

УДК 666.972.55

**И. Ю. ПЕТРИК, В. Н. ГУБАРЬ, С. В. КОРНИЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЗОЛЫ-УНОСА ТЭС**

**Аннотация.** Установлено, что коэффициент коррозионной стойкости образцов бетона, в составах которых содержится зола-уноса ТЭС взамен части портландцемента, выше, чем у контрольного состава. Обработка золы-уноса в электрическом сепараторе позволяет повысить ее качество: улучшить гранулометрический состав и снизить содержание несгоревшего углерода (ППП). При содержании в составе бетона золы, отобранной с анода электрического сепаратора, коррозионная стойкость образцов на 35 % выше по сравнению с образцами, в составе которых присутствует зола-уноса, отобранная с катода или необработанная в электрическом поле (исходная зола-уноса).

**Ключевые слова:** портландцемент, минеральные добавки, зола-уноса, коррозионная стойкость, коэффициент коррозионной стойкости.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В последние десятилетия в технологии бетона произошли значительные изменения: разработаны составы модифицированных бетонов нового поколения, появились новые понятия и термины, изменились некоторые традиционные конструкторские и технологические нормативы. Ключевым фактором технологии производства бетонов нового поколения – комплексное использование дисперсных материалов, обладающих высокой пуццолановой активностью (активные минеральные добавки), и суперпластификаторов [1].

Наиболее полно современные возможности технологии бетона нашли подтверждение в создании и производстве высокофункциональных бетонов (High Performance Concrete, НРС). Под этим термином объединены многокомпонентные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами, прочностью, долговечностью, низким коэффициентом диффузии, надежными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре, высокой химической стойкостью, стабильностью объема [2].

Коррозионная стойкость бетона определяется такими факторами, как проницаемость и химическая стойкость компонентов цементного камня к действию агрессивных сред. Активные минеральные добавки (микрокремнезем, зола-уноса) повышают коррозионную стойкость бетона, так как снижают его проницаемость (физический фактор) и превращают значительную часть растворимого гидроксида кальция в гидросиликаты кальция (химический фактор).

Под термином «зола-уноса» (летучая зола) понимается тонкодисперсный минеральный порошок, образующийся в процессе сжигания молотого угля на современных электростанциях в высокотемпературных топках (эксплуатационная температура около 1 400°С). Летучие вещества и уголь сгорают, в то время как большинство минеральных включений в угле, таких как глинистые минералы, кварц и шпат, расплавляются. Расплавленное вещество быстро транспортируется в низкотемпературные зоны, где затвердевает в виде сферических частиц. Часть минерального вещества агломерируется с образованием шлака, но большинство его улетает с потоком отходящих газов и улавливается электрофильтрами [3].

В составах обычных бетонов содержание золы-уноса, применяемой взамен части портландцемента, как правило, не превышает 15...20 %. Однако в этом случае не решаются проблемы повышения сульфатостойкости бетона, стойкости к щелочной коррозии заполнителей и термического трещинообразования [4]. Канадским институтом «CANMET» (V. M. Malhotra, P. K. Mehta [5, 6]) разработаны составы

бетонов с высоким содержанием золы-уноса – High-Volume Fly Ash Concretes (HVFAC). Зола-уноса оказывает следующее влияние на свойства бетонных смесей и бетонов HVFAC:

- уменьшение усадки в результате слабого водоредуцирующего эффекта, обеспечивающего снижение водоцементного отношения бетона;
- снижение риска термического трещинообразования в массивных бетонных конструкциях в результате уменьшения тепловыделения (при замене цемента золой-уноса в количестве 50 % температурный градиент между центром и поверхностью конструкций не превышает 25 °С);
- повышение водонепроницаемости и долговечности бетона (повышение степени упаковки частиц, снижение расхода воды, модифицирование состава продуктов гидратации);
- повышение когезии бетонной смеси и ее удобоукладываемости, снижение расслаиваемости, улучшение прокачиваемости.

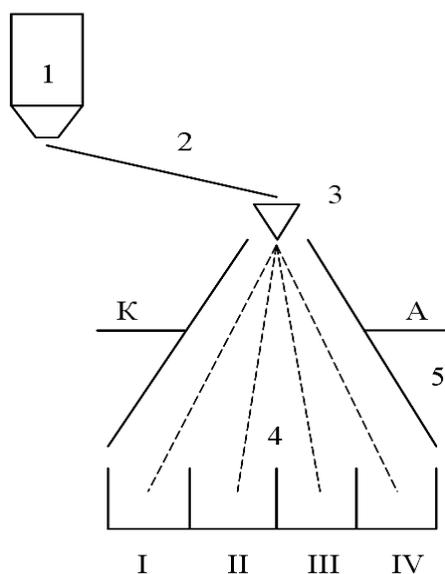
В то же время высокий расход золы в составе бетона может оказывать негативное влияние на морозостойкость и коррозионную стойкость. Снижение коррозионной стойкости обусловлено присутствием в золе частиц органических остатков в виде несгоревшего углерода, которые набухают в воде, плохо сцепляются с вяжущим и способны образовывать соединения, разрушающие цементный камень.

Решение данной проблемы обуславливает необходимость разработки различных способов повышения качества золы для эффективного использования в составах высокофункциональных бетонов.

Известны различные способы и технологии повышения качества золы [7, 8]: рассев и разделение на фракции; тонкий помол (размер частиц менее 10 мкм); флотация (отделение микросфер с поверхности золоотстойников); электрическая и пневматическая сепарация.

Более эффективной с точки зрения снижения содержания несгоревшего углерода является электростатическая сепарация золы.

Способ электростатической сепарации, основанный на различной электрической проводимости веществ, реализуется путем обработки потока частиц золы-уноса в высоковольтном электрическом поле [9] (рис. 1). Зола поступает из дозатора в зону высоковольтного электростатического поля, которое создается вертикально расположенными некоронирующими пластинчатыми электродами. Падая вниз под действием силы тяжести, частицы отклоняются в сторону электродов под влиянием кулоновских сил. Направление действия электрической силы зависит от знака избыточного заряда частицы.



**Рисунок 1** – Схема действия камерного электростатического сепаратора свободного падения: 1 – бункер; 2 – медная пластина-лоток; 3 – воронка; 4 – приемные контейнеры; 5 – электроды (А – анод, К – катод).

Увеличение межэлектродного расстояния в нижней части сепаратора позволяет расширить веер разделяемой золы-уноса и улучшить таким образом ее сепарацию.

**Целью** настоящей работы является исследование влияния электрической сепарации золы-уноса ТЭС на коррозионную стойкость мелкозернистого бетона.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении экспериментальных исследований использованы следующие материалы:

- вяжущее вещество: портландцемент (ПЦ) Амвросиевского комбината ПЦ I-42,5 Н;
- песок (П) кварцевый Вольский;
- минеральная добавка: зола-уноса (ЗУ) Зуевской ТЭС.

Коррозионная стойкость мелкозернистого бетона определялась по методике В. М. Москвина [10] на образцах-призмах размером  $(4 \times 4 \times 16) \cdot 10^{-2}$  м. Запроектировано три серии составов (А – с золой, отобранной с зоны катода электрического сепаратора; Б – с золой, отобранной с зоны анода; В – с золой, необработанной в электрическом поле). В каждой серии предусмотрено по три состава, в которых замена части портландцемента золой-уноса составляет соответственно 0; 15 и 45 %.

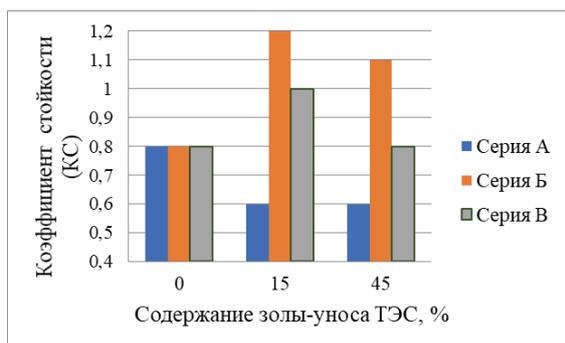
Образцы бетона после твердения в течение суток в нормальных условиях набирали прочность в воде в течение 14 суток.

Агрессивными средами служили 0,1н раствор HCl, 5%-й раствор  $MgCl_2$ , т. е. моделировалась кислотная и магниезиальная коррозии.

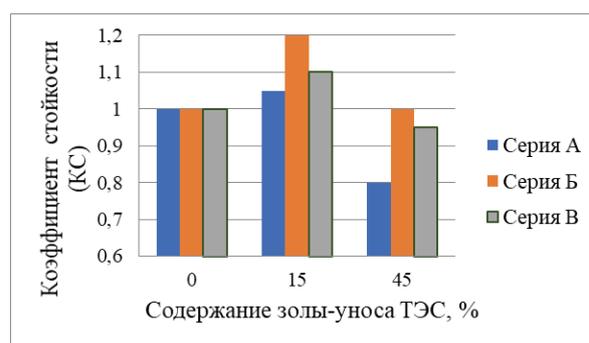
В качестве критерия коррозионной стойкости бетонов принято изменение показателя предела прочности на растяжение при изгибе, где:  $KC = (R_{изг}^{exp} / R_{изг}^{конт}) \geq 0,8$  – предел прочности на растяжение при изгибе образцов, хранившихся в агрессивной среде, МПа;  $R_{изг}^{конт}$  – предел прочности на растяжение при изгибе образцов перед погружением в агрессивную среду, МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов эксперимента показал, что образцы, в которых содержится зола взамен части портландцемента, имеют коэффициент стойкости выше, чем образцы без использования золы (рис. 2, 3).



**Рисунок 2** – Зависимость коэффициента коррозионной стойкости (КС) бетона от содержания золы-уноса ТЭС в образцах, выдержанных в 0,1 н растворе HCl.



**Рисунок 3** – Зависимость коэффициента коррозионной стойкости (КС) бетона от содержания золы-уноса ТЭС в образцах, выдержанных в 5%-м растворе  $MgCl_2$ .

Можно предположить, что зола-уноса ТЭС повышает коррозионную стойкость бетона. Вероятно, она снижает проницаемость бетона и превращает значительную часть растворимого гидроксида кальция в гидросиликаты кальция. Однако высокий расход золы в составе бетона может оказывать негативное влияние на его коррозионную стойкость присутствием в золе органических остатков в виде негоревшего углерода, которые набухают в воде, плохо сцепляются с вяжущим и способны образовывать соединения, разрушающие вяжущее.

Электрическая сепарация позволяет повысить качество золы-уноса и снизить количество органических остатков (ППП = 4,1 %). Образцы, содержащие 15 и 45 % золы, отобранной с анода электрического сепаратора, имеют коэффициент стойкости  $K_{C15} = 1,2$  и  $K_{C45} = 1,0$ , что является выше по сравнению с коэффициентами стойкости образцов, в составе которых присутствует зола-уноса, отобранная с катода ( $K_{C15} = 1,1$  и  $K_{C45} = 0,8$ ) и необработанная в электрическом поле ( $K_{C15} = 1,0$  и  $K_{C45} = 0,95$ ).

## ВЫВОДЫ

При исследовании коррозионной стойкости бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС установлено, что коэффициент коррозионной стойкости образцов бетона, в составах которых содержится зола-уноса ТЭС взамен части портландцемента, выше, чем у контрольного состава. Электрическая сепарация повышает качество золы-уноса и снижает количество органических остатков (ППП = 4,1 %). При содержании в составе бетона золы, отобранной с анода электрического сепаратора, коррозионная стойкость образцов на 35 % выше по сравнению образцами, в составе которых присутствует зола-уноса, отобранная с катода или необработанная в электрическом поле.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрусевич, В. А. Прогрессивные виды бетонов нового поколения [Текст] / В. А. Петрусевич, М. А. Расанец ; науч. рук. А. Е. Шилов // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций : материалы 69-й студенческой научно-технической конференции, 25 апреля 2013 года / ред. В. Ф. Зверев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 113–117.
2. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны: научное издание [Текст] / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
3. Рамачандран, В. С. Добавки в бетон [Текст] : Справ. пособие / Р. Ф. Фельдман, М. Коллепарди [и др.] ; Под ред. В. С. Рамачандрана ; Пер с англ. Т. И. Розенберг и С. А. Болдырева ; Под ред. А. С. Болдырева и В. Б. Ратинова. – М. : Стройиздат, 1988. – 575 с.
4. Зайченко, Н. М. Бетоны с высоким содержанием золы для массивных железобетонных конструкций [Текст] / Н. М. Зайченко, А. И. Сердюк // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 2013-1(99) : Сучасні будівельні матеріали. – С. 137–144.
5. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete [Текст] : materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories / V. M. Malhotra, P. K. Mehta ; Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. – Ottawa, Canada : Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc., 2002. – 101 p.
6. Mehta, P. K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development [Текст] / P. K. Mehta // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 20–21 May 2004 : Proc. / Edited by Kejin Wang. – Beijing (China) : Iowa State University, 2004. – P. 3–13.
7. Beneficiated Fly Ash Versus Normal Fly Ash or Silica Fume [Текст] / M. Collepardi, S. Collepardi, J. J. Olagot Ogoumah, R. Troli // The 9<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 20–25 May 2007 : Proc. / Ed. V. M. Malhotra. – Warsaw (Poland) : CANMET/ACI, 2007. – P. 1–8.
8. Li, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> [Текст] / Gengying Li // Cem. Concr. Res. – 2004. – Vol. 34, No 6. – P. 1043–1049.
9. Сулейманов, О. А. Электростатическая сепарация, как способ сухой переработки минерального сырья [Электронный ресурс] / О. А. Сулейманов // Научное пространство Европы. – Белгород: 2013. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru.htm](http://www.rusnauka.com/Page_ru.htm).
10. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гүзев. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.

Получено 21.06.2017

І. Ю. ПЕТРИК, В. М. ГУБАР, С. В. КОРНІЄНКО  
КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ БЕТОНУ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ЗОЛИ-  
ВИНЕСЕННЯ ТЕС  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Встановлено, що коефіцієнт корозійної стійкості зразків бетону, в складі яких міститься зола-виносу ТЕС замість частини портландцементу, вище, ніж у контрольного складу. Оброблення золи-винесення в електричному сепараторі дозволяє підвищити її якість: поліпшити гранулометричний склад і знизити вміст незгорілого вуглецю (ППП). При вмісті в складі бетону золи, відібраної з анода електричного сепаратора, корозійна стійкість зразків на 35 % вище порівняно із зразками, у складі яких присутня зола-винесення, відібрана з катода або необроблена в електричному полі (вихідна зола-винесення).

**Ключові слова:** портландцемент, мінеральні добавки, зола-винесення, корозійна стійкість, коефіцієнт корозійної стійкості.

IRINA PETRIK, VICTOR GUBAR, SERGEY KORNIENKO  
CORROSION RESISTANCE OF CONCRETE WITH HIGH FLY ASH CONTENT  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** It is established that the coefficient of corrosion resistance of the concrete samples, the composition of which contains fly ash of thermal power plants to replace a portion of Portland cement is higher than that of the control composition. Processing of fly ash in electric separator allows increasing quality: improve the particle size and to reduce the content of unburned carbon (PPP). When the content in a concrete mix of ash, selected from the anode of the electric separator, the corrosion resistance of the samples is 35 % higher compared to the samples, which consists of fly ash, selected from the cathode or raw in an electric field (original fly ash).

**Key words:** portland cement, mineral additives, fly ash, corrosion resistance, corrosion resistance coefficient.

**Петрик Ирина Юрьевна** – ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: высокофункциональные бетоны с повышенным содержанием золы-уноса ТЭС.

**Губарь Виктор Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: неразрушающий контроль бетона строительных конструкций.

**Корниенко Сергей Викторович** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны на основе золы-уноса ТЭС с повышенными эксплуатационными свойствами.

**Петрик Ирина Юрїївна** – асистент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: високофункціональні бетоны з підвищеним вмістом золи-винесення ТЕС.

**Губар Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: неруйнівний контроль бетону будівельних конструкцій.

**Корнієнко Сергій Вікторович** – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетоны на основі золи-винесення ТЕС з підвищеними експлуатаційними властивостями.

**Petrik Irina** – Assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: High Performance Concrete with high content of fly ash.

**Gubar Victor** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: nondestructive testing of concrete building structures.

**Kornienko Sergey** – Master, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: concrete based on fly ash of thermal power plants with high performance properties.