

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ БЕТОНЫ

Показана значимость получения электропроводящих бетонов. Приведены основные законы и положения, определяющие создание электропроводящих бетонов (бетэлов). Представлены различия свойств традиционного и электропроводящего бетонов в зависимости от применяемых добавок. Приведены основные показатели электропроводящего бетона, сравнительная характеристика типов электропроводящих бетонов и сравнение типов электропроводящих бетонов на сжатие и изгиб. Представлены технологические пределы изготовления электропроводящего бетона.

Электропроводящие бетоны – бетоны, содержащие в качестве компонента дисперсные частицы, которые вводятся в состав в качестве наполнителя (заполнителя) и обладающие свойствами проводников. Для таких добавок могут использоваться как органические материалы (коксовый уголь, технический углерод), так и металлические порошки (металлическая стружка). При помощи развития данного типа технологий для подобных бетонов получают дешёвые нагреватели для помещений с большой площадью. Электропроводящие бетоны относятся к классу бетонов с заданными электротехническими свойствами. Получение бетонов с заданными электротехническими свойствами может решать две задачи: снижение электрической проводимости бетона и, наоборот, её повышение. Бетоны с пониженной электрической проводимостью получили название изоляционных, с повышенной – бетэлов (бетонов электропроводных). Традиционный бетон в нормальных условиях практически диэлектрик или слабый проводник. Электропроводящий бетон модифицирован для обеспечения заметной электрической проводимости.

Одним из ключевых физических явлений, сопровождающих прохождение тока через электропроводящий бетон, является эффект Джоуля – Ленца. При протекании электрического тока в проводящей структуре выделяется тепло, пропорциональное квадрату силы тока и сопротивлению материала [1]:

$$Q = I^2 R t, \quad (1)$$

где Q – количество выделившегося тепла, Дж; I – сила тока, А; R – электрическое сопротивление материала, Ом; t – время прохождения тока, с.

Характер распределения электрического тока внутри бетона определяется пространственной конфигурацией проводящих наполнителей. При равномерном включении углеродных или металлических волокон формируется относительно однородная проводящая сеть, обеспечивающая стабильные электрические и тепловые характеристики. Если же проводящие компонен-

ты распределены неравномерно и образуют локальные скопления, то ток концентрируется преимущественно в этих зонах. Это приводит к следующим отрицательным последствиям: неоднородности нагрева, снижению эффективности системы и потенциальному возникновению термических напряжений. Поэтому корректный подбор состава и оптимизация технологических параметров приготовления электропроводящего бетона являются ключевыми факторами, определяющими его эксплуатационные свойства [2].

Микрофотография структуры бетона приведена на рисунке 1.

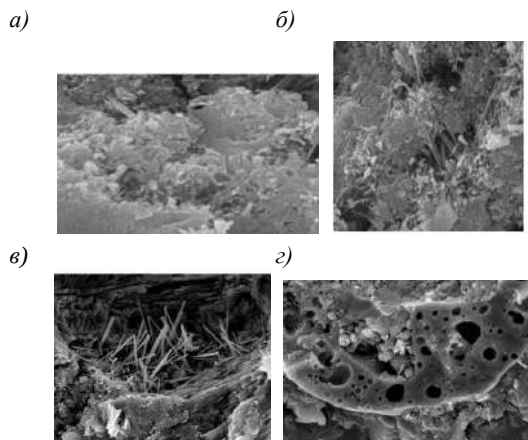


Рисунок 1 – Микрофотография структуры электропроводящего бетона:

- а* – короткопризматические кристаллы, имеющие продольное срастание в блоки;
б – гексагональные пластинки; игловидные кристаллы, пронизывающие поровое пространство;
в – форма дендритов или мелкокристаллическая; *з* – результат хемозипитексии

Если бетонная смесь помещена между электродами и подвергается воздействию переменного электрического поля, ионы, образовавшиеся в процессе гидратации цемента, начинают ускоряться под действием поля. Их движение в этом случае описывается соответствующим уравнением, отражающим динамику ионной проводимости в системе [2]:

$$m_i a_i = q_i \text{grad} U_i - \frac{q_i \sqrt{\frac{\sum z_i^2 e_0^2 n_i \cdot e^{\frac{z_i e_0 \Psi}{RT}}}{RT}}}{8\pi \epsilon \epsilon_0 RT \cdot \sqrt{\epsilon \epsilon_0 kT}} - q_i \cdot \frac{\Psi_0 \left(1 - e^{-2ZF a \cdot \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}}} \right)}{Z}, \quad (2)$$

где m_i – масса иона, кг; a_i – ускорение, получаемое ионом, м/с²; q_i – заряд иона, Кл; $\text{grad} U_i$ – градиент напряжённости прилагаемого электрического поля,

В/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; k – константа Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура раствора, К; n_i – локальная концентрация; z_i – валентность иона; e_0 – заряд электрона, Кл; C_∞ – концентрация раствора, г-моль/л; Z – расстояние от поверхности цементной частицы до иона, находящегося в движении под действием электрического поля, в диффузном слое, м; ψ – электрический потенциал в точке нахождения перемещающегося в электрическом поле иона; ψ_0 – электрический потенциал на поверхности цементной частицы, В; R – газовая постоянная.

Важным фактором является подвижность ионов, так как в электропроводящих бетонах существует два параллельных механизма проводимости: электронный (по добавкам) и ионный (по поровой жидкости цементного камня). Игнорирование ионной составляющей приводит к ошибкам в расчетах, нестабильности свойств:

$$\mu = c \cdot D = c \cdot \exp \left\{ \frac{-2}{h \cdot \sqrt{(2m_i(\Delta U - kT)) \cdot \Delta x}} \right\}, \quad (3)$$

где $c = \text{const}$; D – вероятность (средняя) перехода через потенциальный барьер; h – постоянная Планка; U – высота потенциального барьера (средняя); kT – энергия иона; Δx – ширина потенциального барьера (взята на уровне атомных расстояний: $x = 10^{-10}$ м).

Электропроводящий бетон состоит из вяжущего: портландцемента, стандартных заполнителей (песок, щебень) и воды, при этом в смесь вводят проводящие наполнители для создания проводящей сети внутри бетона. Для сохранения удобоукладываемости и равномерного распределения тонкодисперсных проводящих частиц в состав добавляют суперпластификаторы и дисперсанты. При использовании металлических наполнителей применяют ингибиторы коррозии и, при необходимости, антикоррозионные покрытия на волокнах. Примеры добавок, используемых в качестве дисперсных частиц, и их влияние на свойства электропроводящего бетона, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Добавки электропроводящего бетона

Добавка	Уровень проводимости	Влияние на прочность	Технологичность производства	Основные области применения
Графит	Средний	Незначительное	Требует равномерного распределения	Антистатические покрытия, умеренный нагрев

Окончание таблицы 1

Добавка	Уровень проводимости	Влияние на прочность	Технологичность производства	Основные области применения
Углеродные волокна	Высокий	Повышают прочность (армирование)	Сложнее равномерно распределить	Антиобледенение, обогрев, армирование
Металлургический шлак	Низкий – средний	Может снижать прочность	Легко вводится в смесь	Экономичные решения, умеренная проводимость
Стальная микросетка	Высокий	Может вызывать коррозию	Требует защиты от влаги	Заземление, энергетические конструкции
Углеродные нанотрубки	Очень высокий	Улучшают свойства при малых дозах	Требуют сложной технологии	Высокотехнологичные системы, «умные» здания

Добавки формируют внутри цементного камня сеть проводящих каналов, обеспечивающих движение заряженных частиц. В отличие от традиционного бетона, структура которого препятствует прохождению тока, модифицированный материал демонстрирует заметное снижение электрического сопротивления [3].

Различия свойств традиционного и электропроводящего бетона представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства материалов

Свойство	Материал	
	Традиционный бетон (диэлектрик)	Электропроводящий бетон
Электропроводность	Очень низкая (изолятор)	Высокая (за счет добавок)
Основные компоненты	Цемент, песок, щебень, вода	Цемент + проводящие добавки (графит, углеродные волокна, металл)
Прочность	Высокая	Сохраняется, но зависит от состава
Область применения	Конструкции, несущие элементы	Антиобледенение, обогрев, заземление, «умные» здания
Стоимость	Низкая	Более высокая

В зависимости от добавки электропроводящие бетоны делят по типам. Сравнительная характеристика типов электропроводящих бетонов приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика типов электропроводящих бетонов

Тип бетона	Удельное сопротивление, Ом·м	Основные преимущества	Основные недостатки
Углеродный	0,2–10	Коррозионная стойкость, стабильность	Ограниченная проводимость
Металлический	0,1–0,5	Высокая проводимость, прочность	Коррозия, большой вес
Дисперсно-армированный	0,3–0,5	Оптимальное соотношение свойств	Сложность приготовления
Полимерный	0,01–1	Гибкость, адгезия	Ограниченная термостойкость

Поведение образцов различных типов электропроводящего бетона при различных видах нагрузок приведено на рисунке 2.

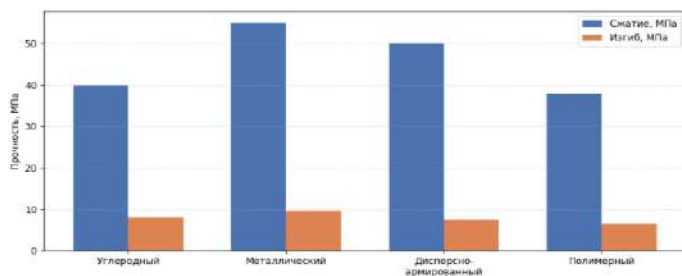


Рисунок 2 – Сравнение типов электропроводящих бетонов по результатам испытаний на сжатие и изгиб

Для оценки работы электропроводящего бетона применяются следующие показатели (таблица 4). Производство электропроводящего бетона требует спецоборудования: дозаторов, высокосдвигового смесителя, сухих смесителей или вибробункеров для предварительного смешивания, виброопалубки, вибростолов и приборов для измерения удельного сопротивления (четырёхэлектродным методом).

Таблица 4 – Показатели электропроводящего бетона

Параметры	Значение	Единица измерения
Максимальная температура нагрева	До 60	°С
Потребляемая мощность	10–30	Вт/м²
Толщина бетонного слоя	3–5	См
Удельное сопротивление	10–100	Ом·см
Срок службы системы	15–20	Год

Технологические пределы изготовления электропроводящего бетона:

- разработка рецептуры (целевое значение удельного сопротивления и требуемые прочностные характеристики);
- приём, складирование сырья, просеивание тонкодисперсных порошков, приготовление мастер-пасты;
- дозирование, сухое предсмешивание (цемент, мелкий заполнитель, проводящий порошок);
- контроль удобоукладываемости (осадка конуса);
- добавление крупного заполнителя, затем волокон или металлических элементов;
- влажное смешивание с водой и суперпластификатором в режиме высокого сдвига;
- укладка с виброуплотнением и установка электроконтактов;
- отверждение: влажный уход ≥ 7 суток, при необходимости – контролируемый прогрев;
- испытания на прочность, удельное сопротивление, коррозионную стойкость;
- оформление документов, маркировка, отгрузка.

Перед утилизацией электропроводящий бетон классифицируют по типу наполнителя. Предпочтительны варианты повторного применения (ремонтные блоки, обратные засыпки). При переработке проводят дробление, магнитную сепарацию для извлечения металла и разделение лёгких углеродных фракций. При высоком содержании опасных компонентов отходы утилизируют как промышленные. Свойства электропроводящего бетона находят практическое применение в инженерных сооружениях. Тепло, выделяемое при прохождении электрического тока через материал, препятствует образованию наледи и обеспечивает безопасные условия эксплуатации в холодный период. Существуют реализованные проекты с использованием данного материала: проект в США (штат Небраска) – мост с электропроводящим бетоном для антиобледенения; складские комплексы в Китае – бетонные полы с подогревом и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Булюбаш, Б. В. Закон Джоуля – Ленца: лица, идеи, эксперименты / Б. В. Булюбаш. – URД; https://zakon_dzhoulya_lenca.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
- 2 Бахрах, А. М. Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона / А. М. Бахрах, О. А. Ларсен, С. В. Самченко // Строительные материалы. – 2023. – № 11. – С. 46–51.
- 3 Коньков, В. В. Некоторые особенности применения электропроводящего бетона / В. В. Коньков // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 242–247.

Получено 19.05.2026