

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЕТОНА С АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Б. Бакболат^{1*}, Ф. Султанов^{1,2,3}, Ч. Даулбаев³, З. Мансуров^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Назарбаев Университет, пр. Кабанбай Батыра, 53, Нур-Султан, Казахстан

Аннотация

В статье представлены экспериментальные данные по оптимизации параметров процесса электроформования волокон для дальнейшего их использования в создании антиобледенительного бетона. Получены наноразмерные волокна на основе полиакрилонитрила (ПАН) и исследован процесс их термостабилизации и кальцинации. Методом электроформования были получены нановолокна, исследованы их физико-химические свойства и морфология поверхности. Определены оптимальные составы барито-бетонной смеси с добавками нановолокон ПАН в различных соотношениях и исследованы величины электрического сопротивления полученных образцов. Установлено, что содержание даже 0,2 мас.% углеродных нановолокон ($14,1 \pm 0,2$ МОм) приводит к резкому снижению сопротивления бетона. Дальнейшее увеличение содержания углеродных нановолокон в составе барито-бетонных смесей ведет к существенному снижению сопротивления образцов. Так при содержании 1 мас.% углеродных нановолокон в барито-бетонной смеси привело к значениям сопротивления равным $0,42 \pm 0,12$ МОм. При этом сопротивление контрольного образца (чистый бетон) составило $15 \pm 0,81$ МОм.

Ключевые слова: электроформование, бетон, волокна, электропроводимость, полиакрилонитрил.

1. Введение

Большинство дорожно-транспортных происшествий и травм в зимнее время происходит из-за снега и гололеда на дорогах. Муниципалитеты и гражданские лица прилагают огромные усилия для уборки улиц и пешеходных дорожек. Посыпание улиц солью и ручная очистка считаются традиционными методами. Нанесение химикатов с использованием стационарных или мобильных систем распыления также является распространенным методом. Несмотря на то, что эти методы широко используются, их негативное воздействие на транспортные средства, дороги и окружающую среду, в долгосрочной перспективе, бесспорно. Новые и экологически безопасные технологии с умеренной стоимостью становятся все более востребованными по сравнению с существующими.

Для борьбы с обледенением используется каменная соль (NaCl) [1] и другие соли, такие как CaCl_2 [2] и MgCl_2 [3]. Применение солей известно как эффективный и малозатратный метод борьбы с обледенением. Прежде чем использовать эти методы, стоимость и простота применения не должны быть единственной заботой, их последствия также должны быть тщательно оценены. Например, соли и химикаты изменяют механические свойства и состав бетона и сокращают ожидаемый срок службы. В частности, касательные напряжения между замороженными и незамерзшими слоями создают трещины в бетоне [4]. Добавление в соль антикоррозионных химикатов может замедлить коррозию стальной арматуры [5]. Однако накопление этих веществ в почве является причиной многих экологических нарушений.

*Ответственный автор
E-mail: boss_carter@mail.ru (Б. Бакболат)

Способность поверхности отталкивать воду – гидрофобность – характеризуется краевым углом смачивания [6]. За счет низкой поверхностной энергии и шероховатости гидрофобные противогололедные покрытия не только водонепроницаемы, но и устойчивы к эрозии. Даже при неизбежной адгезии, лед легко удаляется с таких поверхностей благодаря низкой силе сцепления [7]. В качестве компонента покрытий эти материалы представляют исключительную практичность при строительстве в местах, где техническое обслуживание может быть проблематично (туннели, подземный паркинг, фундамент зданий), и в местах ниже уровня грунтовых вод, где необходимо постоянно обеспечивать сухость водонасыщенного грунта. Ведь известно, что гидрофобные поверхности обладают отличным свойством самоочищения, которое и продлевает срок службы покрытий [8]. Примером такого материала может быть тефлон. Тефлон давно известен как эффективный антифрикционный гидрофобный материал. В работе [9] группа ученых выяснили, что адгезия смеси тефлона и полифениленсульфида, использованных в качестве супергидрофобного покрытия алюминиевых поверхностей, в 5 раз больше, чем у покрытия из чистого тефлона, что намного облегчает удаление льда. Кроме того, при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ образование льда на поверхностях с супергидрофобным покрытием занимало меньше времени, а также не отяжеляло конструкцию.

Токопроводящий бетон, который также используется в качестве конструкционного материала для дорог, рассматривается как потенциальный путь к развитию дорожной системы с противообледенением. В 1999 г. в работе [10] был предложен тип токопроводящего бетона, наполненного стальными волокнами, и были исследованы противообледенительные свойства этого бетона в мостах. Хотя этот метод может удалить определенное количество льда на мосту, на сегодняшний день он не получил широкого распространения для удаления льда/таяния снега из-за таких проблем, как высокое удельное сопротивление, низкая электротермическая эффективность и коррозия стального волокна.

В статье представлены результаты исследования по получению углеродных нановолокон и создание антиобледенительных покрытий на их основе. Также представлены экспериментальные данные по оптимизации параметров процесса электроформования волокон.

2. Материалы и методы

2.1 Получение раствора ДМФА/ПАН

Исходными материалами для получения нановолокон являются диметилформамид (ДМФА, Sigma Aldrich) и полиакрилонитрил (ПАН), которые использовались в качестве растворителя и полимера. Предварительно взвешенное количество ПАН (10 мас.%) растворяли в ДМФА (90 мас.%) при постоянном перемешивании до полного растворения в течение 1 часа при комнатной температуре.

2.2 Электроформование нановолокон на основе ПАН/ДМФА и их дальнейшая кальцинация

Электроформование волокон проводили при комнатной температуре при напряжении 15 кВ и скорости потока 0,05 мл/ч. Коллектор располагался на расстоянии 15 см от иглы. В качестве коллектора использовалась алюминиевая фольга. Собранные электроформованием волокна термостабилизировали при $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин и прокачивали при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин в атмосфере аргона.

2.3 Характеристика полученных образцов

Морфологию поверхности полученных нановолокон анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа QUANTA 3D 200i при ускоряющем напряжении 15 кВ.

2.4 Тесты на электрическое сопротивление

Для определения электрического сопротивления образцов бетона ($2\times 2\times 2\text{ см}$) был использован двухзонный метод, суть которого заключается в расчете сопротивления путем измерения электрического тока и напряжения согласно следующим формулам:

$$V = IR(V); \quad (1)$$

$$R = \frac{V}{I} (\Omega); \quad (2)$$

$$\rho = R \frac{A}{L} (\Omega); \quad (3)$$

где V – подаваемое напряжение, I – значение электрического тока, R – сопротивление образца, ρ – удельное сопротивление образца, A и L – площадь и длина образца, соответственно.

Схема и фотографии экспериментальной установки для определения электрического сопротивления высушенных кубических образцов бетона представлены на рис. 1.

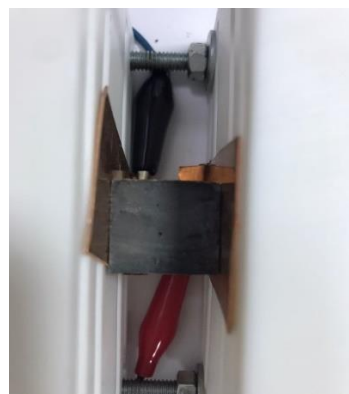
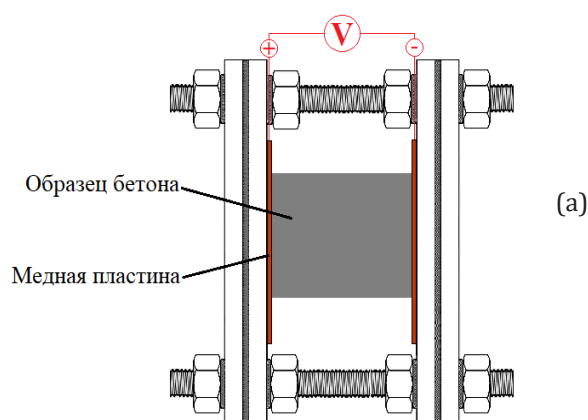


Рис. 1. Схема (а) и фотографии (б, в) экспериментальной установки для определения электрического сопротивления полученных образцов.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Оптимальные параметры для процесса электроспиннинга

Концентрация раствора является одним из факторов, определяющих диаметр волокон.

Было обнаружено, что волокна с меньшим диаметром могут быть получены путем снижения концентрации раствора полимера. Однако, вязкость раствора также играет немаловажную роль в формировании волокон. В ходе экспериментальных работ было установлено, что оптимальным соотношением ДМФА и ПАНа является 9:1 (таблица 1) при постоянном значении электрического поля и расстоянии между иглой и коллектором. При содержании ПАНа 10 мас.% в растворе для электроформования, обнаружено, что радиус струи « $\delta \sim 1$ » уменьшается в три раза после испарения растворителя.

Таблица 1. Концентрации компонентов в растворе, используемых для процесса электроформования

№	ДМФА, мас.%	ПАН, мас.%	Примечание
1	75	25	Раствор затвердевает в игле, формирование волокон не наблюдается
2	80	20	Раствор затвердевает в игле, формирование волокон не наблюдается
3	85	15	На поверхности коллектора формируются затвердевшие капли раствора
4	90	10	Происходит равномерное формирование волокон, которые легко отделяются от коллектора
5	95	5	Раствор прекурсора капает из иглы, образование волокон не наблюдается

Важную роль в процессе электроформования играют термодинамические свойства раствора на основе ДМФА/ПАН. Эксперименты показали, что при нормальных условиях отверждение жидкой струи раствора начинается на расстоянии от капиллярно-дозировочного сопла (иглы) не менее 3 см и заканчивается на расстоянии от него не более 30 см, где струя уже успевает развернуться перпендикулярно направлению внешнего электрического поля, но еще не достигла коллектора. При других условиях (20 см и выше) отверждение струи наблюдалось уже в ранней стадии процесса электроформования. В конечном счете это приводит к высыханию раствора внутри сопла, что препятствует образованию волокон.

В противоположном случае, на поверхности коллектора происходит осаждение волокон с неиспарившимся растворителем, что ухудшает структуру волокнистого слоя [11].

С увеличением напряжения усиливается электростатическая сила раствора, благодаря которой происходит растяжение струи, что приводит к уменьшению диаметра волокон. Было обнаружено, что изменение приложенного напряжения влияет на форму начальной капли, что оказывает эффект на морфологию поверхности и размеры формируемых волокон.

Таким образом экспериментальным путем были проанализированы факторы, влияющие на морфологию и размерность образуемых волокон в процессе электроформования и установлены оптимальные параметры для проведения процесса электроформования микро- и наноразмерных волокон:

- расстояние от коллектора до иглы – 15 см;
- значение высоковольтного напряжения – 15 кВ;
- скорость подачи раствора шприцевым насосом – 0,05 мл/ч;
- соотношение ДМФА к ПАНу – 9:1.

3.2 Электроформование наноразмерных волокон и их кальциниция

Фотографии установки для формирования волокон методом электроформования, а также полученных волокон показаны на рис. 2. Установка для электроформования волокон состоит из источника высокого напряжения, шприцевого насоса, коллектора и шприца с иглой.

Для формирования микро и наноразмерных волокон был приготовлен раствор ПАНа в ДМФА в соотношении 1:9. Для этого опреде-

ленную навеску ПАНа растворяли в ДМФА при активном перемешивании с помощью магнитной мешалки при комнатной температуре в течение 30 мин до получения прозрачного и гомогенного раствора. Далее полученный раствор помещали в шприц, который устанавливался на шприцевый насос. К игле шприца и коллектору подводили электрическое поле и начинали подачу полимера при скорости 0,05 мл/ч. Затем производили увеличение напряжения в установке, которое инициирует процесс вытягивания струи полимера из сопла шприца на поверхность коллектора.

Так как алюминий имеет хорошую электропроводность было решено использовать фольгу на его основе в качестве осадительного электрода (коллектора). В среднем производство волокон из раствора объемом 2,5 мл занимало 8 часов на данной собранной установке, при этом образуются волокна массой 0,19 гр.

Ниже приведена таблица с основными параметрами процесса электроформования микро и наноразмерных волокон (таблица 2). Согласно результатам, высокое соотношение компонентов, приводит к увеличению диаметра формируемых волокон, что связано с гидродинамическими процессами. Для формирования волокон с минимальными размерами диаметров были подобраны оптимальные параметры процесса электроформования наноразмерных волокон.

Прикладываемое напряжение является решающим фактором в электроформовании, поскольку пороговое напряжение должно быть превышено для выталкивания заряженных струй из конуса Тейлора [11,12]. После достижения порогового напряжения происходит образование волокон. Экспериментально

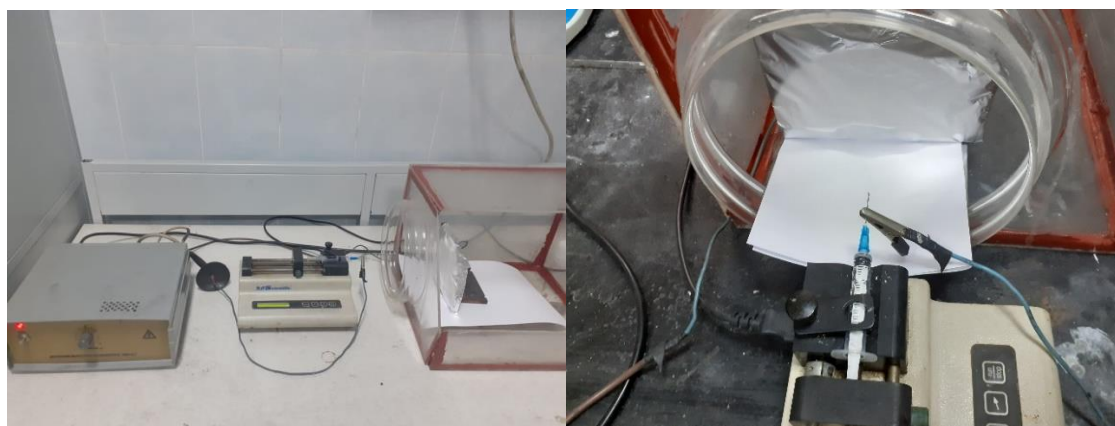


Рис. 2. Фотографии установки для электроформования волокон из раствора на основе ДМФА/ПАН.

Таблица 2. Параметры процесса электроформования наноразмерных волокон

Серия эксперимента	Скорость подачи раствора, мл/ч	Значение высоковольтного напряжения, кВ	Соотношение ПАН/ДМФА, %	Расстояние от иглы до коллектора, см	Диаметр волокон, нм
1	0,20	20	25/75	16	450
2	0,15	18	20/80	17	350
3	0,10	17	15/85	18	250
4	0,05	15	10/90	15	100-200

определено, что напряжение, необходимое на 1 см составляет 1,5 кВ. В работе использовался блок питания на 30 кВт, при этом расстояние между иглой и коллектором составляло 15 см.

На рис. 3 показаны СЭМ-изображения нановолокон на основе ПАН полученные методом электроспиннинга при 15 кВ и расстоянии между иглой и электродом 15 см. Из снимков СЭМ наглядно видно, что сформированные волокна однородны, произвольно ориентированы имеют гладкую поверхность без видимых дефектов. Средний диаметр волокон находится в интервале от 89 до 220 нм. При этом видно, что увеличение концентрации ПАНа в растворе для электроформования волокон ведет к небольшому увеличению среднего диаметра волокон в сформированной сетке. Установлено, что наименьшим средним значением диаметра волокон обладают образцы, полученные при использовании раствора с 10 мас.% содержанием ПАНа.

После получения полимерных волокон на основе ДМФА/ПАН были проведены исследования по определению оптимального режима

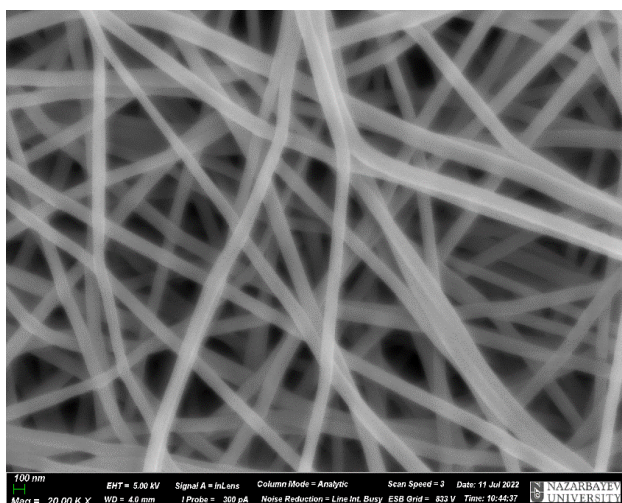


Рис. 3. СЭМ снимки полученных полимерных нановолокон на основе ПАНа.

их кальцинации, позволяющего получить высокую степень отверждения волокон.

Экспериментально определено, что температура термостабилизации в инертной среде значительно влияет на свойства и морфологию поверхности углеродных волокон. При термостабилизации волокон при 180 °С в их структуре происходят различные объемные изменения, что ведет к формированию наноструктурированной поверхности в твердой фазе волокон. При этом, важным параметром является не только химические превращения, но и массоперенос, который ведет к образованию кластеров, термодинамически устойчивых к влиянию параметров процесса термостабилизации. При этом, в ходе термостабилизации наблюдается формирование промежуточных состояний в материалы, имеющие влияние на морфологические характеристики формируемых углеродных волокон.

Вторая стадия термической обработки полученных волокон – стадия кальцинации проводилась при температуре 500 °С в инертной атмосфере в течение 30 мин. При кальцинации происходит окислительное дегидрирование волокон с образование хромофорных сопряженных связей $-C=N-$, что приводит к окрашиванию волокон ПАН вначале в оранжево-коричневый свет, затем в черный. Можно предположить, что формируемые волокна на основе ПАН преимущественно содержат в себе нитрильные функциональные группы [14].

Из рис. 4 наглядно видно, что после кальцинации волокна подвергаются значительной усадке и снижению веса, что обусловлено испарением компонентов, летучих в данном диапазоне температур и формированием углеродистого материала. Более того, в результате термостабилизации и кальцинации волокна изменили цвет с белого на черный.

Таким образом методом электроформования были получены волокна на основе ПАНа, растворенного в ДМФА. Полученные волокна



Рис. 4. Фотография полученных волокон до (слева) и после кальцинации (справа).

были кальцинированы в две стадии: термостабилизация при температуре 180 °С в течение 15 мин и кальцинация при температуре 500 °С в инертной среде аргона в течение 30 мин. В результате были получены углеродные волокна и оптимизированы параметры процесса их кальцинации.

3.3 Разработка оптимальных составов барито-бетонных смесей с добавками углеродных нановолокон

Для определения оптимального состава барито-бетонной смеси были приготовлены образцы с добавлением различных концентраций углеродных нановолокон. Проведенный литературный анализ показал, что оптимальное количество углеродных нановолокон необходимых для улучшения электрических свойств бетона находится в диапазоне от 0,75 до 1 мас.% [14,15]. Тем не менее, исследовании

об углеродных нановолокнах применяемых для создания электропроводящего бетона не достаточно. Учитывая это были проведены серии экспериментов, посвященные исследованию электрического сопротивления образцов бетона, содержащих углеродные нановолокна при различных соотношениях. Схема приготовления бетонных смесей с добавками углеродных наноматериалов представлена на рис. 5.

Для приготовления всех образцов были использованы следующие соотношения: цемент марки П – 50 г, песок – 75 г, вода – 40 мл, добавки (углеродные нановолокна) – от 1 до 2 масс.%. После взвешивания всех связующих и добавок, раствор подвергался ультразвуковой обработке с частотой 32 кГц в течение 30 мин для полной гомогенизации смеси. Экспериментально определено, что при перемешивании сухой бетонной смеси и раствора с добавками требуется больше воды (45 мл), чем для контрольного образца, не содержащего углеродные

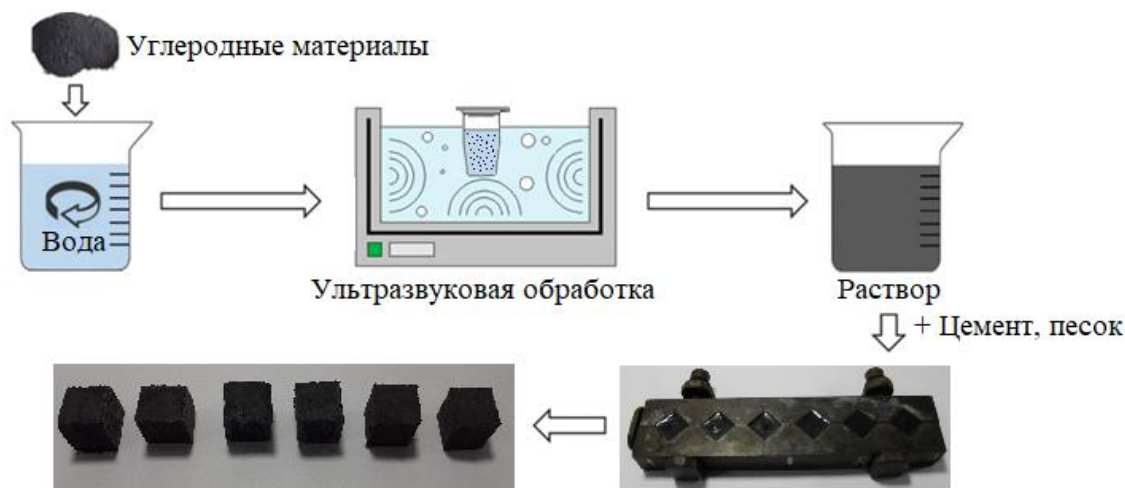


Рис. 5. Схема приготовления образцов бетона с добавлением углеродных нановолокон.

наноматериалы, что вероятно связано с высокой удельной площадью поверхности углеродных нановолокон. Особое внимание уделялось процессу высушивания подготовленных образцов. Согласно работе [16], схватывание цементно-водной смеси, обеспечивается процессом гидратации, который состоит из двух стадий: загустение и твердение. Процесс загустения или схватывания проходит в течение 6 ч после смешивания с образованием иглообразных кристаллов, а спустя 8 ч проходит процесс образования алюминатов, который влияет на прочность полученных образцов бетона. Очевидно, что условия высушивания такие как влажность и температура существенно влияют на все физико-химические параметры бетона. Учитывая это, процесс высушивания был проведен в эксикаторе, на дне которого была вода для поддержания влажности в нем. На рис. 6 представлены фотографии процесса высушивания контрольных образцов бетона и с добавлением углеродных нановолокон.

Набор прочности бетона начинается после 10 ч и связан с процессом образования силикатной структуры, которая формируется в результате гидратации, а спустя 28 дней она полностью вытесняет алюминатную структуру [16]. В связи с этим, дальнейшие исследо-

вания электрического сопротивления полученных образцов проводились спустя 28 дней после приготовления и замешивания раствора бетонной смеси с добавлением углеродных нановолокон.

3.4 Измерение электрического сопротивления

Напряжение, подаваемое на медные пластины, составляло 12 В, при этом корпус был изготовлен из диэлектрического материала (тефлон). В результате проведенных исследований были получены значения электрического сопротивления для бетонной смеси с добавлением углеродных нановолокон которые представлены в таблице 3.

Анализ данных показал, что даже небольшое содержание углеродных волокон (от 0,6 масс.%) существенно оказывает влияние на электрическое сопротивление образцов, в сравнении с контрольным образцом (чистый бетон) для которого сопротивление составило $15 \pm 0,81$ МОм. Полученные значения электрического сопротивления для барито-бетона с углеродными нановолокнами с содержанием от 0,1 до 2 мас.% находятся в полном согласии с результатами работ, посвященных исследованию углеродных нановолокон для

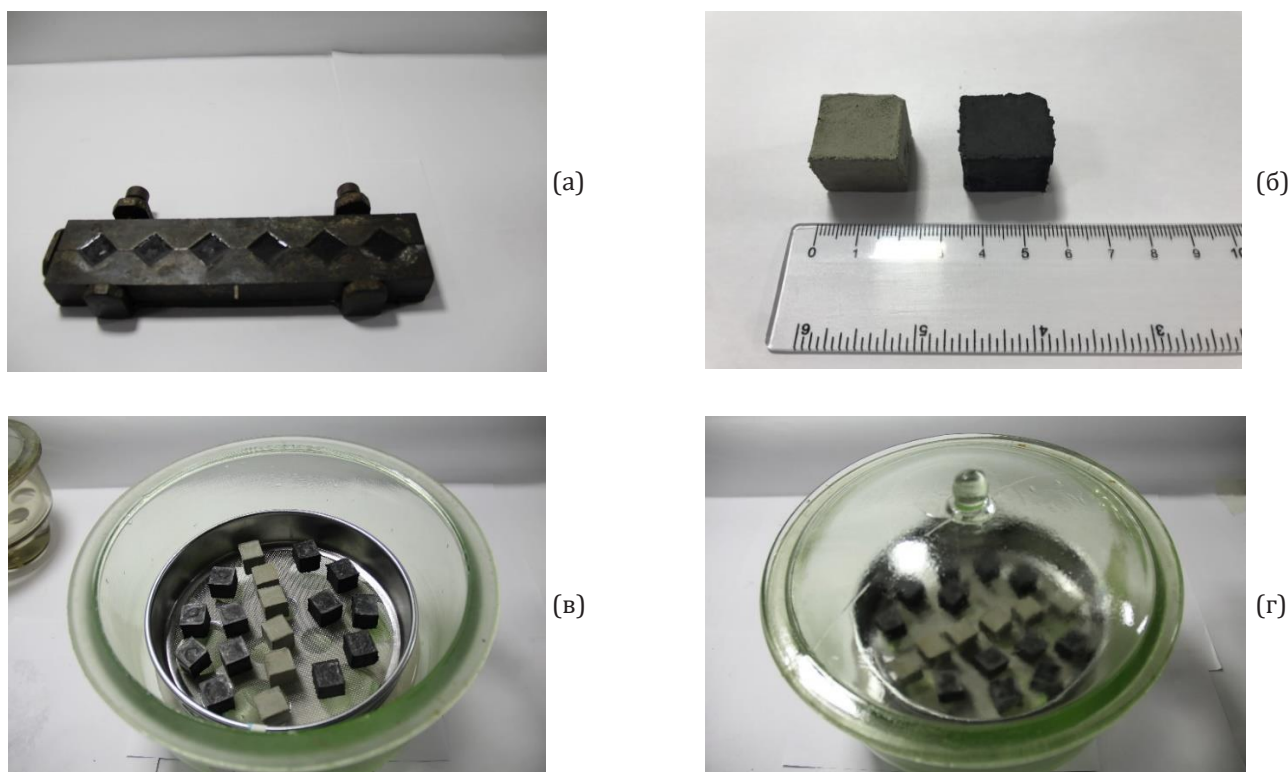


Рис. 6. Фотографии процесса формирования и высушивания образцов бетона: а – стальная форма; б – образцы бетона; в, г – стеклянный эксикатор для сушки образцов.

Таблица 3. Данные электрического сопротивления бетона с добавлением углеродных нановолокон

№	Углеродные нановолокна		
	Содержание, мас.%	Сопротивление, МОм	Мощность, Вт
1	0,2	14,1±0,2	7,09
2	0,4	6,3±0,87	15,87
3	0,6	2,9±0,15	34,48
4	0,8	1,7±0,3	58,82
5	1,0	0,42±0,12	238,10
6	1,2	0,38±0,046	263,16
7	1,4	0,381±0,17	262,47
8	1,6	0,34±0,01	294,12
9	1,8	0,35±0,021	285,71
10	2,0	0,39±0,019	256,41
11	2,2	0,42±0,084	238,10
12	2,4	0,37±0,014	270,27

Для контрольного образца без добавления углеродных нановолокон сопротивление составило 15±0,81 МОм

электропроводящего бетона [17–19]. Однако, добавление их в бетонную смесь свыше 1 мас.% экономически не выгодно. По данным, представленным в работе [20], добавление 0,5 мас.% углеродных нановолокон снижает стоимость электропроводящего бетона на 43% в сравнении с добавлением 6 мас.% наноразмерного углерода и на 37% в сравнении с добавлением 1,5 мас.% переработанной металлической стружки. Очевидно, что для определения оптимального состава барито-бетонной смеси необходимы исследования электропроводности в течение длительного периода времени (более 2 лет), которые позволят определить зависимость сопротивления от времени и оценить влияние углеродных нановолокон на коррозионную стойкость электропроводящего бетона.

При создании бетона с противообледительными свойствами преимуществом метода электротермического нагрева перед гидрофобными соединениями состоит в том что электропроводящий слой может быть дополнительно покрыт износостойким слоем материалов что увеличивает срок его эксплуатации, в то время как гидрофобные покрытия из за отсутствия дополнительной защиты поверхности могут легко терять свои свойства под воздействием внешних факторов.

4. Заключение

Добавление углеродных нановолокон в бетонную смесь значительно изменяет электрическое сопротивление бетона. Введение в бетонную смесь 0,2 мас.% углеродных нановолокон приводит к резкому снижению сопротивления до 14,1±0,2 МОм. Однако увеличение концентрации углеродных нановолокон выше 1,0 мас.% в бетонной смеси не привело к существенной разнице в значениях электросопротивления. Таким образом, установлено, что оптимальное содержание углеродных нановолокон в барито-бетонной смеси должно не превышать 1 мас.%, так как дальнейшее увеличение не оказывает существенного влияния на его электрическое сопротивление, при этом содержание углеродных волокон свыше 1 мас.% негативно сказывается на стоимости электропроводящего бетона. В будущем данный тип бетона бетон станет привлекательным кандидатом для дорожного покрытия в климатических зонах с отрицательными температурами.

Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН № OR11465430).

Литература

- [1]. Menzies TR (1992) Resources, Conservation and Recycling 7(1–3):43-50. DOI:10.1016/0921-3449(92)90005-M
- [2]. Poursaee A, Laurent A, Hansson CM (2010) Cement and Concrete Research 40(3):426-430. DOI:10.1016/j.cemconres.2009.09.029
- [3]. Hopkins GR, French SS, Brodie ED (2013) Environmental Pollution 173:264-269. DOI:10.1016/j.envpol.2012.10.002
- [4]. Wang K, Nelsen DE, Nixon WA (2006) Cement and Concrete Composites 28(2):173-188. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2005.07.006
- [5]. Jang J-W, Iwasaki I, Gillis HJ, Weiblen PW (1995) Advanced Cement Based Materials 2(4):152-160. DOI:10.1016/1065-7355(95)90016-0
- [6]. Flores-Vivian I, Hejazi V, Kozhukhova MI, Nosonovsky M, Sobolev K (2013) ACS Appl. Mater. Interfaces 5(24):13284-13294. DOI:10.1021/am404272v
- [7]. Li J, Ueda E, Paulssen D, Levkin PA (2019) Adv. Funct. Mater. 29(4):1802317. DOI:10.1002/adfm.201802317

- [8]. Xue C-H, Li H-G, Guo X-J, Ding Y-R, Liu B-Y, An Q-F, Zhou Y (2021) Chemical Engineering Journal 424:130553. DOI:10.1016/j.cej.2021.130553
- [9]. Nazhipkyzy M, Mansurov Z (2016) Journal of Engineering Physics and Thermodynamics. 89(6):1498-1503. DOI:10.1007/s10891-016-1516-3
- [10]. Yehia S, Tuan CY, Ferdon D, Chen B (2000) MJ. 97:2. DOI:10.14359/821
- [11]. Xue J, Xie J, Liu W, Xia Y (2017) Acc. Chem. Res. 50(8):1976-1987. DOI:10.1021/acs.accounts.7b00218
- [12]. Mishra R, Militky J, Venkataraman M (2019) Nanotechnology in Textiles 35-161. DOI:10.1016/B978-0-08-102609-0.00002-X
- [13]. Badawy SM, Dessouki AM (2003) J. Phys. Chem. B. 107(41):11273-11279. DOI:10.1021/jp034603j
- [14]. El-Dieb AS, El-Ghareeb MA, Abdel-Rahman MAH, Nasr ESA (2018) Journal of Building Engineering 15:61-69. DOI:10.1016/j.jobbe.2017.10.012
- [15]. Whittington HW, McCarter J, Forde MC (1981) Magazine of Concrete Research 33(114):48-60. DOI:10.1680/macr.1981.33.114.48
- [16]. Alzeyadi A, Yu T (2021) Construction and Building Materials 302:124317. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124317
- [17]. Shen L, Yao X, Zhu D, Alkayem NF, Cao M, Ren Q (2021) International Journal of Heat and Mass Transfer. 180:121732. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121732
- [18]. AlShareedah O, Nassiri S (2021) Construction and Building Materials 305:124749. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124749
- [19]. Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z (2005) Carbon 43(7):1358-1363. DOI:10.1016/j.carbon.2004.12.033
- [20]. Dehghanpour H, Yilmaz K, Ipek M (2019) Construction and Building Materials. 221:109-121. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025

Using carbon materials to create concrete with anti-icing properties

B. Bakbolat^{1*}, F. Sultanov^{1,2,3}, Ch. Daulbaev³, Z. Mansurov^{1,2}

¹Institute of combustion problems, 172 Bogenbai Batyr str., Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

³Nazarbayev University, 53, Kabanbay Batyr ave., Nur-Sultan, Kazakhstan

Abstract

The article presents experimental data on optimizing the parameters of the process of

electrospinning fibers for their further use in the creation of anti-icing concrete. Nanosized fibers based on polyacrylonitrile (PAN) have been obtained and the process of their thermal stabilization and calcination has been studied. Nanofibers were obtained by electrospinning, their physicochemical properties and surface morphology were studied. The optimal compositions of the barite-concrete mixture with the addition of PAN nanofibers in various ratios were determined, and the values of the electrical resistance of the obtained samples were studied. It has been established that the content of even 0.2 wt.% carbon nanofibers (14.1 ± 0.2 M Ω) leads to a sharp decrease in the resistance of concrete. A further increase in the content of carbon nanofibers in the composition of barite-concrete mixtures leads to a significant decrease in the resistance of the samples. Thus, when the content of 1 wt.% carbon nanofibers in the barite-concrete mixture led to resistance values equal to 0.42 ± 0.12 M Ω . In this case, the resistance of the control sample (pure concrete) was 15 ± 0.81 M Ω .
Keywords: Electrospinning, concrete, fibers, electrical conductivity, polyacrylonitrile.

Мұздануға қарсы қасиеттері бар бетон жасау үшін көміртекті материалдарды пайдалану

Б. Бакболат^{1*}, Ф. Султанов^{1,2,3}, Ч. Даулбаев³, З. Мансуров^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к-сі, 172, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, әл-Фараби даңғ., 71, Алматы, Қазақстан

³Назарбаев Университеті, Қабанбай батыр даңғ., 53, Нур-Сұлтан, Қазақстан

Аңдатпа

Мақалада мұздануға қарсы бетон жасауда пайдалануға арналған талшықтарды электроформалау процесімен алу параметрлерін оңтайландыру бойынша тәжірибелік деректер келтірілген. Полиакрилонитрил (ПАН) негізіндегі наноөлшемді талшықтар алынды және оларды термиялық тұрақтандыру және кальцинация процесі зерттелді. Наноталшықтар электроформалау әдісімен алынды, олардың физика-химиялық қасиеттері мен беткі морфологиясы зерттелді. Әртүрлі қатынаста ПАН наноталшықтары қосылған барит-бетон

қоспасының оңтайлы құрамдары анықталып, алынған үлгілердің электр кедергілерінің мәндері зерттелді. Тіпті 0,2 мас.% көміртекті наноталшықтардың ($14,1 \pm 0,2$ МОм) болуы бетонның кедергісінің күрт төмендеуіне әкелетіні анықталды. Барит-бетон қоспаларының құрамындағы көміртекті наноталшықтар мөлшерінің одан әрі артуы үлгілердің кедергісінің

айтарлықтай төмендеуіне әкеледі. Осылайша, барит-бетон қоспасында 1 мас.% көміртекті наноталшықтардың мөлшері болуы $0,42 \pm 0,12$ МОм тең кедергі мәндеріне әкелді. Бұл жағдайда бастапқы үлгінің (таза бетон) кедергісі $15 \pm 0,81$ МОм болды.

Кілт сөздер: Электроформалау, бетон, талшықтар, электрөткізгіштік, полиакрилонитрил.