ecological way of its disposal in comparison with blast furnace slag, which is also a common pozzolanic additive; and ash does not need to be granulated and grinded. This article examines the replacing part of the Portland cement with dump ash and additionally ground ash. Reducing the particle size of ash leads to an increase in surface area, while adding it as a partial replacement of cement improves the strength, durability and microstructural characteristics of cement stone. The results of determining the physical and chemical characteristics of cement stone with varying ash substitution are presented.

Keywords: ash, cement stone, pozzolan, strength, structure of hydrated phases.

References

1. Benhelal E., Rafiei A., Shamsaei E. [Green Cement Production: Potentials And Achievements]. *International Journal Chemical Engineering*, 2012, vol. 3, pp. 407–409.

2. [IEA, Technology Roadmap – Cement. – 2018]. Available at: www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry.

3. Shihwen Hsu, Maochieh Chi, Ran Huang. [Effect of Fineness and Replacement Ratio of Ground Fly Ash on Properties of Blended Cement Mortar]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 10, pp. 250–258.
4. Mingaleyeva G.R., Dmitriyenko I.V., Zdorov A.I., Nikolayev A.N., Shamsutdinov E.V., Afanas'yeva O.V. [Technology for Producing Ammonium Bicarbonate in the Utilization of Carbon Dioxide Emissions from the Cement Industry in Russia and Ukraine]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2013, no.5, pp. 1–8. (in Russ.)
5. Franus W., Wiatros-Motyka M.M., Wdowin M. [Coal Fly Ash as a Resource for Rare Earth Elements]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, pp. 9464–9474. DOI: 10.1007/s11356-015-4111-9
6. Khudyakova L.I., Zalutskiy A.V., Paleyev P.L. [Use of Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants. XXI Century]. *Tekhnosfernaya bezopasnost'* [Technosphere Safety], 2019, no. 4, pp. 290–306. (in Russ.)
7. Panibratov Yu. P., Staroverov V. D. [On the Issue of Using Ashes from Thermal Power Plants in Concrete]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2011, no. 1–2, pp. 43–47. (in Russ.)
8. Adeyeva L.N., Borbat V.F. [Ash CHP is a Promising Raw Material for Industry]. *Vestnik Omskogo universiteta* [Bulletin of Omsk University], 2009, no. 2, pp. 141–145. (in Russ.)
9. Fomenko N. A. *Primeneniye oksislennykh burykh ugley dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov. Dis. kand. tekhn. nauk* [The Use of Oxidized Brown Coal to Improve the Environmental Safety of Ash and Slag Waste Disposal. Cand. sci. diss.]. Moscow, 2019. 110 p.
10. Navdeep S., Shehnazdeep, Anjani B. [Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement]. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 233, p. 117276.
11. Joshi R.C. [Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization]. *Indian Geotechnical Conference*, 2010, pp. 16–18.
12. Korovkin M.O., Petukhov A.V. [High-Strength Concrete with a High Ash Content of the Kansk-Achinsk Brown Coal Basin]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017no. 1, pp. 106–112. (in Russ.)
13. Siddique R., Khan M.I. [Supplementary Cementing Materials, Engineering Materials]. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2011. 297 p. DOI: 10.1007/978-3-642-17866-5_1.
14. Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S., Kolokol'nikov V.S. *Mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva: (tekhnologiya i svoystva)* [Mineral Binders]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 476 p.
15. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R. D. [Supplementary Cementitious Materials]. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, pp. 1244–1256.
16. Parfenova L.M. [Application of Ashes of Thermal Power Plants in Concrete]. *Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F* [Bulletin of Polotsk State University. Series F], 2013, no. 16, pp. 68–72. (in Russ.)
17. Mohammad Sh. A. [Effects of Systematic Increase of Pozzolan Materials on the Mechanical, Durability, and Microstructural Characteristics of Concrete. Abstract of doct. diss.]. Canberra, 2007.
18. Mehta P.K. [Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland-Fly Ash Mixtures]. *Cement and Concrete Research*, 1985, vol. 15 (4), pp. 669–674. DOI: 10.1016/0008-8846(85)90067-5
19. Semsi Y., Hasan S.A. [Effects of Fly Ash Fineness on the Mechanical Properties of Concrete]. *Sadhana – Indian Academy of Sciences*, 2012, vol. 37, pp. 389–403. DOI: 10.1007/s12046-012-0083-3
20. Davis R.E., Carlson R., Kelly J.W., Davis H. [Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash]. *Journal of the American Concrete Institute*, 2008, vol. 33 (5), pp. 577–611. DOI: 10.14359/8435
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'yev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of Physical and Chemical Analysis of Binders]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 335 p.

Received 19 May 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Махмудов, А.М. Влияние количества и дисперсности золы на формирование структуры и свойства цементного камня / А.М. Махмудов, Б.Я. Трофимов, Ф.А. Гафоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 40–47. DOI: 10.14529/build210405

FOR CITATION

Makhmudov A.M., Trofimov B.Ya., Gaforov F.A. Influence of the Quantity and Dispersion of Ash on the Formation of the Structure and Properties of Cement Stone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 4, pp. 40–47. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210405