

Statsenko, V. Obukhov, and A. Smirnova // In 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), p. 1663-1666.

7. Feng D., Feng M.Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review / D. Feng, M.Q. Feng // Engineering Structures. 2018. Vol. 156. p. 105–117.

УДК 691.492, 54.084

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОКАПСУЛ, СОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ САМОВООТАНОВЛЕНИЯ БЕТОНА

Тан Дунян, Ван Минюань, С.Н. Бондаренко, С.Н. Ковшар
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, bosn@mail.ru

Concrete cement is the most widely used building material applicable in road construction. Under real exploitation conditions concrete structures are subjected to different types of local destructions such as cracks which lead to the destruction of the roadway as a whole.

In order to ensure the safety, stability and durability of the road coating, technology scheme for using microcapsules with concrete self-healing components is proposed. Scientific and practical approaches to the preparation of such type microcapsules containing components for self-healing concrete are proposed.

The structural features and strength characteristics of the obtained microcapsules have been studied. An assessment of the kinetic features of the restoration of the destroyed structure of cement concrete is given.

Key words: self-healing concrete, microcapsules, structural durability

Традиционно используемые в дорожном строительстве композитные строительные конгломераты, например, цементобетон, подвержены старению. В процессе эксплуатации это приводит к образованию трещин, локальных дефектов и, в конечном итоге, к разрушению дорожного полотна. В настоящее время эту проблему пытаются решать путем добавления в цементобетонную матрицу материала дорожного покрытия микрокапсул, наполненных "восстанавливающими" веществами, ещё на стадии формирования композитной структуры бетонного конгломерата.

Идея самовосстановления заключается в том, что напряжения, возникающие в процессе образования трещин и других структурных дефектов, разрывают капсулы и освобождают при этом ядро, содержащее «заживляющие» вяжущие и расширяющиеся компоненты. Эти компоненты вступают в химическую реакцию с водой, проникающей в бетон и формируют целевой «заживляющий» продукт, который поступая в образовавшуюся дефектную полость или трещину, обеспечивает восстановление и стабилизацию композитной структуры материала.

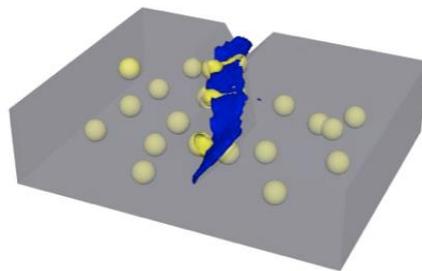


Рис 1. Схема, иллюстрирующая принцип работы микрокапсулы после её разрыва и активизации ядра, содержащего «заживляющие» компоненты.

Микрокапсулами принято называть частицы твердых, жидких, газообразных веществ, растворов, дисперсий или более сложных систем, которые заключены в оболочку из какого-либо другого соединения, например, из какого-либо плёнкообразующего полимера. Характерная особенность микрокапсул – эффективная, максимально тонкая оболочка. Обычно для твёрдых веществ используется такой способ упаковки в капсулу, когда содержимое капсулы (ядро или по другому, сердцевина) заключено в оболочку из материала, имеющего толщину стенок капсулы, которая обеспечивает изоляцию от окружающей среды не менее 70 % по весу полезного компонента [1-3].

Существующие методы микрокапсулирования могут быть условно разделены на три основные группы [4 - 8].

Первая группа - физико-химические методы, которые включают коацервацию, осаждение нерастворителем, образование новой фазы при изменении температуры, упаривание летучего растворителя, отверждение расплавов в жидких средах, экстракционное замещение, высушивание распылением, физическую адсорбцию.

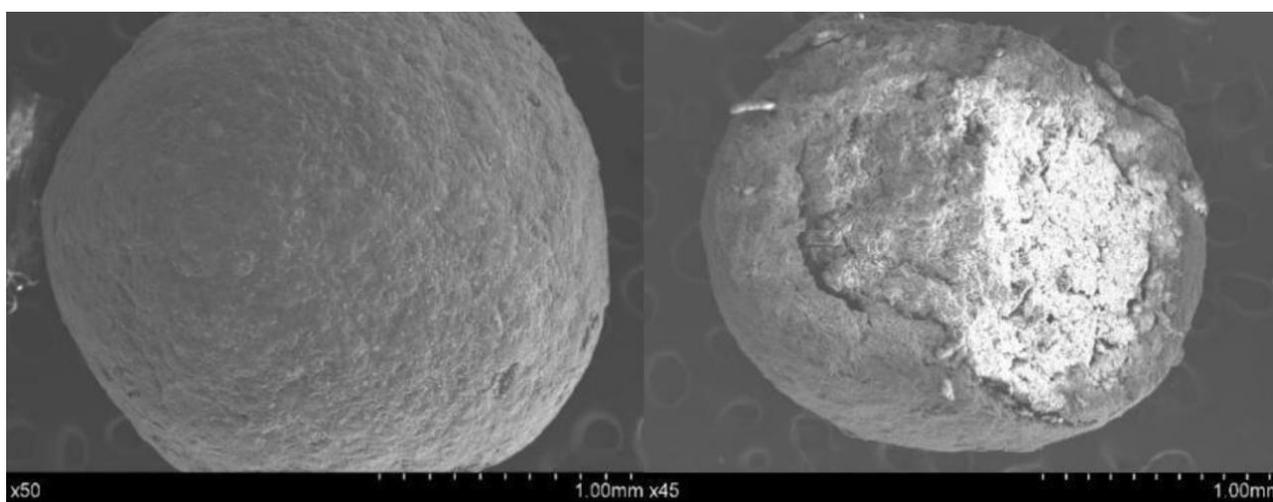
Ко второй группе относятся химические методы: образование новой фазы путём поликонденсации, полимеризация или сшивания полимеров.

Третья группа - это физические методы: напыление в псевдооживленном слое, экструзия и конденсация паров и некоторые другие методы. Такая классификация, в основу которой положена природа процессов, протекающих при микрокапсулировании, достаточно условна. На практике часто используется сочетание различных методов.

Нами была разработана и опробована технологическая схема приготовления микрокапсул для самовосстановления повреждённого цементобетонного покрытия, представляющая собой одну из разновидностей метода, основанного на реакции полимеризации в эмульсиях и суспензиях [4,5]. Был подобран состав реакционной смеси для проведения полимеризации *in situ* (на месте) и также базовый состав материала для формирования ядра. Реализация метода полимеризация *in situ* происходила в реакционной среде, включающей присутствие реакционного мономера и раствора, содержащего диметилбензол, этиловый спирт и этилцеллюлозу для формирования стенок капсулы. Дисперсионной средой являлся эмульгатор Твин 80 (Полисорбат 80). Этот эмульгатор представляет собой неионогенный ПАВ, имеющий в качестве липофильной группы производное олеиновой кислоты (химическое название - полиоксиэтилен (20)-сорбитанмоноолеат). В состав ядра (сердцевины) микрокапсулы вводится базовый компонент на основе традиционных неорганических вяжущих, и компонент сердцевины, который после разрыва оболочки обеспечивает протекание процессов расширения и заполнения дефектных полостей и трещин в бетонной матрице (т.е. самовосстановление). В состав композиции, формирующей сердцевину микрокапсулы также вводился связующий (клеящий) компонент, который обеспечивает адгезию на поверхности трещины и последующее связывание (склеивание) заполненных дефектов в единый конгломерат. В качестве связующего компонента сердцевины (ядра) был выбран силикат натрия, а в качестве набухающего компонента - бентонит, который удовлетворяет требованиям к расширению и адгезии микрокапсул. Вклад каждого компонента материала сердцевины должен, во-первых, обеспечивать хороший эффект склеивания, а во-вторых, гарантировать, что расширяющийся компонент может полностью заполнить трещину после расширения. При определении количественного состава компонентов ядра нами были установлены их оптимальные соотношения (пропорции). Слишком большое содержание расширяющего компонента создаёт дополнительные усилия, которые могут разрушить структуру самовосстанавливающегося бетона. Внешний вид микрокапсул, изготовленных по предложенной нами технологической схеме представлен на рисунке 2.

Изображения на микрофотографиях получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Micro SEM, совмещённого с анализатором энергетического спектра. На изображении поврежденной микрокапсулы (рисунок 2.), можно видеть, что материал сердцевины (ядра) и материал оболочки капсулы чётко дифференцированы.

Структура материала сердцевины не такая плотная, как у материала оболочки. Микрофотографии показывают, что форма микрокапсул представляет собой относительно правильную сферу, а размер частиц колеблется от 1000 мкм до 1200 мкм, поверхность покрыта более грубой целлюлозой, а структура относительно плотная, что в принципе может обеспечить герметизацию микрокапсул в неповреждённом состоянии. Конструкция таких микрокапсул может обеспечить после их раскрытия самовосстановление бетона, используемого в составе дорожного покрытия. Предложенный нами компонентный состав материала ядра (сердцевины) микрокапсул отвечает основным нормативным требованиям, предъявляемым к материалам для обеспечения качественного ремонта бетонных покрытий автомобильных дорог. То есть: высокой скорости протекания восстановительных реакций при контакте с водой, отсутствию дополнительных побочных реакций с бетонной матрицей, нетоксичности и безопасности при эксплуатации, стабильности химических свойств и некоторым другим требованиям. После растрескивания материал стенки в определенной степени размягчается в водной среде, поэтому он более чувствителен к образованию трещин. Таким образом, микрокапсулы, приготовленные в этом эксперименте, соответствуют требованиям к их конструкции, которая может обеспечить запуск механизма самовосстановления при раскрытии сердцевины. Материал сердцевины микрокапсул подбирался таким образом, чтобы удовлетворять следующим двум основным требованиям: первое – при соблюдении определенных условий материал сердцевины должен увеличиваться в объеме, блокировать трещины и предотвращать попадание агрессивных веществ из внешней среды (то есть реализуется возможность расширения). При этом, благодаря тщательному контролю и соблюдению пропорций компонентов микрокапсулы, а также регулированию режимов вспенивания предотвращается чрезмерное расширение, растрескивание и вторичное повреждение восстанавливаемой бетонной матрицы. Второе требование – хорошая адгезия структурных компонентов микрокапсул. В частности, материал сердцевины должен прикрепляться и вступать в контакт с конкретным участком трещины, чтобы способствовать локальному протеканию реакций по восстановлению структуры и прочности матрицы.



Микрофотографии исходной капсулы

Микрофотография капсулы с повреждённой оболочкой

Рис. 2

Формирование микрокапсул. Таким образом, в качестве основных компонентов для формирования структуры ядра микрокапсул нами были отобраны силикат натрия, бентонит и метилцеллюлоза. В качестве базового полимерного материала оболочки (стенки) микрокапсулы была выбрана этилцеллюлоза. Химическая формула этилцеллюлозы - $[C_6H_7O_2 (OC_2H_5)_3]_x$ n. Этилцеллюлоза представляет собой неионный эфир целлюлозы, который нерастворим в воде, но растворим в органических растворителях (в нашем случае

в качестве растворителя используется ксилол). После получения из подготовленной смеси компонентов вязкой суспензии, путём испарения при высокой температуре удаляется вода. Это приводит к постепенной потере реакционной активности смеси, уплотнению материала формируемой стенки капсулы и, в итоге, к полной инкапсуляции содержимого ядра. Значение pH реакционной среды играет важную роль в формировании структуры микрокапсул. В зависимости от показателя pH структура формируемого материала может различаться; она может быть или линейной или поперечно-сшитой. Предложенная схема приготовления даёт возможность контролировать и эффективно управлять такими характеристиками формируемой капсулы как размер частиц целевого продукта, толщина и прочность стенок капсулы. Эту возможность обеспечивают как различные режимы полимеризации *in situ* так и дополнительные методы обработки реакционной смеси (такие как, экструдирование, послойное формирование оболочек, высушивание дисперсионной среды в различных режимах). Реализация предложенной нами технологической схемы обеспечивает возможность формирования микрокапсул с размерами от 1 – 5 мкм до 0,5 - 2,0 мм. Капсулы размерами от 100 мкм до нескольких мм можно получить с использованием центрифуг, грануляторов, экструдированных устройств и в псевдооживленном слое. Такая схема обеспечивает возможности практического применения таких микрокапсул в самых различных областях строительной отрасли, в соответствии с их реальными эксплуатационными характеристиками, простотой промышленного производства и низкой стоимостью.

Существует много параметров характеризующих микрокапсулы, таких как константа проницаемости, прочность стенки капсулы, размер частиц и толщина стенки микрокапсул. В данной работе для проведения испытаний были отобраны микрокапсулы с размером частиц около 1200 мкм. Для этих микрокапсул с использованием сканирующей электронной микроскопии и анализа энергетического спектра было проведено изучение состава, а также предварительное опробование целесообразности добавления микрокапсул в бетон на стадии приготовления цементного раствора.

Технический принцип использования микрокапсул для самовосстановления повреждённых цементобетонных матриц предполагает включение в образцы, изготовленные на основе цементобетона, микрокапсул, на которые после формования и отверждения материала воздействуют компоненты структурного напряжения, которые разрывают их.

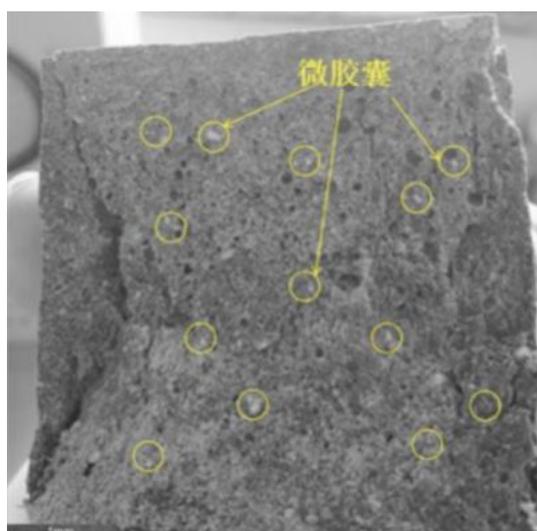


Рис. 3. Разрез образца цементобетона с микрокапсулами (сканирующий электронный микроскоп Micro SEM)). Стрелками на фотографии показаны места локализации микрокапсул

Когда в образце под нагрузкой появляются микротрещины или зазоры и оболочка микрокапсул разрывается, окружающая вода за счет капиллярного действия проникает в

трещины и вступает в реакцию с материалом сердцевины. Силикат натрия из материала сердцевины в присутствии воды может участвовать в определенных процессах отверждения при взаимодействии с материалом матрицы на основе цемента по реакции:



В дальнейшем, в присутствии достаточного количества воды и добавки фторсиликата натрия происходит реакция с образованием $\text{Si}(\text{OH})_4$ имеющего свойства геля, по реакционной схеме:



производя больше силиката кальция и диоксида кремния, которые являясь основными компонентами материалов на основе цемента, устраняют (залечивают) трещины путём склеивания их по границам. В то же время бентонит в составе материала сердцевины после поглощения воды расширяется, адсорбируется на их активной поверхности и также заполняет трещины. Это приводит к дополнительному восстановлению повреждённой матрицы за счёт связывания её структурных элементов в единую конгломератную структуру (см. рисунок 4)

Таким образом, проведенное исследование показывает, что используемый нами материал сердцевины в принципе может удовлетворить потребности в ремонте трещин в результате протекания реакций «самозалечивания».

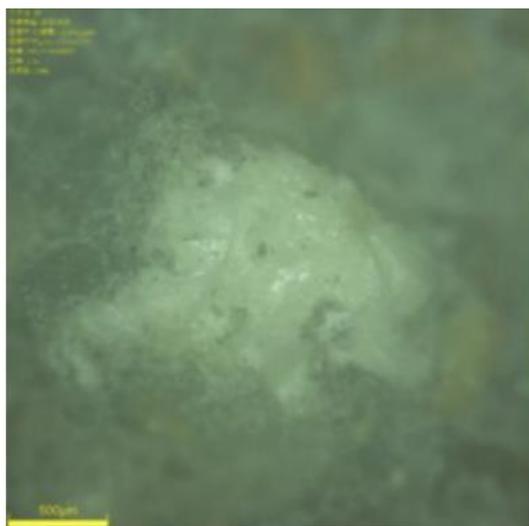


Рис. 4. Содержимое сердцевины микрокапсулы после разрыва (изображение получено с помощью электронного микроскопа Micro SEM)

Поскольку прочность на сжатие образцов цементобетона с разным содержанием микрокапсул различна, невозможно оценить эффект самовосстановления всех образцов с только одной прочностью на сжатие. Поэтому для оценки эффекта восстановления также используется скорость восстановления прочности образцов R . Образец был предварительно нагружен с давлением, которое составляло 70% от предела прочности образца на сжатие. После приложения в течение 3 мин нагрузки на испытуемый образец эту нагрузку снимали, а предварительно нагруженные образцы помещали в дистиллированную воду для отверждения соответственно на 10 и 20 суток. После отверждения было проведено испытание на сжатие. Нами предполагалось, что полученный результат испытаний соответствует показателю по прочности, который может быть получен при проведении соответствующих нормативам ремонтных работ. Что касается механических свойств самовосстанавливающихся образцов цементного раствора, содержание микрокапсул влияет на прочность на сжатие образцов материала на основе микрокапсульного цемента,

отвержденных в течение 28 дней при различных дозировках микрокапсул, как показано на рисунке 5. Из рисунка видно, что прочность на сжатие образца цементного раствора имеет тенденцию к снижению, а с увеличением содержания микрокапсул прочность на сжатие постепенно снижается. По сравнению с прочностью на сжатие обычных образцов материалов на цементной основе при содержании микрокапсул 4,0 % прочность микрокапсульного цементного раствора снижается на 12 %. При содержании микрокапсул 5,0 % прочность на сжатие на 17 % ниже, чем у образцов материала на основе цемента без включения микрокапсул, что не удовлетворяет общетехническим требованиям. Однако при содержании микрокапсул 1 % прочность образцов кратковременно возрастает по сравнению с прочностью обычных образцов. Даже при содержании микрокапсул 2 % прочность образцов материала на основе микрокапсульного цемента все же выше, чем у обычных образцов. Результаты испытаний прочности образцов на сжатие представлены на рисунке 5. Предполагаются две причины снижения прочности на сжатие. С одной стороны, сами микрокапсулы имеют низкую прочность. После добавления к образцу они действуют как внутренняя пористая структура, которая разрушает первоначальную структуру образца и снижает прочность образца. С другой стороны, при добавлении микрокапсул снижается относительная плотность материала, прочность которого обеспечивается цементом, что ослабляет прочность образца. Однако при содержании микрокапсул 1% прочность образцов раствора увеличивалась. Анализ показал, что фторсиликат натрия который был добавлен во время изготовления образцов для испытаний, является своего рода замедлителем схватывания бетона, а правильно подобранное количество этой добавки помогает повысить прочность бетона. Во время начального процесса перемешивания раствора небольшое количество микрокапсул разрывается, и материал сердцевин из разорванных предварительно микрокапсул выполняет связующую роль, что и улучшает прочность испытываемого образца. Результаты испытаний прочности на сжатие образцов с различным относительным содержанием микрокапсул (от 1% до 6% , представлены на рисунке 5.

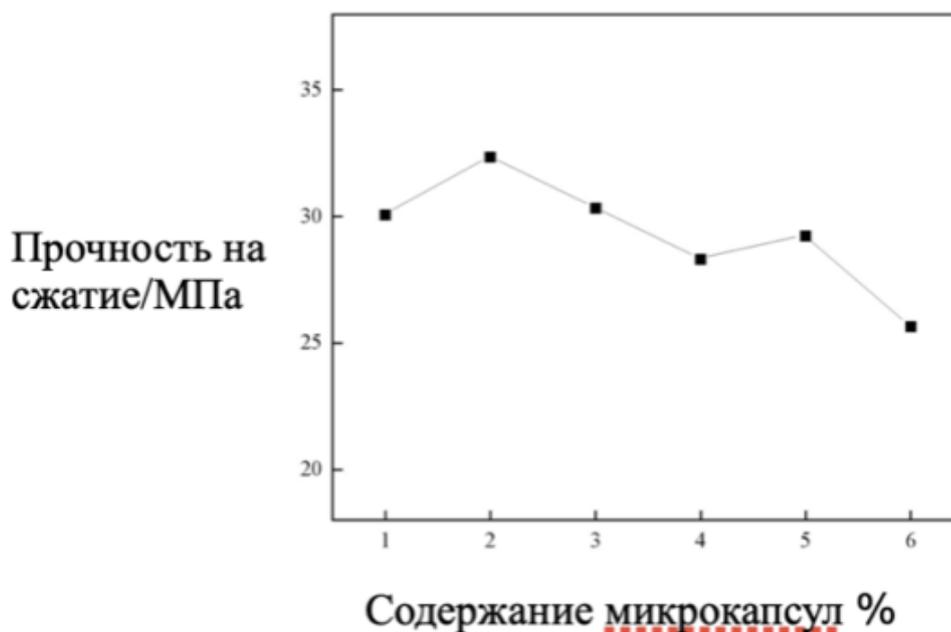


Рис. 5. Распределение прочности на сжатие в зависимости от содержания (в %) микрокапсул в испытываемом образце цементобетона

Принимая во внимание влияние временного цикла отверждения на прочность образцов на сжатие, был изготовлен образец с содержанием микрокапсул 2%, а образец материала на основе обычного цемента использовался в качестве контрольного эталона (см. рисунок 6.).

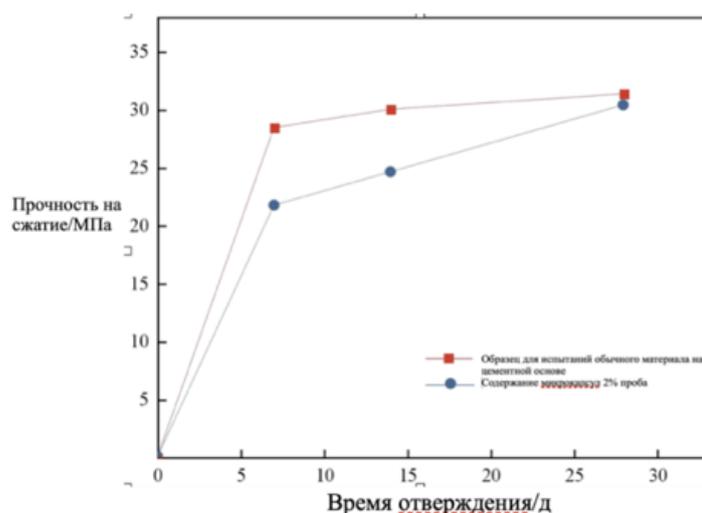


Рис. 6. Изменение прочности на сжатие при сравнении образцов содержащих 2% микрокапсул (зависимость на нижнем графике) с контрольным эталонным) образцом (зависимость на верхнем графике)

Из рисунка 6 видно, что начальная прочность образца материала на основе микрокапсульного цемента низкая, скорость набора прочности ниже, чем у контрольного; прочность на сжатие после отверждения в течение 7 дней составляет всего 70% прочности на сжатие образца из обычного цементного раствора. Прочность на сжатие образцов материала на основе микрокапсульного цемента быстро увеличивается в среднесрочной перспективе (после 10, 20 и 28 суток отверждения). В результате конечная прочность образцов становится даже выше, чем у контрольных образцов на основе обычного цемента. Это связано с тем, что по причине замедления схватывания фторсиликата натрия снижает начальную прочность образцов из строительного раствора. Механическая прочность самой микрокапсулы низкая, а ее введение в качестве слабого элемента снижает прочность образца на сжатие. Кроме того, фторсиликат натрия является своего рода замедлителем схватывания цементобетона. Однако, в среднесрочной перспективе прочность образца увеличивается, поскольку замедляющее действие фторсиликата натрия ослабевает и в дальнейшем прочность образца может изменяться в нормальном режиме. В процессе подготовки образцов при перемешивании цементного раствора часть микрокапсул разрывается и силикат натрия из материала сердцевин также принимает участие в процессах цементации, что в совокупности приводит к значительному увеличению прочности испытываемого образца.

Резюме: Объектом исследования в проведенных нами экспериментах были микрокапсулы, содержащие компоненты для самовосстановления бетона. Нами была разработана и опробована технологическая схема приготовления таких микрокапсул для самовосстановления поврежденной цементобетонной матрицы дорожного покрытия. Предложенная схема даёт возможность контролировать и эффективно управлять такими характеристиками формируемой микрокапсулы как размер, толщина и прочность стенок. Был подобран состав реакционной смеси для проведения полимеризации (*in situ*), а также базовый компонентный состав материала для формирования ядра. Изготовленные по предложенной схеме микрокапсулы были введены в образцы цементобетона и испытаны для оценки эффекта восстановления и стабилизации композитной структуры поврежденного материала. Установлена принципиальная возможность использования полученных микрокапсул для активации процессов восстановления поврежденной цементобетонной матрицы дорожного покрытия в режиме самовосстановления.

Литература

1. Microencapsulation, Process and Applications. Ed. J. E. Vandegaer, N. Y., London: Plenum Press, 1974, p. 180
2. Солодовник В.Д. Микрокапсулирование. М.: Химия, 1980, 216 с.
3. Афанасьев А.Г. Микрокапсулирование и некоторые области его применения -М.; Знание.1982, 64 с.(Новое в жизни, науке, технике. Сер.«Химия» 1982, №3)
4. Arshady R. / Preparation of microspheres and microcapsules by interfacial polycondensation techniques. // Journal of Microencapsulation. –1989. –Т. 6.– № 1. – С. 13-28.
5. Tiarks F., Landfester K., Antonietti M. / Preparation of polymeric nanocapsules by miniemulsion polymerization. // Langmuir. – 2001. – Т. 17. – № 3. – С. 908-918.
6. Gouin S. / Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. // Trends in Food Science & Technology. – 2004. – Т. 15. – № 7-8. – С. 330-347.
7. M. Wu, B. Johannesson, M. Geiker, Constr. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Build. Mater. 2012, 28, 571.
8. Ши Да, Ши Кайцзюнь, Ву Земей и др. Прогресс в исследованиях самовосстановления на основе компонентов материалов на основе цемента [J]. Китайский журнал материалов. 2021 (7) : с.35.

УДК 625. 7/8. 004

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА УРОВЕНЬ ОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.Х. Уроков¹⁾, Д.В. Ташев²⁾

¹⁾ Ташкентский государственный транспортный университет,
ул. Адылходжаева, 1, 100067, г. Ташкент, Узбекистан, asil2000@mail.ru,

²⁾Ферганский политехнический институт,
ул. Ферганская, 86, 150107, г. Фергана, Узбексистан, tashev_2020@mail.ru

Данная статья посвящена изучению влияния скорости и плотности движения на автомобильных дорогах с целью обеспечения безопасности движения на автомобильных дорогах Ферганской долины.

Ключевые слова: Дороги, скорость движения, транспортный поток, уровень опасности, дорожное районирование.

В мире, в том числе и в Узбекистане, автомобильные дороги являются важным достоянием страны, основой экономики республики и одним из главных приоритетов ее развития.

В Республике Узбекистан сегодня автомобильным транспортом перевозится около 98 % пассажиров и более 92 % грузов.

На сегодняшний день в условиях быстрого роста населения и транспортных потоков определение уровня опасности дорожного движения и обеспечение безопасности движения на автомобильных дорогах и улицах города остается одной из главных актуальных проблем.

Территория республики составляет 448,9 тыс. км², из них территория Ферганской долины 19,2 тыс. км², т.е. 4,2%. Население республики составляет более 35 271,2 млн человек, из них доля населения Долинных областей «Андижан-Фергана-Наманган» составляет 29%.

В том числе, общая протяженность сети автомобильных дорог нашей Республики составляет более 209496 км, из них Ферганская долина составляет 24% сети автомобильных