

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.55

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия

EDN cudqva

DOI 10.62980/2076-0655-2024-304-312

САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ ТОКОПРОВОДЯЩИЙ БЕТОН НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА С ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ И УГЛЕРОДНОЙ ФИБРОЙ

Ларсен О.А.¹, Бахрах А.М.¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Представлен подход к получению самоуплотняющегося токопроводящего бетона нормального твердения на основе портландцемента, получаемого совместным введением технического углерода двух марок ТУ П-803 и ТУ К-354 при их массовом соотношении 4:1 и объемной концентрации в смеси, равной 0,25%, а также углеродной фибры длиной 3мм в количестве 1% от массы цемента. Получен бетон с удельным электрическим сопротивлением, равным 0,25 Ом*м, не увеличивающимся в процессе твердения, прочностью в возрасте 28 суток 53 МПа, морозостойкостью F200, водонепроницаемостью W20, пределом прочности на растяжение при изгибе 8,2 МПа. Получены резистивные нагревательные элементы, мощностью 600 Вт/м² и более, обеспечивающие возможность получения покрытий с антиобледенительным эффектом. Показано, что сушка бетона разработанного состава может увеличивать проводимость на 50%, что связано с улучшением контакта между токопроводящими частицами, вызываемом их обжатием при усадке, величина которой снижается при увеличении количества углеродной фибры от 0,25% до 1% от массы цемента. Отмечено, что при увеличении подаваемого напряжения к образцу его удельное электрическое сопротивление снижается, тем сильнее, чем больше содержание углеродной фибры в диапазоне 0,25-1% от массы цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: портландцемент, технический углерод, углеродная фибра, проводимость, удельное электрическое сопротивление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларсен О.А., Бахрах А.М. Самоуплотняющийся токопроводящий бетон нормального твердения на основе портландцемента с техническим углеродом и углеродной фиброй // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т.31, № 4. – С. 304-312, DOI 10.62980/2076-0655-2024-304-312, EDN cudqva

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN cudqva

DOI 10.62980/2076-0655-2024-304-312

SELF-COMPACTING CONDUCTIVE CONCRETE OF NORMAL HARDENING BASED ON PORTLAND CEMENT WITH TECHNICAL CARBON AND CARBON FIBER

Larsen O.A.¹, Bakhrakh A.M.¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

An approach to obtaining self-sealing conductive concrete of normal hardening is presented. The results of a study of the properties of self-sealing concrete of normal hardening based on Portland cement obtained by the joint introduction of carbon black of two grades TU P-803 and TU K-354 with their mass ratio of 4:1 and volume concentration in a mixture equal to 0.25%, as well as carbon fiber with a length of 3mm in an amount of 1% by weight of cement are presented. Concrete was obtained with a specific electrical resistance equal to 0.25 Ohms * m, which does not increase during the hardening process, a strength of 53 MPa at the age of 28 days, frost resistance F200, water resistance W20, tensile strength at bending 8.2 MPa. Resistive heating elements with a capacity of 600 W/m² or more have been obtained, providing the possibility of obtaining coatings with an anti-icing effect. It is shown that drying concrete of the developed composition can increase the conductivity by 50%, which is associated with an improvement in the contact between conductive particles caused by their compression during shrinkage, the value of which decreases with an increase in the amount of carbon fiber from 0.25% to 1% by weight of cement. It is noted that with an increase in the applied voltage to the sample, its electrical resistivity decreases, the more the carbon fiber content is in the range of 0.25-1% of the cement weight.

KEY WORDS: Portland cement, carbon black, carbon fiber, conductivity, electrical resistivity

FOR CITATION: Larsen O.A., Bakhrakh A.M. Self-compacting conductive concrete of normal hardening based on Portland cement with technical carbon and carbon fiber // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No4. – Pp. 304 – 312, DOI 10.62980/2076-0655-2024-304-312, EDN cudqva

ВВЕДЕНИЕ

INTRODUCTION

В настоящее время поверхности автомобильных дорог и мостовых конструкций при эксплуатации при отрицательных температурах подвергаются обледенению, для устранения которого нередко применяются химические реагенты, вызывающие негативное влияние на окружающую среду и оказывающие разрушающее действие на покрытия автомобильных дорог и автотранспорт. Хранение реагентов вблизи железобетонных конструкций вызывает коррозию бетона, что неизбежно связано с их проникновением в почвенный слой, расположенный вблизи конструкций [1, 2]. Использование реагентов в холодное время года также сопряжено с необходимостью доставки и их постоянным наличием, особенно в труднодоступных местах, что повышает транспортные расходы на обслуживание дорог [3].

Устройство на основе электропроводного самоуплотняющегося бетона покрытий мостовых сооружений, поверхность которых будет поддерживать положительную температуру и обладать свойством саморазогрева, является актуальным решением повышения безопасности дорожного движения [4, 5, 6].

Анализ исследований в области получения электропроводных бетонов с необходимыми прочностными и электрическими свойствами показал необходимость применения сверхжестких или прессованных сухих смесей с последующим увлажнением, что потребовало использования сложного оборудования и характеризовалось длительным циклом изготовления [7, 8, 9]. Такая технология производства представляет определенные трудности ввиду производства изделий только в заводских условиях. В свою очередь ранее разработанные подвижные смеси на основе токопроводящих компонентов обладали пониженными физико-механическими характеристиками и нестабильными электротехническими свойствами [10].

Работы по получению токопроводящих бетонов на основе портландцементного вяжущего и углеродных материалов проводились Накоряковым В.Е., Пугачевым Г.А., Врублевским Л.Е., а также в НИУ МГСУ под руководством Баженова Ю.М., в БГТУ им. В. Г. Шухова Фаниной Е. А. [11]. Получение высокоподвижных самоуплотняющихся бетэловых смесей, обеспечивающих возможность транспортировки на строительный объект и укладки в опалубку ранее не изучался, что объясняется высокой водопотребностью углеродных электропроводных добавок и необходимостью применения высокоэффективных пластификаторов, которые получили распространение только в последнее время. Стоит отметить, что ранее изделия из электропроводных бетонов требовали изготовления только в заводских условиях, что значительно усложняло технологический цикл. Также не рассматривались вопросы изменения удельного электрического сопротивления электротехнических изделий и сохранения их проводимости во времени в условиях нормального твердения.

Для получения токопроводящего бетона применяются различные углеродные компоненты, обладающие высокой дисперсностью [12, 13, 14]. Введение большого количества токопроводящих компонентов для повышения проводимости приводит к снижению физико-механических показателей бетона, что связано с их высокой водопотребностью. Применяемые ранее в токопроводящих составах пластифицирующие добавки С-3 и ЛСТ обеспечивали получение только жестких смесей или смесей пластического

Currently, the surfaces of highways and bridge structures are exposed to icing during operation at subzero temperatures, to eliminate which chemical reagents are often used, which cause a negative impact on the environment and have a destructive effect on road surfaces and vehicles. Storage of reagents near reinforced concrete structures causes concrete corrosion, which is inevitably associated with their penetration into the soil layer located near structures [1, 2]. The use of reagents in the cold season is also associated with the need for delivery and their constant availability, especially in hard-to-reach places, which increases transport costs for road maintenance [3].

A device based on electrically conductive self-sealing concrete for bridge structures, the surface of which will maintain a positive temperature and have the property of self-heating, is an urgent solution to improve road safety [4, 5, 6].

An analysis of research in the field of producing electrically conductive concretes with the necessary strength and electrical properties showed the need to use super-rigid or pressed dry mixtures with subsequent humidification, which required the use of complex equipment and was characterized by a long cycle of production [7, 8, 9]. Such production technology presents certain difficulties due to the production of products only in factory conditions. In turn, the previously developed mobile mixtures based on conductive components had reduced physical and mechanical characteristics and unstable electrical properties [10].

Work on the production of conductive concretes based on Portland cement binder and carbon materials was carried out by V.E. Nakoryakovym, G.A. Pugachev, L.E. Vrublevsky, as well as at the National Research University MGSU under the leadership of Yu.M. Bazhenov, at V. G. Shukhov BSTU Fanina E. A. [11]. The production of highly mobile self-sealing betel mixtures providing the possibility of transportation to a construction site and laying in a formwork has not been studied before, which is explained by the high water demand for carbon electro-aqueous additives and the need to use highly effective plasticizers, which have become widespread only recently. It is worth noting that previously, products from electrically conductive concretes required manufacturing only in factory conditions, which significantly complicated the technological cycle. Also, the issues of changing the electrical resistivity of electrical products and maintaining their conductivity over time under normal hardening conditions were not considered.

Various carbon components with high dispersion are used to produce conductive concrete [12, 13, 14]. The introduction of a large number of current-conducting components to increase conductivity leads to a decrease in the physical and mechanical properties of concrete, which is associated with their high water demand. Plasticizing additives C-3 and LST, previously used in conductive compositions, ensured the production of only rigid mixtures or mixtures of plastic molding for factory-ready products that harden only under conditions of heat and moisture treatment.

To ensure even greater conductivity of cement electro-conductive concrete, it is possible to use carbon fiber, which

формования для изделий заводской готовности, твердеющих только в условиях тепловлажностной обработки.

Для обеспечения еще большей проводимости цементного электропроводного бетона возможно применение углеродной фибры, которая обеспечит снижение усадки цементного камня и повысит его трещиностойкость [15].

Широкое применение электропроводный бетон не получил, несмотря на уникальные свойства композита. Ограниченное применение токопроводящего бетона объясняется сложностью изготовления изделий из него, применением специальных методов уплотнения бетонных смесей, необходимостью использования ускоренных методов твердения. Поэтому получение самоуплотняющихся токопроводящих смесей позволило бы существенно расширить область его применения.

Эффективным решением устройства покрытий мостов со свойством саморазогрева, укладываемых непосредственно на строительном объекте, является разработка состава самоуплотняющегося токопроводящего бетона, обеспечивающего возможность применения на строительном объекте без дополнительного уплотнения.

Цель или задачи исследования:

Целью данной работы является разработка состава самоуплотняющегося бетона с высокой электрической проводимостью на основе тонкодисперсных токопроводящих добавок различной дисперсности, углеродной фибры и высокоэффективного поликарбоксилатного пластификатора.

Материалы и методы исследования

В работе применялись следующие материалы:

- портландцемент ООО «ХайдельбергЦемент РУС» ЦЕМ I 52,5Н ГОСТ 31108-2020;
- песок I класса мытый с $M_k=2,45$ по ГОСТ 8736-2014;
- суперпластификатор Sika ViscoCrete E55;
- токопроводящие высокодисперсные компоненты, включающие технический углерод ТУ П-803 по ГОСТ 7885-86; технический углерод ТУ К-354 ГОСТ по 7885-86;
- углеродная фибра «Monsterfiber C» длиной 3 мм по ТУ 1916-067-38276489-2017;

Для определения водопотребности тонкодисперсных электропроводных добавок применялась методика, предложенная в Японии Окамурой с помощью формы-конуса Хагермана.

Измерение удельного электрического сопротивления осуществлялось с использованием лабораторного регулируемого источника питания постоянного тока QJ3003P.

Эксперименты и обсуждение результатов

Необходимость применения тонкодисперсных токопроводящих компонентов в определенном количестве связана с приданием композиту в сочетании с портландцементным вяжущим высокой проводимости. Для этого в работе применялись углеродосодержащие компоненты различной дисперсности, которые имели значительную водопотребность. Было установлено, что водопотребность ТУ К-354, ТУ П-803 и добавки графита ЭУТ-2 составила 222%, 72% и 138% соответственно, определенная по относительному распылу цементного теста (рис. 1). В дальнейших экспериментах добавка графита не применялась, что связано с существенным снижением прочности при его введении.

will reduce the shrinkage of cement stone and increase its crack resistance [15].

Electro-aqueous concrete has not been widely used, despite the unique properties of the composite. The limited use of conductive concrete is explained by the complexity of manufacturing products from it, the use of special methods for compacting concrete mixtures, and the need to use accelerated hardening methods. Therefore, the production of self-sealing conductive mixtures would significantly expand the scope of its application.

An effective solution for the installation of bridge coverings with the property of self-heating, laid directly on a construction site, is the development of a composition of self-sealing conductive concrete, which ensures the possibility of application on a construction site without additional sealing.

The purpose or objectives of the study:

The purpose of this work is to develop a composition of self-sealing concrete with high electrical conductivity based on finely dispersed conductive additives of various dispersities, carbon fiber and a highly effective poly-carboxylate plasticizer.

Materials and methods of research

The following materials were used in the work:

- Portland cement LLC "HeidelbergCement RUS" CEM I 52.5N GOST 31108-2020;
- sand of class I washed with $M_k = 2.45$ according to GOST 8736-2014;
- superplasticizer Sika ViscoCrete E55;
- conductive highly dispersed components, including carbon black TU P-803 according to GOST 7885-86; carbon black TU K-354 GOST 7885-86;
- CARBON FIBER "Monsterfiber C" 3 MM LONG ACCORDING TO TU 1916-067-38276489-2017;

To determine the water demand of finely dispersed conductive additives, a technique proposed in Japan by Okamura with the help of a Hagerman cone shape was used.

The electrical resistivity was measured using a laboratory controlled DC power supply QJ3003P.

Experiments and discussion

The need to use finely dispersed conductive components in a certain amount is associated with giving the composite in combination with a Portland cement binder high conductivity. For this purpose, carbon-containing components of different dispersion were used in the work, which had significant water demand. It was found that the water consumption of TU K-354, TU P-803 and graphite additives EUT-2 was 222%, 72% and 138%, respectively, determined by the relative spread of the cement paste (Fig. 1). In further experiments, the addition of graphite was not used, which is associated with a significant decrease in strength when it was introduced.

В связи с высокой удельной поверхностью и водопотребностью получение самоуплотняющихся электропроводных смесей с высокой текучестью требует для получения высокоподвижной самоуплотняющейся смеси применения большого количества пластифицирующей добавки поликарбоксилата или увеличение расхода воды, что неизбежно приведет к снижению прочности и увеличению сроков схватывания цементного теста.

Due to the high specific surface area and water demand, the production of self-sealing electro-aqueous mixtures with high fluidity requires the use of a large amount of plasticizing polycarboxylate additive or an increase in water consumption to obtain a highly mobile self-sealing mixture, which will inevitably lead to a decrease in strength and an increase in the setting time of the cement dough.

РИСУНОК 1

ВОДОПОТРЕБНОСТЬ ДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ, ОПРЕДЕЛЕННАЯ ПО МЕТОДИКЕ MINI SLUMP FLOW TEST

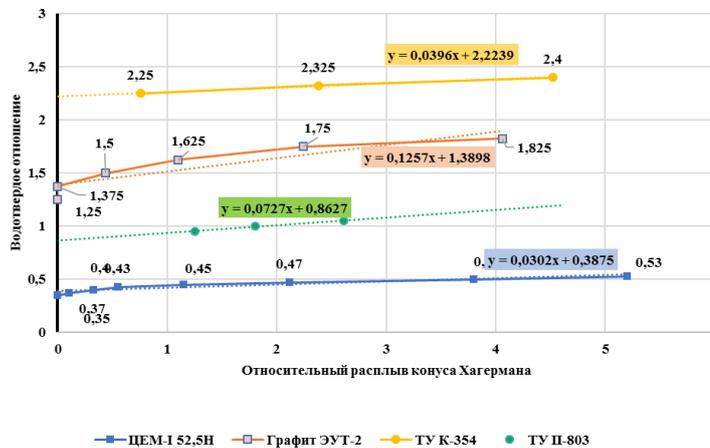


Figure 1

The water demand of dispersed hydrocarbon components, determined by the mini slump flow test method

В ходе исследовательской работы проведено значительное количество измерений удельного электрического сопротивления (рис. 2) образцов более 70 различных составов, величина и стабильность проводимости которых повышались в ходе выполнения исследования согласно диаграммам размаха значений удельного электрического сопротивления для каждого состава в процессе твердения и последующей сушки. На рис. 3 приведены диаграммы размаха изменения проводимости и ее сохранения при твердении и сушке при выполнении исследовательской работы, полученные с использованием статистических методов обработки данных.

During the research work, a significant number of measurements of the electrical resistivity (Fig. 2) of samples of more than 70 different compositions were carried out, the magnitude and stability of the conductivity of which increased during the study according to the diagrams of the range of values of the electrical resistivity for each composition during hardening and subsequent drying. Figure 3 shows diagrams of the magnitude of the change in conductivity and its conservation during hardening and drying during research work, obtained using statistical data processing methods.

РИСУНОК 2

ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

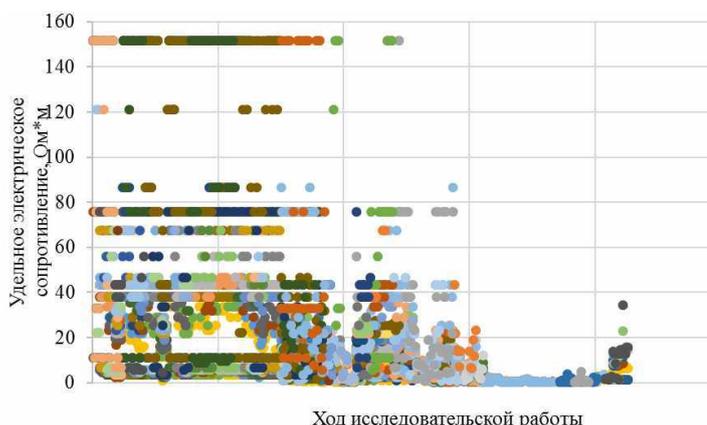


Figure 2

The progress of the research work

Для получения токопроводящего бетона с необходимой проводимостью и сохранением этого свойства в процессе твердения, которое не было обеспечено введением только технического углерода ТУ К-354 или только углеродной фибры в контрольный состав, совместно вводили ТУ К-354 в количестве 10 - 20% от массы ТУ П-803 и углеродную фибру в количестве 0,25-1% от массы цемента. Установлено, что совместное введение ТУ К-354 в количестве 20% и углеродной фибры в количестве 1% (рис. 4) обеспечило повышение проводимости в 22 раза (с 5,6 до 0,25 Ом·м) в возрасте 3 суток, и в 212 раз (с 53,1 до 0,25 Ом·м).

To obtain a conductive tone with the necessary conductivity and preserve this property in the hardening process, which was not ensured by the introduction of only technical carbon TU K-354 or only carbon fiber into the control composition, TU K-354 was jointly introduced in an amount of 10-20% of the masses of TU P-803 and carbon fiber in an amount of 0.25-1% of the weight of cement. It was found that the combined administration of TU K-354 in an amount of 20% and carbon fiber in an amount of 1% (Fig. 4) provided a 22-fold increase in conductivity (from 5.6 to 0.25 ohms*m) at the age of 3 days, and 212 times (from 53.1 to 0.25 ohms*m).

РИСУНОК 3

ДИАГРАММЫ РАЗМАХА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ТВЕРДЕНИИ И СУШКЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ХОДУ ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Figure 3

Diagrams of the magnitude of changes in the conductivity of samples during hardening and drying, obtained during the course of the research work

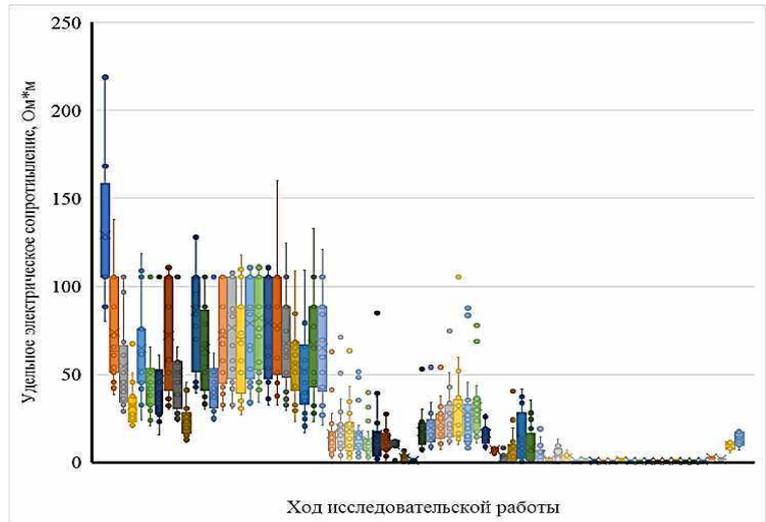
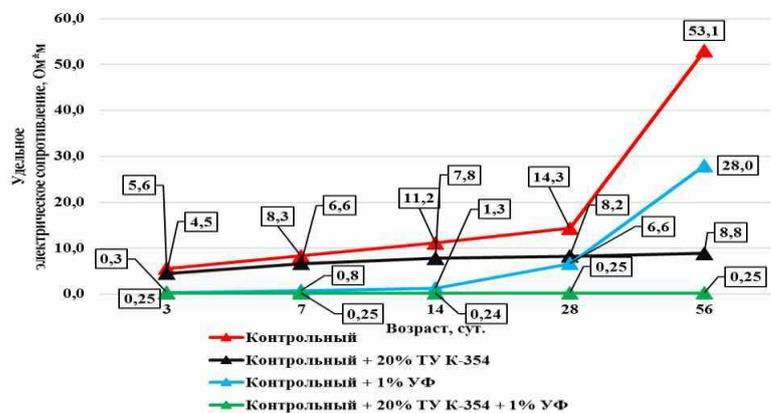


РИСУНОК 4

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ КОЛИЧЕСТВА ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ВОЗРАСТЕ 3-28 СУТОК

Figure 4

Dependence of resistance on the number of current-conducting components at the age of 3-28 days



Получены токопроводящие цементные бетоны с объемной концентрацией 0,25 технического углерода марок П-803 и К-354 в массовом соотношении 80:20-85:15 соответственно и углеродной фибры в количестве 0,25-1% от массы цемента [15]. При введении технического углерода ТУ П-803 и ТУ К-354 в массовом соотношении 80:20 и углеродной фибры в количестве 1% от массы цемента получен самоуплотняющийся токопроводящий бетон нормального твердения, обладающий свойствами, приведенными в табл. 1. Получены нагреватели мощностью 600 Вт/м² и более, обеспечивающие возможность устройства систем снеготаяния (рис. 5).

Conductive cement concretes with a volume concentration of 0.25 technical carbon grades P-803 and K-354 were obtained in a mass ratio of 80:20-85:15, respectively, and carbon fiber in an amount of 0.25-1% by weight of cement [15]. With the introduction of technical carbon TU P-803 and TU K-354 in a mass ratio of 80:20 and carbon fiber in an amount of 1% of the weight of the cement, a self-sealing conductive concrete of normal hardening was obtained, possessing the properties shown in Table 1. Heaters with a capacity of 600 W/m² were obtained and more, providing the possibility of installing snowmelt systems (Fig. 5).

РИСУНОК 5

АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО БЕТОНА

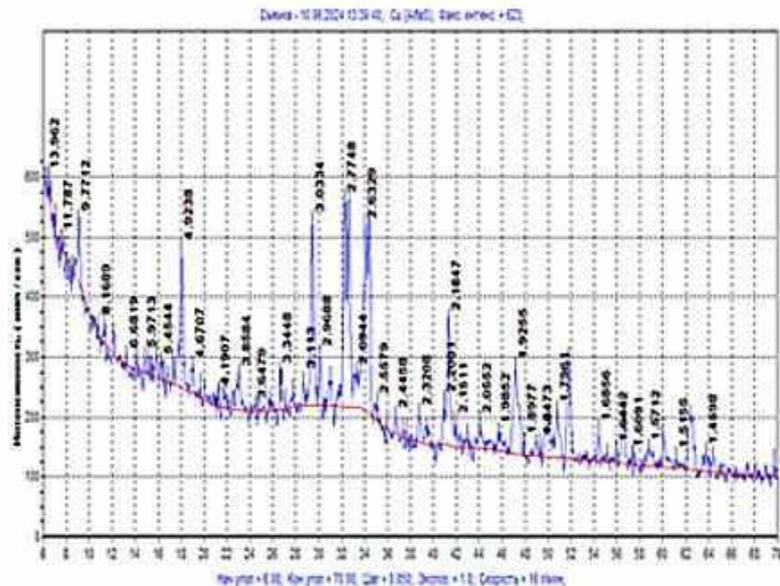
Figure 5

De-icing coating based on current conducting concrete



РИСУНОК 6

РЕНТГЕНОГРАММА ГИДРАТИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ:
 а) портландцемент ЦЕМ I 52,5Н
 б) портландцемент ЦЕМ I 52,5Н и углеродный компонент



а

Figure 6

X-ray of hydrated cement stone:
 а) Portland cement CEM I 52.5N
 б) Portland cement CEM I 52.5N and carbon component



б

Исследован фазовый состав продуктов гидратации портландцемента в присутствии углеродной добавки (рис. 6). Установлено отсутствие совместных продуктов взаимодействия, а также увеличение степени гидратации контрольного состава, содержащего только портландцементное вяжущее.

Изменение влажности токопроводящего бетона, в т.ч. в процессе твердения, оказывает влияние на проводимость бетона. Установлено, что при одновременном введении ТУ К-354 и углеродной фибры в контрольный состав в подобранном оптимальном соотношении проводимость в процессе твердения может не уменьшаться, или, наоборот, увеличиваться. Для ускоренного определения влияния количества свободной воды была осуществлена сушка образцов при 200 °С в течении 12 ч. Установлено, что при сушке образцов токопроводящего бетона оптимальных составов происходит увеличение их проводимости, при этом увеличение проводимости тем меньше, чем больше углеродной фибры, так как она снижает усадку при сушке (рис. 7), а повышение проводимости при

The phase composition of the hydration products of Portland cement in the presence of a carbon additive was studied (Fig. 6). The absence of joint interaction products was established, as well as an increase in the degree of hydration of the control composition containing only Portland cement binder.

A change in the moisture content of conductive concrete, including during the hardening process, affects the conductivity of concrete. It was found that with the simultaneous introduction of TU K-354 and carbon fiber into the control composition in the selected optimal ratio, the conductivity during the hardening process may not decrease, or, conversely, increase. To accelerate the determination of the effect of the amount of free water, the samples were dried at 200 °C for 12 hours. It was found that when drying samples of conductive concrete of optimal compositions, their conductivity increases, while the increase in conductivity is less, the more carbon fiber, since it reduces shrinkage during drying (Fig. 7), and the increase in conductivity during drying is associated with shrinkage and improved contact between conductive components. Further storage of dried samples in natural

сушке связано с усадкой и улучшении контакта между токопроводящими компонентами. Дальнейшее хранение высушенных образцов в естественных условиях приводит к сорбции влаги из воздуха, набуханию образцов и постепенному возвращению проводимости к значениям до сушки.

conditions leads to moisture sorption from the air, swelling of the samples and a gradual return of conductivity to values before drying.

РИСУНОК 7

ЗНАЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДО И ПОСЛЕ СУШКИ ПРИ 200С ОБРАЗЦОВ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ТУ К-354 15-20% И УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ 0,25-1%

Figure 7

Resistance values before and after drying at 200c of samples of optimal compositions with an amount of tu k-354 15-20% and carbon fiber 0.25-1%



При сушке происходит усадка цементного камня, которая приводит к улучшению контакта между частицами токопроводящих компонентов при условии их оптимального количества и соотношения между ними (оптимальный состав), что в свою очередь приводит к повышению проводимости после сушки. При увеличении количества углеродной фибры в диапазоне -0,25-1: от массы цемента сопротивление после сушки снижается в меньшей степени, так как углеродная фибра снижает усадку цементного камня. При хранении в естественных условиях после сушки, проводимость увеличивается до прежних значений.

During drying, the cement stone shrinks, which leads to improved contact between the particles of conductive components, provided their optimal amount and ratio between them (optimal composition), which in turn leads to increased conductivity after drying. With an increase in the amount of carbon fiber in the range -0.25-1: by weight of cement, the resistance after drying decreases to a lesser extent, since carbon fiber reduces the shrinkage of cement stone. When stored in natural conditions after drying, the conductivity increases to the previous values.

При увеличении подаваемого к образцу напряжения происходит увеличение проводимости. С увеличением количества углеродной фибры в диапазоне 0,25-1% в большей степени увеличивается проводимость при увеличении подаваемого напряжения в диапазоне 5-25 Вольт (рис. 8). Значения $K_{напр}$, по которому оценивалось снижение сопротивления при увеличении напряжения с 5 до 25 вольт у образцов с содержанием 15-20% ТУ К-354 и 0,25-1% углеродной фибры подчиняются закону нормального распределения (рис. 9).

As the voltage applied to the sample increases, the conductivity increases. With an increase in the amount of carbon fiber in the range of 0.25-1%, the conductivity increases to a greater extent with an increase in the supplied voltage in the range of 5-25 Volts (Fig. 8). The values of the $K_{напр}$, according to which the decrease in resistance was estimated with an increase in voltage from 5 to 25 volts in samples with a content of 15-20% TU K-354 and 0.25-1% of the carbon fiber obeys the law of normal distribution (Fig. 9).

РИСУНОК 8

ПОВЫШЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ОБРАЗЦОВ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ПОДАВАЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Figure 8

Increasing the conductivity of samples of optimal compositions with an increase in the applied voltage

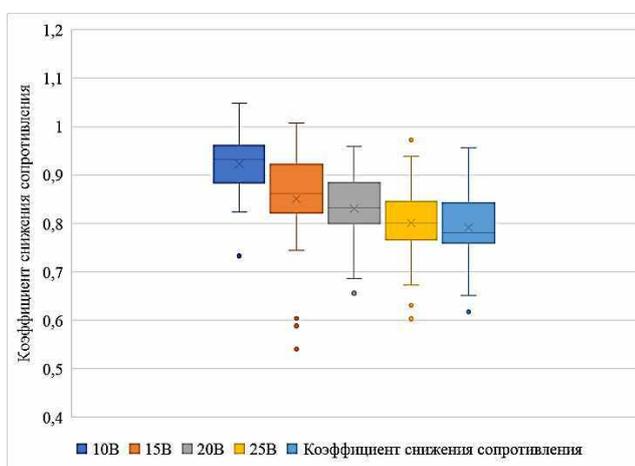
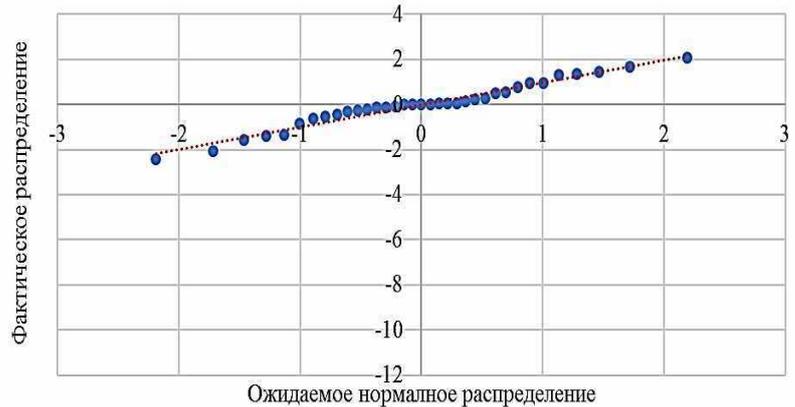


РИСУНОК 9

ГРАФИК КВАНТИЛЬ-КВАНТИЛЬ ДЛЯ ЗНАЧЕНИЙ $K_{изм}$ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ С 5 ДО 25 ВОЛЬТ ПО ВСЕМ СЕЧЕНИЯМ ОБРАЗЦОВ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ

Figure 9

The Q-Q plot for $K_{изм}$ values with an increase in voltage from 5 to 25 volts over all cross-sections of the samples of optimal compounds



Заключение

Получен самоуплотняющийся токопроводящий бетон нормального твердения с заданной стабильной повышенной электрической проводимостью, обладающий повышенными эксплуатационными характеристиками: прочностью на сжатие в возрасте 2 суток $R_{сж} = 27,6$ МПа, 28 суток $R_{сж} = 54,5$ МПа, морозостойкостью F200, водонепроницаемостью W20, удельным электрическим сопротивлением $0,25$ Ом*м, не изменяющимся в процессе твердения.

Методом РФА установлено отсутствие продуктов взаимодействия портландцемента и углеродных компонентов. Отмечено повышение степени гидратации портландцемента на 20% при введении технического углерода и углеродной фибры.

Установлено повышение проводимости токопроводящего бетона при сушке за счет усадки. Удельное электрическое сопротивление снижается тем меньше, чем больше углеродной фибры, снижающей усадку, в составе бетона.

Установлено повышение проводимости токопроводящего бетона при увеличении подаваемого напряжения с 5 до 30 вольт, увеличивающегося при увеличении количества углеродной фибры.

Литература:

1. Ларсен О. А., Бахрах А. М. Изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона в процессе твердения // Строительные материалы. – 2022. – № 11. – С. 10-14. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-808-11-10-14.
2. Ларсен О. А., Бахрах А. М. Композиционное вяжущее для токопроводящего бетона // Техника и технология силикатов. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 127-131.
3. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г.В. Бялобжецкий, А.К. Дюнин, Л.Н. Плакса, Л.М. Рудаков, Б.В. Уткин; под ред. А.К. Дюнина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 197 с.
4. Бахрах А. М., Ларсен О.А., Самченко С.В. Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона // Строительные материалы. – 2023. – № 11. – С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-00-00>
5. Samchenko S., Larsen O., Bakhrakh A., Solodov A. Electrically conductive cement paste, modified with highly efficient polymer plasticizer. Proceedings of XXI International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021. Volume 21 “Green Buildings Technologies and Materials”, Issue 6.1 doi: 10.5593/sgem2021/6.1/s26.45

Conclusions

A self-sealing conductive concrete of normal hardening with a given stable increased electrical conductivity has been obtained, which has improved performance characteristics: compressive strength at the age of 2 days $R_{zh} = 27.6$ MPa, 28 su-current $R_{zh} = 54.5$ MPa, frost resistance F200, water resistance W20, electrical resistivity 0.25 ohms*m, which does not change during the hardening process.

The XRD method established the absence of products of the interaction of Portland cement and carbon components. An increase in the degree of hydration of Portland cement by 20% was noted with the introduction of carbon black and carbon fiber.

An increase in the conductivity of conductive concrete during drying due to shrinkage has been established. The lower the electrical resistivity, the more carbon fiber, reducing shrinkage, in the composition of concrete.

An increase in the conductivity of conductive concrete was found with an increase in the applied voltage from 5 to 30 volts, which increases with an increase in the amount of carbon fiber.

References:

1. Larsen O. A., Bakhrakh A.M. Change in the electrical resistivity of conductive concrete during the hardening process // Stroitel'nyye materialy. – 2022. – No. 11. – pp. 10-14. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-808-11-10-14.
2. Larsen O. A., Bakhrakh A.M. Composite binder for conductive concrete // Technique and technology of silicates. – 2021. – Vol. 28, no. 3. – pp. 127-131.
3. Winter maintenance of highways / G.V. Byalobzhesky, A.K. Dunin, L.N. Plaksa, L.M. Rudakov, B.V. Utkin; edited by A.K. Dunin. – 2nd ed., reprint. and additional – M.: Transport, 1983. – 197 p.
4. Bakhrakh A.M., Larsen O.A., Samchenko S.V. Influence of the amount of a conductive component on the electrical resistivity of fine-grained electro-conductive concrete // Stroitel'nyye materialy. – 2023. – No. 11. – pp. 46-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-00-00>
5. Samchenko S., Larsen O., Bakhrakh A., Solodov A. Electrically conductive cement paste, modified with highly efficient polymer plasticizer. Proceedings of XXI International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021. Vol-ume 21 “Green Buildings Technologies and Materials”, Issue 6.1 doi: 10.5593/sgem2021/6.1/s26.45

6. Федюк Р.С., Кузьмин Д.Е., Батаршин В.О., и др. Электропроводящие бетоны для специальных сооружений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2017. – № 1. – С. 51–57.
7. Терехин И.А., Кремлев И.А., Кондратьев Ю.В. и др. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети, как электрического проводника // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 88–92.
8. Титова Т.С., Сацук Т.П., Терехин И.А., Тарабин И.В. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 7–11.
9. Агунов А.В., Терехин И.А., Баранов И.А. Анализ применения электропроводящих бетонов в электроэнергетике // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 5–15.
10. Пулатов, А.А. Бетон электропроводный пластического формования на электрокомпозиционном вяжущем. — Москва: МГСУ, 1995. — 150с.
11. Томаровщенко О. Н. Получение и свойства цементных токопроводящих композитов с использованием углеродных материалов и механически активированного песка. – Белгород: БГТУ им. Шухова, 2017. - 152 с.
12. Урханова, Л. А., Буянтуев С. Л., Урханова А. А., Лхасаранов С. А., Ардашова Г. Р., Федюк Р. С., Свинцов А. П., Иванов И. А. Механические и электрические свойства бетона, модифицированного углеродными наночастицами// Инженерно-строительный журнал. 2019. No8 (92). с. 163–172. DOI: 10.18720/MCE. 92.1
13. Рекомендации по приготовлению электропроводящего раствора: утв. Госстрой СССР Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ) 10.01.1983-Москва.1983.-9с.
14. Gao D., Sturm M., Mo Y.L., Electrical resistance of carbonnanofiber concrete // Smart material construction, № 20, pp. 101-112, 2011
15. Ларсен О.А., Бахрах А.М. Токопроводящие цементные системы на основе технического углерода и углеродной фибры // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 213-224. DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225, EDN ccskpt
6. Fedyuk R.S., Kuzmin D.E., Batarshin V.O., et al. Electrically conductive concretes for special structures // Safety of the Construction Fund of Russia. Problems and solutions. - 2017. – No. 1. – pp. 51-57.
7. Terekhin I.A., Kremlev I.A., Kondratiev Yu.V. and others. A model representation of dry concrete of a reinforced concrete foundation of a contact network as an electric conductor // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. - 2015. – No. 3. – pp. 88-92.
8. Titova T.S., Satsuk T.P., Terekhin I.A., Tarabin I.V. Assessment of electrical safety conditions when using contact network supports as natural earthing devices // Electrical Engineering. – 2021. – No. 2. – pp. 7-11.
9. Agunov A.V., Terekhin I.A., Baranov I.A. Analysis of the use of electrically conductive concretes in the electric power industry // Transport systems and technologies. – 2021. – Vol. 7. – No. 2. – pp. 5-15.
10. Pulatov, A.A. Electrically conductive plastic forming concrete on an electro-composite binder. — Moscow: MGSU, 1995. — 150s.
11. Tomarovshchenko O. N. Preparation and properties of cement conductive composites using carbon materials and mechanically activated sand. – Belgorod: BSTU named after Shukhov, 2017. 152 p.
12. Urkhanova, L. A., Buyantuev S. L., Urkhanova A. A., Lhasaranov S. A., Ardashova G. R., Fedyuk R. S., Svintsov A. P., Ivanov I. A. Mechanical and electrical properties of concrete modified with carbon nanoparticles// Civil Engineering magazine. 2019. No8 (92). pp. 163-172. DOI: 10.18720/MCE. 92.1
13. Recommendations for the preparation of an electrically conductive solution: approved Gosstroy of the USSR of the Order of the Red Banner of Labor Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) 10.01.1983-Moscow.1983.-9с.
14. Gao D., Sturm M., Mo Y.L., Electrical resistance of carbonnanofiber concrete // Smart material construction, № 20, pp. 101-112, 2011
15. Larsen O.A., Bakhrakh A.M. Electrically conductive cement systems based on carbon black and carbon fiber // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No3. – Pp. 213 – 224. DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225, EDN ccskpt

Работа представлена на II Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития».

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Ларсен Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Бахрах Антон Михайлович – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: bahrah@erkon-beton.ru (автор для связи)

Вклад авторов: Ларсен О.А. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Бахрах А.М. – разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Larsen Oksana Alexandrovna – PhD., Associate Professor; Federal State Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering",
E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Bakhrakh Anton Mikhailovich – postgraduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering"
E-mail: bahrah@erkon-beton.ru (author for contact)

Contribution of the author: Larsen O.A.- idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Bakhrakh A.M. - development of methods, material processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.