

# СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ С ЦЕМЕНТОБЕТОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В США: НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ (Организация и направления исследований в области цементобетонных покрытий)



**Радовский Б. С.,**

д. т. н., проф. (Internet Laboratories, Inc., США)

## Об авторе:

**Радовский Борис Самойлович** окончил Киевский Автомобильно-дорожный институт (КАДИ) в 1961 г. В 1961–1963 гг. работал инженером Мостостроя № 1 на строительстве мостов через р. Днепр в Киеве. В 1964–1966 гг. — аспирант СоюздорНИИ (Ленинградского филиала). С 1966 по 1986 г. — научный сотрудник и заведующий лабораторией прочности и испытаний дорожных одежд ГосдорНИИ (г. Киев). Кандидатскую (1966 г.) и докторскую (1983 г.) диссертации защитил в области механики дорожных одежд. В 1986–1995 гг. — профессор кафедры дорожно-строительных материалов и химии КАДИ. С 1996 года по настоящее время Б. С. Радовский живет и работает в США. Им опубликовано 220 печатных работ. Он является членом международной Ассоциации технологов битума и асфальтобетона (AAPT), членом международной Реологической ассоциации (SoR), в 2002–2005 гг. избирался членом комитета Транспортно-исследовательского отдела Академии наук США по характеристикам битумных материалов.

В области технологии строительства цементобетонных покрытий в США появилось много нового. В предлагаемой статье мы продолжаем цикл обзоров о дорожных цементобетонных покрытиях, начатый в статье [1]. Там мы останавливались на конструкциях жестких дорожных одежд и особенностях их напряженного состояния по сравнению с нежесткими; затрагивали вопросы прочности цементобетона и его сопротивления усталости; анализировали деформации жесткого покрытия при изменении температуры и роль температурных швов, а также сравнивали типичные конструкции американских и российских жестких дорожных одежд. Здесь мы сосредоточимся на направлениях развития технологии строительства цементобетонных покрытий.

## Дороги и автомобили

В середине 1970-х отдел перспективного планирования института «Киевпроект» выдал прогноз, согласно которому в 2000 году в г. Киеве на 1 тысячу жителей будет приходиться 32 автомобиля. Тогда его сочли более чем смелым, поскольку на тот момент на одну тысячу населения приходилось три автомобиля. Действительность оказалась еще более невероятной — в 2008 году на 1000 киевлян насчитывалось 357 автомобилей.

В конце 1980-х на VIII Всесоюзном совещании по основным проблемам дорожного строительства в Москве между ведущими руководителями отрасли и научными работниками возникла острая дискуссия по поводу целесообразности строительства цементобетонных покрытий в России. Противники дальнейшего строительства таких покрытий утверждали, что в характерных для России природных условиях строить их нецелесообразно, поскольку обеспечить долговечность, соответствующую их стоимости, очень трудно, а может быть, и невозможно. В этой дискуссии автор обзора выступал на стороне ректора ХАДИ И. М. Грушко — специалиста в области дорожного цементобетона и энтузиаста этого направления.

В США такой вопрос даже не возникает — и не потому, что природные условия в целом благоприятнее, а поскольку имеется многолетний опыт, подтвердивший воз-

можность и целесообразность строительства дорог с цементобетонным покрытием. Цементобетон гораздо выносливее к действию повторных нагрузок, чем асфальтобетон. Поэтому его применяют на напряженных маршрутах: межштатных дорогах, подходах к морским портам, аэропортам и большим городам.

Начиная с 1960-х, в СССР перед началом каждой пятилетки инженеры-дорожники говорили друг другу: «Эта пятилетка должна стать, наконец, пятилеткой дорожников», надеясь, что она будет нацелена главным образом на дорожное строительство. Так мы этого и не дождались. Но, может быть, просто спрос не было? Ведь если есть спрос, будет и предложение. А был ли в то время спрос?

В середине 1970-х лаборатория прочности дорожных одежд, которой заведовал автор, готовила совместно с «Киевпроект» второе издание альбома типовых конструкций дорожных одежд для г. Киева. Однажды главный специалист, дорожник технического отдела М. В. Левин, приехал к нам в большом возбуждении. Он сообщил, что отдел перспективного планирования «Киевпроекта» выдал прогноз, по которому в 2000 году в г. Киеве на 1 тысячу жителей будет приходиться 32 автомобиля. Это был очень смелый прогноз, поскольку на тот момент было около трех автомобилей на одну тысячу населения. При создании генерального плана городской застройки следовало



**Рис. 1.** Межштатная дорога (фривей) I-405 севернее Лос-Анджелеса: Фривей проходит по территории штатов Калифорния, Орегон и Вашингтон

руководствоваться этим прогнозом. А мы должны были на его основе определять перспективную интенсивность движения автомобилей для расчета дорожных одежд городских улиц и дорог.

Нам казалось маловероятным, что у населения будет так много автомобилей. Действительность же оказалась совсем невероятной: в 2008 году в Киеве был зарегистрирован 1 миллион автомобилей при населении 2,8 млн, т. е. 357 автомобилей на 1000 человек, а не 32. С учетом приезжих и транзитных автомобилей, ежедневно на улицы Киева выезжают около полутора миллионов автомобилей. При этом протяженность сети городских улиц и дорог составляет приблизительно 1700 км, т. е. на 1 км дороги приходится 882 автомобиля. При такой плотности транспортного потока поездки на работу и с работы превратились для киевлян в настоящую пытку. Неудивительно: ведь протяженность дорог и ширина проезжей ча-

сти проектировались институтом «Киевпроект» исходя из прогнозированной на порядок более низкой интенсивности движения. В России на 1000 человек в среднем приходится около 200 автомобилей, а в Москве — 340.

Получается, что в те годы, когда мы мечтали о «пятилетке дорожников», в СССР просто не было спроса на дороги. Тогда как в США уже был настоящий спрос: на одну тысячу жителей в 1960 году приходилось 411 автомобилей, а в 1970-м — 529. Именно в связи с ростом числа автомобилей в 1956 г. были созданы предпосылки для принятия постановления о строительстве национальной системы межштатных дорог протяженностью 67 тыс. км, многие из которых были выполнены в цементобетоне. Инициатором этого постановления был президент Д. Эйзенхауэр, который из своего военного опыта времен Первой и Второй мировой войны вынес понимание преимуществ, которые дают

автомобильные дороги для развития экономики и для обороны.

В 2008 г. из 304 млн жителей США 207 млн имели водительские права (68%). В стране зарегистрировано 242 млн автомобилей, в том числе легковых — 137 млн, пикапов, грузовых и автобусов — 105 млн. На 1 тысячу

человек населения в США приходится 788 автомобилей. Если есть спрос, то решается и вопрос с финансированием. В США примерно 20% федерального налога на бензин направляется на дорожное строительство. Федеральный налог составляет 18,4 цента с каждого галлона бензина (3,78 л) независимо от стоимости бензина. Это — налог на продажу: если Вы набрали полный бак, скажем 15 галлонов, то прямо с заправочной станции на счет Федерального дорожного фонда поступает 2,76 долл., и эти деньги ни на что, кроме дорожного строительства, израсходованы быть не могут. Кроме того, каждый штат тоже взимает налог на горючее, от 8 центов в Аляске до 32 центов в штате Нью-Йорк. С дизельного топлива налог выше, чтобы компенсировать большое разрушающее действие грузовых автомобилей на дороги. Федеральный налог на дизтопливо составляет 24,4 цента за галлон. Этот принцип был заложено еще президентом Эйзенхауэром, который стремился к тому, чтобы строительство и эксплуатация дорог были построены на основе самофинансирования и не создавали бюджетного дефицита. Заметим, что равный 18,4 цента дорожный налог с каждого галлона бензина не изменялся с 1993 г., хотя в связи с инфляцией сегодня эта сумма по покупательной способности соответствует 11,6 цента.

По сведениям на 2005 г. [2], в США общая протяженность дорожной сети составляла 6,7 млн км, из них 4,2 млн км с твердым покрытием, в том числе 4,1 млн км — с асфальтобетонным и 100 тыс. км — с цементобетонным покрытием. Если же пересчитать протяжение с учетом числа полос, то доля цементобетонных покрытий существенно возрастет, поскольку на напряженных маршрутах число полос в каждом направлении составляет 4–6 и более (рис. 1, 2). Одним из главных показателей состояния сети является число ДТП со смертельным исходом, поскольку примерно треть таких происшествий связана с дорожными условиями. На протяжении многих лет их число



**Рис. 2.** Мост на маршруте Сан-Франциско — Окленд: Мост имеет два пролетных строения с проезжими частями по пять полос в каждом направлении

составляло в США 41–43 тыс. в год и только в 2008 г. существенно снизилось до 37 тыс. — самое низкое число с 1961 г.

На строительство и ремонт дорожных одежд в США ежегодно расходуется от 20 до 30 млрд долл. Типичная стоимость строительства в 2009 г. такова: щебеночное основание — 15–18 долл./т (в 2008 г. — 15–18 долл./т); асфальтобетонное покрытие — 48–87 долл./т (в 2008 г. — 50–90 долл./т); цементобетонное покрытие — 150–175 долл./куб. м или 62–73 долл./т (в 2008 г она была заметно выше — 230–260 долл./куб. м или 95–108 долл./т.). Снижение средней стоимости строительства цементобетонного покрытия, очевидно, связано с кризисом в жилищном секторе и резким уменьшением объема строительства жилья с соответствующим падением спроса на бетон. Сыграло свою роль и уменьшение стоимости битума и, соответственно, асфальтобетона в связи с уменьшением цены на нефтепродукты. По мере выхода из кризиса можно ожидать повышения стоимости бетона.

### Направления исследований

*Сравнивая продуктивность исследовательских работ по цементобетонным и асфальтобетонным покрытиям, можно прийти к выводу, что продуктивность первых гораздо меньше. Если через 5 лет после начала работ по программе SHRP (асфальтобетон) весь запланированный объем работ был фактически завершен, то за такой же отрезок времени к половине задач плана CP Road Map (цементобетон) еще даже не приступали.*

В отличие от асфальтобетона, которым практически занимаются только дорожники, цементобетон — основной строительный материал, технология которого совершенствуется в связи с проблемами строительства дорог и мостов, тоннелей, гидротехнических сооружений, жилых и промышленных зданий и т. д. Круг специалистов, вовлеченных в развитие технологии цементобетона, очень широк.

Федеральной дорожной администрацией (FHWA) в 2005 г. был утвержден 10-летний (на 2005–2015 гг.) план исследований, направленных на совершенствование цементобетонных покрытий [3], получивший название «План по цементобетонным покрытиям» (The CP Road Map). Он содержит 13 основных задач, включающих примерно 250 вопросов. Объем финансирования CP Road Map (250 млн долл.) превышает расходы по Стратегической дорожной исследовательской программе SHRP (1987–2002), одним из главных результатов которой была разработка системы проектирования состава асфальтобетона «Суперпейв». Стоимость работ по SHRP составляла 150 млн долл.

Работами по программе CP Road Map организационно руководит Национальный центр технологии цементобетонных покрытий (NCPTC), базирующийся при уни-

верситете штата Айова в небольшом городе Амес. Кроме того, FHWA параллельно инициировала программу «Передовые технологии дорожного цементобетона» (ACPT — Advanced Concrete Pavement Technology), цель которой состоит в передаче и ускорении внедрения технологий, разрабатываемых по CP Road Map. Имеется в виду, что готовые или почти готовые разработки должны немедленно проходить апробацию и совершенствоваться в процессе внедрения [4].

Основные задачи плана по цементобетонным покрытиям (The CP Road Map) таковы:

1. Разработка системы проектирования состава цементобетонной смеси, ориентированной непосредственно на эксплуатационные условия работы дорожного покрытия.

2. Разработка руководства по проектированию новых и усилению существующих цементобетонных покрытий, ориентированного на эксплуатационные условия работы.

3. Разработка быстрых неразрушающих методов испытаний с элементами искусственного интеллекта для оперативного контроля в процессе строительства.

4. Разработка стандартных требований для достижения оптимальных характеристик поверхности цементобетонного покрытия по критериям безопасности, минимального шума и ровности.

5. Совершенствование и автоматизация машин и механизмов для строительства цементобетонных покрытий.

6. Разработка новых конструкций и технологии устройства деформационных швов цементобетонных покрытий.

7. Разработка методов скоростного ремонта и усиления жестких покрытий.

8. Разработка конструкций и материалов для долговечных жестких дорожных одежд.

9. Методы ускоренного сбора и обработки данных об эксплуатационном состоянии существующих цементобетонных покрытий.

10. Методы оперативного информирования пользователей дороги о состоянии поверхности покрытия и проведении ремонтных работ на отдельных участках.

11. Система бизнеса и экономики строительства цементобетонных покрытий.

12. Применение новых материалов для цементобетонных покрытий.

13. Исследование «самодостаточности» (sustainability) жестких покрытий.

Целесообразно прокомментировать некоторые из перечисленных задач.

**Задача № 1** ставит для цементобетонных смесей такую же цель, которая была поставлена в Стратегической дорожной исследовательской программе SHRP для асфальтобетонных. Предполагается разработать систему проектирования со-

става цементобетонной смеси, которая бы отвечала заданным условиям эксплуатации: по температуре, нагрузкам, интенсивности движения, проектной долговечности и т. д. С этой целью сейчас критически рассматриваются такие известные методы проектирования состава, как HIPERPAV, M-E PDG и COMPASS, с тем, чтобы выбрать из них рациональное зерно. Одновременно проводится работа по совершенствованию лабораторных приборов для определения коэффициента температурного деформирования бетона, исследования системы воздушных пор, измерения механических характеристик бетона: модуля упругости, функции ползучести, коэффициента усадки и др. В этой большой работе участвуют сотрудники Корнельского университета (г. Итака, шт. Нью-Йорк), Мичиганского технологического университета, Ассоциации портландцемента (PCA) из пригорода Чикаго — Скоки, сотрудники транспортных департаментов нескольких штатов (Айова, Техас, Мичиган) и ряд частных компаний.

**Задача № 2** предусматривает дальнейшее развитие механико-эмпирического метода расчета жестких дорожных одежд. Как известно, сейчас в США проходит апробацию Руководство по новому методу расчета дорожных одежд на прочность, основанному на теории упругости, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, сокращенно MEPDG. Он предназначен как для нежестких, так и для жестких дорожных одежд. С ним можно детально ознакомиться в интернете на вебсайте Транспортного исследовательского отдела (TRB) национальной академии наук <http://trb.org/mepdg/guide.htm>. На этом же вебсайте можно загрузить базу данных о климатических условиях в разных штатах и программу для расчета дорожных одежд. Очередная версия этой программы была выложена осенью 2009 года. Для жестких дорожных одежд предполагается обратить особое внимание на модели прогнозирования повреждения в процессе службы, а также на проектирование усиления.

Для решения **Задачи № 3** задействованы университеты Ватерлоо, Техаса и Миннесоты, а также известные компании по производству строительной техники (как GOMACO, например) и средств связи (Cisco Systems).

По **Задаче № 4** в настоящее время разрабатывается обобщенная система оценки состояния поверхности бетонного покрытия и модели прогнозирования шероховатости и уровня шума в зависимости от текстуры поверхности.

К работе по **Задачам № 5, 6** пока не приступали. Исследования по **Задаче № 7** сфокусированы на применении различных технологий усиления жестких покрытий цементобетоном. В 2008 г. в полевых испытаниях этих технологий участвовали 9 штатов, а в 2009 г. — уже 11.

**Задача № 8** нацелена на разработку жестких дорожных одежд со сроком службы свыше 40 лет. К работам пока не приступали.

К работе по **Задачам № 9, 10 и 12** также пока не приступали.

Исследования по **Задаче № 11** охватывают вопросы менеджмента, финансирования, обучения инженеров и техников новым технологиям с помощью интернета и т.п. Основные исполнители — транспортные департаменты штатов Калифорния, Нью-Йорк, Иллинойс, Мичиган, Техас, Миссисипи и Вирджиния, а также Ассоциация портландцемента.

Первоначально план CP Road Map состоял из 12 задач [3], а впоследствии к нему добавили **задачу № 13**. Понятие о «самодостаточности» покрытий введено для обозначения некоторого баланса между экономикой, окружающей средой и социальной средой. В рамках этих исследований рассматриваются вопросы повторного использования разрушенного старого бетонного покрытия, целесообразности его усиления без разрушения и т.п. Это направление представляется автору обзором социально-философским, далеким от технологии, интересующей инженеров, а поэтому здесь не рассматривается.

Таким образом, пока (к концу 2009 г.) приступили к исследованию только половины намеченных задач. Ход работ по плану CP Road Map систематически освещается в Интернете, где по адресу <http://www.cproadmap.org/index.cfm> выложены отчеты, статьи, приведен перечень участников и их адреса.

Сравнивая продуктивность работ по плану CP Road Map и по программе SHRP, пока можно прийти к выводу, что продуктивность работы по CP Road Map гораздо меньше. Работа по программе SHRP началась в 1987 г., а уже осенью 1992 г. в Гааге автор обзора участвовал в работе конгресса «Евроасфальт», где представитель Федеральной дорожной администрации США Д. Кулаш сделал развернутый доклад о системе проектирования состава асфальтобетонной смеси Суперпейв, изложил принципы будущего стандарта, показав фотографии аппарата искусственного старения вяжущего под давлением, динамического сдвигового реометра, реометра с изгибающейся балкой и прибора жираторного уплотнения образцов смеси. Таким образом, через 5 лет Суперпейв (основной результат SHRP) был уже готов, а к половине задач плана CP Road Map после пяти лет еще не приступали.

### Отличие подходов к проектированию дорожных одежд в США и в Европе

В ряде европейских стран процесс проектирования жестких дорожных одежд основан на использовании альбомов (каталогов) типовых конструкций, отражающих

многoletний опыт их эксплуатации. В ряде других для каждого проекта жесткую дорожную одежду рассчитывают механико-эмпирическим методом (на базе теории изгиба плит на деформируемом основании) с помощью ЭВМ. В США считается, что нужен теоретически обоснованный метод расчета с соответствующей базой данных о природных условиях и программное обеспечение, чтобы дорожную одежду на любом объекте можно было рассчитать на прочность.

Техническая политика в отношении выбора между асфальтобетонным покрытием и цементобетонным в разных странах различная. В большинстве случаев сравнивают варианты, рассматривая стоимость «жизненного цикла»; в других случаях исходят из значения дороги, ожидаемого движения, первоначальной стоимости строительства и требований защиты окружающей среды. В самой большой канадской провинции Квебек принято решение, что определенные сегменты сети должны иметь дороги с цементобетонным покрытием, другие — с асфальтобетонным, а на остальных допустим любой из этих вариантов. В Австрии и в Голландии цементобетонные покрытия используют, если прогнозируемая интенсивность движения превышает определенный уровень [5].

В ряде европейских стран, в частности в Германии и в Австрии, процесс проектирования жестких дорожных одежд основан на использовании альбомов (каталогов) типовых конструкций, отражающих накопленный многолетний опыт для материалов, климата и уровней транспортного воздействия. При этом ограничивается максимальная толщина плиты. Напротив, в Англии и в Голландии для каждого проекта жесткую дорожную одежду рассчитывают механико-эмпирическим методом (на базе теории изгиба плит на деформируемом основании) с помощью ЭВМ, но в этих странах обычно строят не более нескольких километров дорог с жесткими покрытиями в год.

Поскольку территория США очень велика, здесь считается, что стране нужен теоретически обоснованный метод расчета с соответствующей базой данных о природных условиях и программное обеспечение, чтобы дорожную одежду на любом объекте можно было рассчитать на прочность. Вместе с тем, отдельные штаты имеют свои методы расчета жестких дорожных одежд или каталоги конструкций; каталоги имеют и крупные города. Но если для объекта используется федеральное финансирование, он должен проектироваться по федеральным требованиям.

Как говорилось выше, сейчас в США проходит апробацию руководство по новому методу расчета дорожных одежд, сокращенно MEPDG [6]. У него есть несколько принципиальных отличий от методов, используемых в России. Главным из них, очевидно,

является прогнозирование изменения состояния дорожной одежды во времени службы. Ведь что получалось с методами расчета, принятыми в России для нежестких и жестких дорожных одежд. Считалось, что мы рассчитывали их по теории упругости так, чтобы они работали в стадии «главным образом» обратимых деформаций (т.е. без накопления остаточных) и без образования трещин при изгибе. Расчет проводили для интенсивности движения в последний год перспективного периода. А затем дорожная одежда приходила в состояние, требующее ремонта, в связи с образованием колеи и растрескиванием покрытия. Этого вроде бы не должно было быть, по нашему расчету. Но тогда непонятно, зачем был задан срок службы. Прогнозировать глубину колеи (для нежесткой дорожной одежды) и количество трещин разного рода довольно трудно.

Тем не менее, такая цель была поставлена при разработке американского метода. Срок службы разделяют на много сравнительно коротких (например, двухнедельных) периодов, в течение каждого из которых влажность грунта и температура воздуха принимается постоянной, определяют поврежденность от движения в течение каждого из них, а затем суммируют. Конечно, такой объем расчетов стало возможным выполнить только в последние годы с появлением быстродействующих персональных компьютеров.

В MEPDG для жестких дорожных одежд прогнозируют следующие величины (на одну милю протяжения одной полосы проезжей части):

- поперечные трещины;
- протяжение трещин в углах, на краях, в центральной части плиты;
- растрескивание в швах;
- уступы в швах вследствие выплесков переувлажненного материала основания из-под цементобетонного покрытия;
- международный индекс ровности IRI.

Конечно, для прогноза пользуются рядом эмпирических зависимостей, калиброванных по экспериментальным данным, полученным при испытаниях дорожных одежд на стендах и путем обследования многочисленных опытных участков. Развитие MEPDG в части жестких дорожных одежд является **Задачей № 2** плана CP Road Map.

Второе принципиальное отличие MEPDG касается исходных данных о характеристиках материалов и грунтов. В США установлены 3 возможных уровня задания исходных данных при проектировании дорожных одежд. На уровне 1 все данные о свойствах материалов должны быть получены в результате непосредственных измерений в лаборатории, например, модуль упругости цементобетона, прочность на растяжение при изгибе, коэффициент линейной температурной деформации, модуль упругости грунта и т.д. Совершенствова-

ние приборов для определения расчетных характеристик входит в **Задачу № 1** плана CP Road Map.

На уровне 2 для определения расчетных характеристик допускается использовать корреляционные зависимости, например, определять прочность на растяжение при изгибе по прочности при сжатии; находить модуль упругости щебеночного основания или грунта из результатов определения показателя CBR (Калифорнийского числа несущей способности) и т.п. На самом низком уровне 3 расчетные характеристики принимают по таблицам, приведенным в Руководстве MEPDG. Выбор уровня исходных данных зависит от важности объекта, от наличия необходимой информации в момент проектирования, от ресурсов и времени, имеющегося для проектирования. В России исходные данные, в сущности, всегда задавали лишь на уровне 3.

### Основные типы жестких дорожных одежд

*Чаще всего (примерно в 70% дорожных агентств) при строительстве дорог с цементобетонным покрытием в США применяют JPCP — цементобетон с поперечными и продольными швами на расстоянии около 5 м друг от друга со стальными штырями в поперечных швах и с анкерными штырями в продольных.*

В США применяют три типа цементобетонных покрытий:

- Цементобетон с поперечными швами на расстоянии около 5 м друг от друга со стальными штырями в поперечных швах и с анкерными штырями в продольных (JPCP — Jointed plain concrete pavement);
- Армированный цементобетон с поперечными швами на расстоянии от 9 до 12 м со стальной сеткой, которая должна сдерживать раскрытие поперечных трещин,



и со стальными штырями в поперечных швах и с анкерными штырями в продольных (JRCP — Jointed reinforced concrete pavement);

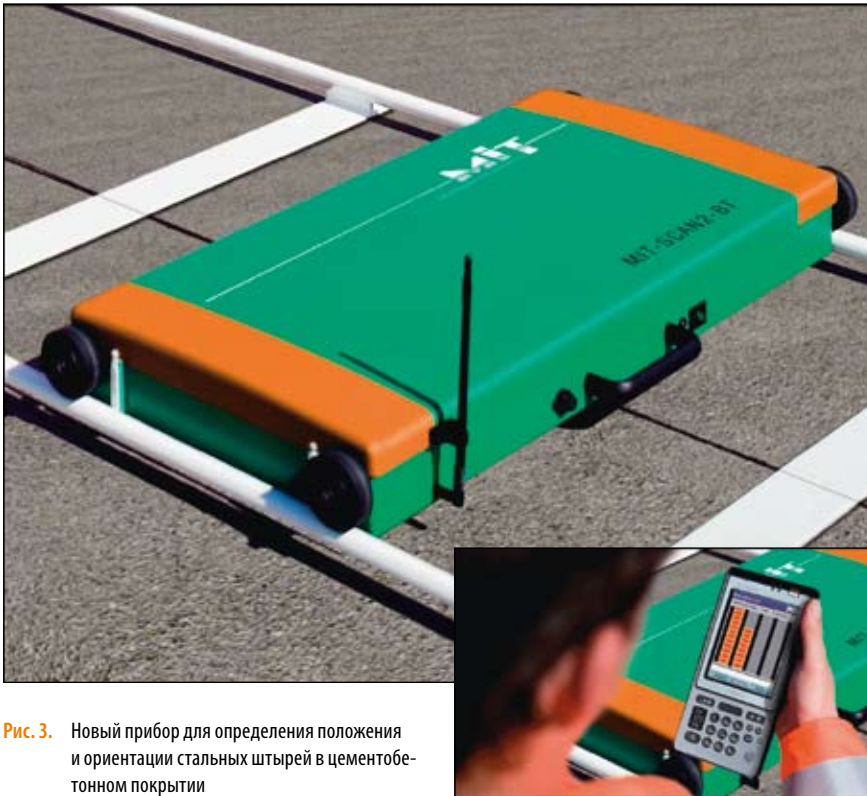
- Непрерывно армированный цементобетон без поперечных швов, в котором арматуры больше, чем в JRCP (CRCP — Continuously reinforced concrete pavement). Большое количество продольной арматуры влияет на расстояние между возникающими поперечными волосяными трещинами (которое может составлять порядка 1,5 м). Арматура предотвращает их раскрытие, прижимая «берега» трещины друг к другу. Часто эти покрытия армируют и в поперечном направлении. Их толщина обычно равна 85–90% от толщины JPCP для тех же условий работы.

Чаще всего (примерно в 70% дорожных агентств) в США строят JPCP. Для покрытий толщиной 20–30 см обычно используют в поперечных швах стальные штыри диаметром 25 мм. Расстояние между анкерными штырями в продольных швах принимают примерно вдвое меньше, чем в Европе, т.е. используют вдвое больше таких штырей.

В качестве основания под цементобетонное покрытие используют тощий цементобетон, пористый асфальтобетон, щебень. В Канаде для основания под цементобетонное покрытие применяют высокопористый асфальтобетон, а в Европе предпочитают плотный асфальтобетон в основании или щебень, укрепленный цементом. Укрепленный цементом грунт больше не рекомендуют использовать в качестве основания в ряде штатов (например в Калифорнии) и в Европе, в частности, в Германии. В прошлом в Германии стремились обеспечить сцепление между цементобетоном и расположенным под ним основанием, содержащим цемент. В настоящее время, наоборот, чтобы отделить цементобетонное покрытие от укрепленного цементом основания (например, от того же бетона или от укрепленного цементом щебня), используют тонкий слой горячей асфальтобетонной смеси или полотно из геотекстиля толщиной около 5 мм. Опыт показал, что, хотя геотекстиль пропитывается цементным молоком, он устраняет сцепление между покрытием и основанием.

В шт. Северная Каролина в 1967 г. на межштатной дороге I-65 построили 8 опытных секций жестких дорожных одежд, а в 2001 г. в связи с реконструкцией дороги их детально обследовали [7], предварительно изучив всю имевшуюся техническую документацию. Все дорожные одежды имели цементобетонное покрытие толщиной 23 см на различных основаниях с поперечными швами через 9 м. Обочины имели асфальтобетонное покрытие. К 2000 году фактическая среднесуточная интенсивность движения в 10 раз превысила проектную. Общее число проездов, эквивалентных осевым расчетным нагрузкам (80 кН), за 33 года составляет 25 млн. Все участки с основанием или дополнительным основанием, укрепленным цементом, имели существенные повреждения. В наилучшем состоянии находилась жесткая одежда с асфальтобетонным основанием толщиной 10 см. Спустя 33 года 94% плит на этом участке вообще не имели повреждений. Средняя высота уступа в швах зависела от того, установлены ли штыри: без штырей она равнялась 5,9 мм на щебеночном основании и 4,2 мм





**Рис. 3.** Новый прибор для определения положения и ориентации стальных штырей в цементобетонном покрытии

на укрепленном цементом основании, а со штырями она была 4,8 мм — на щебеночном основании и 2,5 мм — на укрепленном цементом основании. При асфальтобетонном основании даже без штырей в швах средняя высота уступа спустя 33 года службы составила лишь 1,5 мм.

Как уже говорилось, в дополнение к плану CP Road Map начала действовать программа АСРТ, цель которой состоит в передаче и ускорении внедрения технологий, разрабатываемых по CP Road Map. Например, в рамках программы внедрения, чтобы оценить предлагаемый прибор, транспортный отдел штата может бесплатно получить его на один месяц для испытаний. Наибольшей популярностью пользуется разработанный в Массачусетском технологическом институте прибор MIT Scan-2, позволяющий измерить положение и ориентацию стальных штырей и анкеров, находящихся в бетоне. Известно, что при их недопустимом отклонении от про-

**Рис. 4.** Стержни из стеклопластика, установленные на расстоянии 25 см друг от друга [9]: Стержни крепятся к корзинке-каркасу эпоксидным клеем. Свойства клея должны быть такими: он должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать бетонирование, но одновременно достаточно хрупким, чтобы затем растрескаться и позволить стержням перемещаться в продольном направлении при изменении температуры после набора проектной прочности бетона. Поперечное сечение стержня имеет форму эллипса.

ектного положения вблизи швов быстро образуются трещины и сколы. Прибор с портативным локатором (рис. 3) прокатывают по компактным рельсам-направляющим. Сигналы передаются карманному компьютеру и анализируются на месте. Информация затем может быть переброшена на обычный персональный компьютер.

В 2007–2008 гг. такие приборы испытали в 25 штатах США и в провинции Онтарио (Канада). Испытания дали очень хорошие результаты. Прибор позволяет вы-

явить не только отклонение от проектного положения стержня, но и его причины: повреждение корзинки-каркаса во время бетонирования, неудачный выбор зернового состава бетона и т. д.

### Пластмассовые штыри

*Недавно были проведены работы по применению в швах бетонных покрытий, вместо стальных, штырей из усиленных волокнами пластика (в первую очередь — стеклопластика), главным преимущество которых является отсутствие коррозии.*

Обычно в поперечных швах JPCP применяют стальные штыри диаметром 1, 1,25 или 1,5 дюйма (соответственно, 25, 32, или 38 мм) в зависимости от толщины цементобетонного покрытия. Стальные штыри покрывают эпоксидным составом для защиты от коррозии. Иногда применяют штыри из нержавеющей стали либо обычные стальные штыри, покрытые нержавеющей сталью, но это довольно дорого. Есть сторонники применения штырей в виде отрезков трубы из нержавеющей стали.

Недавно проведены работы по применению штырей из усиленных волокнами пластика (в первую очередь — стеклопластика), вместо стальных штырей в швах бетонных покрытий (рис. 4). Главным их преимуществом является отсутствие коррозии, а недостатком — то, что они хуже передают нагрузку на соседнюю плиту, поскольку модуль упругости полимера меньше модуля упругости стали. Однако этот недостаток можно преодолеть. Штыри диаметром 38 мм из стеклопластика, установленные на расстоянии 15 см друг от друга, обеспечивают такую же передачу нагрузки, как и стальные штыри диаметром 25 мм, установленные на расстоянии на расстоянии 30 см [8]. Кроме того, эти стержни — легкие, что удоб-





Рис. 5. Устройство для нанесения бороздок — стандартный способ, применяемый в шт. Вашингтон [10]: «вилы» из жесткой стали (tining) использовали раньше для поперечного боронования, а позднее — для продольного

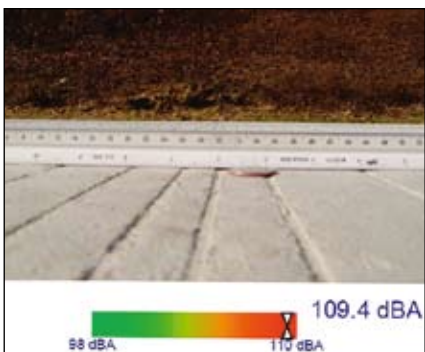


Рис. 6. Поперечные бороздки на цементобетонной обочине междуштатной скоростной дороги I-81 в Пенсильвании: измеренный на расстоянии 15 м и высоте 1,5 м уровень шума при проезде стандартного грузового автомобиля — 109 дБ (примерно, как шум отбойного молотка — перфоратора)

нее в работе, и их материал не магнитный, а поэтому нет проблем с индуктивными рамками, устанавливаемыми в покрытие для светофорного регулирования.

В шт. Айова взамен круглых стержней из стеклопластика успешно испытали стержни с эллиптическим поперечным сечением с большой осью эллипса 50 мм и малой осью 34 мм, причем большая ось расположена вертикально, чтобы получить выигрыш в моменте инерции сечения при изгибе стержня под действием движущейся нагрузки [9] (рис. 4).

### Текстура поверхности покрытия

Уровень транспортного шума от движения по цементобетонным покрытиям в целом выше, чем по асфальтобетонным. В США считают, что снижения уровня транспортного шума можно добиться за счет придания поверхности цементобетонного покрытия определенной текстуры в виде чередующих-

ся бороздок. Существенно снизить шум можно, устроив верхнюю часть цементобетонного покрытия в виде пористого цементобетонного слоя толщиной примерно 40 мм со щебнем крупностью 8 мм, зерна которого создают «открытую» текстуру.

С конца 1970-х, по решению Федеральной дорожной администрации США, на всех дорогах, строящихся полностью или частично при федеральном финансировании, цементобетонное покрытие должно иметь бороздки для улучшения сцепления с шиной. Вначале это привело к повсеместному строительству покрытий с поперечными бороздками, устраивавшимися в свежее-

ложенном бетоне с глубиной примерно 3 мм и шириной 3 мм на расстоянии 13 или 26 мм друг от друга (рис. 5). Однако выяснилось, что такие бороздки способствуют созданию транспортного шума. Чтобы его уменьшить, стали делать расстояние не одинаковым, а «случайным». Например, при среднем расстоянии 13 мм последовательность расстояний между ними 10/14/16/11/10/13/15/16/11/10/21/13/10 мм, а затем последовательность повторяли. Уровень шума понизился, но недостаточно (рис. 5).

Тогда перешли к устройству продольных бороздок, нарезаемых в не затвердевшем бетоне боронованием заостренными стержнями из пружинной стали. Типичная глубина бороздки 3–5 мм, а расстояние между их центрами 19 мм. В Калифорнии цементобетонные покрытия сохраняют созданную таким путем текстуру в среднем около 20 лет. Если требуется ее возобновить, то параллельные продольные бороздки с глубиной 3 мм, шириной 3 мм с ин-

тервалами 5–6 мм нарезают в бетоне старого покрытия алмазным инструментом.

Продольные бороздки значительно уменьшают опасность защемления пленки воды в контакте колеса с покрытием, что могло бы привести к так называемому аквапланированию, когда трения между шиной и покрытием практически нет и колесо скользит по воде. В этом случае возникает опасность бокового скольжения, а торможение невозможно. Продольные бороздки придают автомобилю боковую устойчивость при движении на криволинейных в плане участках (рис. 8). Водитель чувствует, что автомобиль «держит» дорогу. К сожалению, вода разбрызгивается из-под колес впереди идущих машин, вследствие чего имеет место плохая видимость (рис. 7).

До настоящего времени не было никакого технического руководства, которое помогло бы выбрать тип макротекстуры в зависимости от природных условий, интенсивности движения, типа дороги, требований безопасности движения и экономических соображений. Такое руководство разработано известной частной дорожной консультационной фирмой ERES Consultants в 2008 г. по проекту Национальной кооперативной дорожно-исследовательской программы NCHRP 10–67.

Уровень транспортного шума от движения по цементобетонным покрытиям в целом выше, чем по асфальтобетонным. В Англии, где из 285 тыс. км протяжения дорог примерно 1,5 тыс. км наиболее напряженных участков выполнены в цементобетоне, проблема транспортного шума под давлением законодательных органов привела в конце 1990-х к постановлению, в соответствии с которым жесткого покрытия должен быть уложен тонкий слой асфальтобетона. В США же считают, что снижения уровня транспортного шума можно добиться за счет придания поверхности цементобетонного покрытия определенной текстуры в виде чередующихся бороздок. Недавно выяснилось,



Рис. 7. На скоростном шоссе в южной Калифорнии во время дождя: Дожди здесь бывают 20 дней в году, а снега не бывает вовсе. Продольные бороздки существенно улучшают трение в контакте колеса и покрытия, однако вода разбрызгивается из-под колес, что сильно ухудшает видимость. Поэтому вместо обычных 110–130 км/час водители во время дождя снижают скорость до максимум 40–50 км/час.



Рис. 8. Продольные бороздки на бетонном покрытии

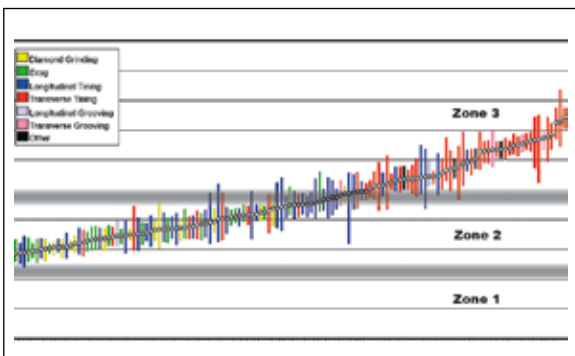


Рис. 9. Уровень шума при проезде по цементобетонному покрытию в зависимости от технологии придания текстуры [11]: желтый цвет отвечает фрезерованию алмазным инструментом; зеленый — обработке поверхности свежесушеного бетона волочением джутовой щетки; синий — обработке поверхности свежесушеного бетона гибкими «вилами» с созданием продольных бороздок; красный — то же, что и синий, поперечных бороздок; голубой и розовый — рифлению проточкой, соответственно, продольных и поперечных канавок в твердом бетоне барабаном с абразивными дисками; черный — другим методам

что можно существенно снизить шум, устройте верхнюю часть цементобетонного покрытия в виде пористого цементобетонного слоя толщиной примерно 40мм со щебнем крупностью 8мм, зерна которого создают «открытую» текстуру. Такая технология была разработана в Австрии и испытывается в США.

В Национальном центре технологии цементобетона обследовали около 1000 участков дорог с цементобетонными покрытиями, текстура поверхности которых была устроена разными способами, и измерили уровень шума при проезде различных транспортных средств. Результаты представлены на рис. 9, где выделены 3 зоны. В первой зоне находятся покрытия, имеющие такую текстуру, к созданию которой следует стремиться. Во второй находятся многие покрытия с устраиваемой в настоящее время текстурой, при которой

достигается определенный компромисс шероховатости, уровня шума, степени ровности и стоимости работ. Третья зона соответствует покрытиям с плохой и неоднородной текстурой и часто с серьезными повреждениями в швах. Для старых покрытий хорошие результаты по восстановлению нужной текстуры дает нарезка канавок алмазной фрезой. По экспериментальным данным, полученным в шт. Аризона [11], после этого уровень шума снижается на 5 децибел, и этот эффект сохраняется на многие годы (по опыту Калифорнии, на 15–17 лет). Средняя стоимость работ — от 2,5 до 5 долл. за кв. м, но при очень твердом каменном материале она может достигнуть 12,5 долл. за кв. м.

### О бетоне

*Казалось бы, свойства бетона должны быть промежуточными между свойствами цементного камня и заполнителя. Но на самом деле прочность бетона оказывается меньше прочности его составляющих.*

Основных изменений в будущем можно ожидать в области технологии дорожного бетона. Хотя дорожники, к сожалению, с некоторым запозданием реагируют на радикальные предложения по изменению технологии, круг специалистов, вовлеченных в развитие технологии цементобетона, как отмечалось вначале, очень широк, и такие предложения уже появились.

Здесь уместно отметить одно ключевое отличие норм прочности цементобетонных покрытий в США и в Европе. Складывается впечатление, что в европейских странах предъявляют более высокие требования к качеству составляющих бетонной смеси и к подбору ее состава. Так, в Германии прочность цементобетона на изгиб через 28 суток должна быть не менее 4,5 МПа при испытании образца в условиях чистого изгиба, что примерно равноценно его прочности 5,5 МПа при испытании образца в виде балки на двух опорах сосредоточенной нагрузкой посередине пролета. В Австрии для нижнего слоя двухслойного цементобетонного покрытия прочность на изгиб должна быть не менее 5,5 МПа, а для верхнего слоя — не менее 7,0 МПа [5].

Эти требования намного выше, чем в США, где обычно минимальная прочность дорожного бетона составляет 4–4,5 МПа и в редких случаях 5 МПа.

Но не столько повышение требований к исходным материалам будет источником ожидаемого прогресса, сколько новые технологии, появившиеся в последние годы. В значительной мере они возникли на базе более глубокого понимания структуры бетона и происходящих в нем процессов. Чтобы дать представление о них, коснемся одного из них — вопроса о переходной зоне между заполнителем (щебнем и песком) и цементным камнем.

Как известно, в первом приближении цементобетон рассматривают как дисперсную систему, состоящую из матрицы — затвердевшего цементного теста (цементного камня) и из дисперсной фазы — зерен щебня и песка (заполнителя). Казалось бы, свойства бетона должны быть промежуточными между свойствами цементного камня и заполнителя. Можно в отдельности измерить прочность материала заполнителя, цементного камня и бетона, а затем сравнить их между собой. Прочность бетона получится меньше прочности его составляющих. Можно измерить диффузионную проводимость материала заполнителя, цементного камня и бетона и сравнить их между собой. Диффузионная проводимость (коэффициент диффузии) бетона получится значительно больше, чем его составляющих [12]. Это означает, что прочность бетона и его долговечность, на которую влияет проникновение в бетон хлоридов (от противогололедных реагентов) и сульфатов (сульфатная агрессия), могли бы быть значительно повышены. Важно понять причину этого несоответствия. Почему композит (бетон) намного хуже компонентов?

За последние 15 лет выяснилось, что слабым звеном является переходная зона на границе раздела цементного теста и заполнителя — ITZ (Interfacial transition zone). Чтобы геометрически представить себе причину ее появления, достаточно взглянуть на рис. 10. Там показан пристеночный эффект — влияние твердой поверхности (например, поверхности контейнера) на упаковку зерен. На картинке справа видно, что со стороны граничной поверхности

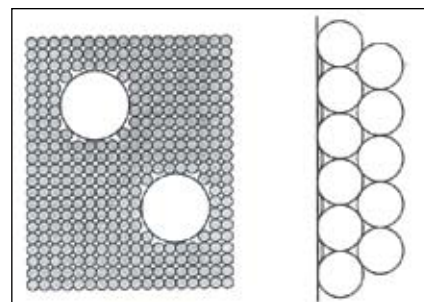


Рис. 10. Пристеночный эффект (справа) и переходная зона вблизи поверхности крупных частиц (слева)

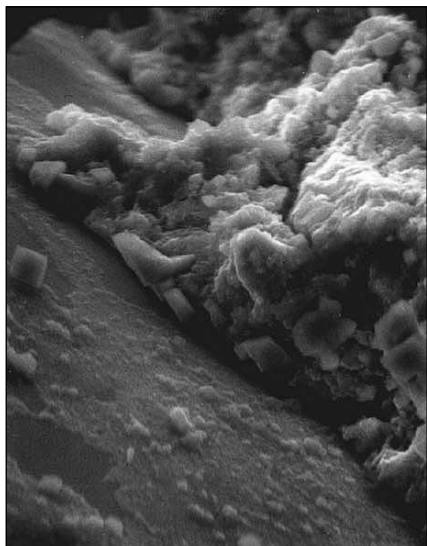


Рис. 11. Переходная зона между цементным тестом и зерном кварцевого песка (фото D. Lange, университет Иллинойса): ширина поля 45 микрон, увеличение в 1760 раз

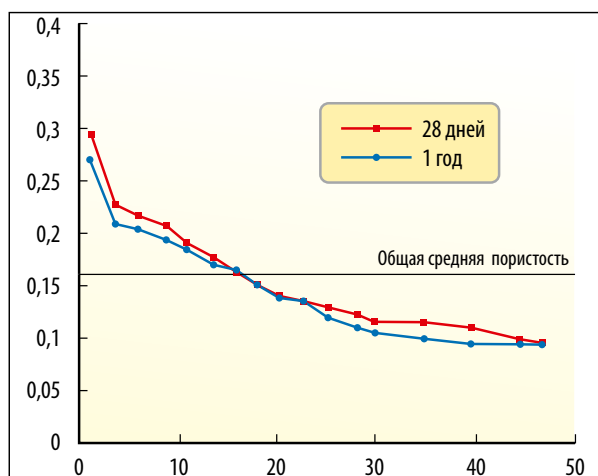


Рис. 12. Изменение пористости цементного камня с удалением от поверхности зерна заполнителя: средняя пористость — 16%, а вблизи поверхности зерна она достигает 28–30%; по оси абсцисс — расстояние в микрометрах, по оси ординат — пористость в долях единицы [13]; экспериментальные данные получены для бетона со средним  $V/C=0,40$

(«стенки») зерна «не выглядывают», и поэтому пористость зернистой среды вблизи стенки больше, чем вдали от нее. На картинке слева показано, как искривленные «стенки» возмущают упаковку мелких зерен и повышают ее пористость вблизи более крупных зерен.

Теперь можно представить себе, что мелкие зерна — это частицы цемента, а крупные — щебня или песка. Тогда возле зерен наполнителя должна появиться переходная зона повышенной пористости (рис. 11). Толщина ITZ имеет порядок медианного диаметра зерна цемента — примерно 10 микро-

метров (рис. 12). Измеренная ширина ITZ оценивается сейчас в 20–60 микрометров. В этой зоне пористость достигает 30% [13]. Зоны образуют вокруг зерен песка и щебня оболочки повышенной пористости цементного теста. Поры заполнены водой, и если в среднем водоцементное отношение для данного бетона равно, например,  $V/C=0,45$ , то в пределах оболочек ITZ оно может достигать, скажем, 0,55, а вне этой зоны оно меньше среднего. Мы же подбираем  $V/C$ , полагая примерно постоянным.

Частицы заполнителя расположены недалеко друг от друга, поэтому оболочки ITZ перекрываются и образуются непрерывные «пути» для быстрой диффузии сульфат-ионов и хлорид-ионов через весь бетон (рис. 13). Общий объем ITZ оценивают в 20–40% объема цементного камня — в зависимости от состава бетона. В пределах этой переходной зоны бетон ослаблен вследствие скопления свободной воды около зерен заполнителя и образования большого количества портландита — кристаллической гидроксиды

кальция, обладающего низкой прочностью. Поэтому прочность традиционного дорожного бетона меньше, чем могла бы быть при том же расходе цемента. По этой же причине его подверженность сульфатной агрессии и коррозии стальной арматуры гораздо больше, чем могла бы быть.

В последние годы на основе более глубокого понимания структуры бетона разработаны технологии, позволяющие значительно повысить его прочность и долговечность. Автор надеется, что ему удастся их описать в следующих обзорах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радовский Б. С., (2009) Цементобетонные покрытия в США. «Дорожная Тех-

ника», с. 124–132.

2. U. S. Department of Transportation (2005) Federal Highway Administration, Highway Statistics, Washington, DC: 2006, table HM-20.

3. Ferragut, T., R. Rasmussen, M. Darter, D. Harrington, M. Anderson-Wilk (2005) Long-Term Plan for Concrete Pavement Research and Technology — The CP Road Map: Volume II, Tracks. Report FHWA-HRT-05-053, pp. 1–437.

4. Tayabji Sh., T. Van Dam, K. Smith (2009) Advanced Concrete Pavement Technology (ACPT) Program: A Status Report on Avail-

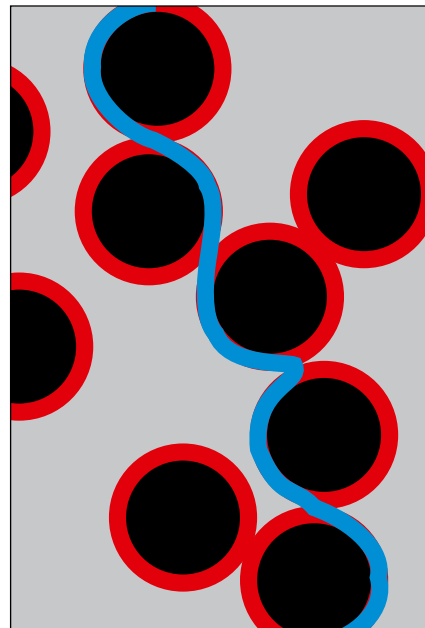


Рис. 13. Схема образования «непрерывного пути» по оболочкам ITZ в бетоне

able Products. Report FHWA-HIF-09-005, pp. 1–48.

5. Hall K. D., Dawood et al. (2007) Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada. Report No. FHWA-PL-07-027, pp. 1–84.

6. Guide for Mechanistic — Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. NCHRP 1–37, Champaign, Illinois, 2004.

7. Corley-Lay J., C. S. Morrison (2002) Thirty-Three year performance of jointed concrete test sections in North Carolina. Transportation Research Record 1806. pp. 88–94.

8. Porter M. L., R. J. Guinn, et al. (2001) Report No. TR-408, Iowa State University and Iowa DOT, pp. 1–186.

9. Porter M. L., K. Cable et al. (2005) Final Report: Field Evaluation, Iowa State University, pp. 1–90.

10. Anderson K. W., J. Uhlmeier, L. Pierce (2007) Performance of a Portland Cement Concrete Pavement With Longitudinal Tined, Transverse Tined and Carpet Drag Finish. Post Construction Report. Experimental Features WA 05–05, pp. 1–47.

11. Wiegand P. (2006) Concrete solutions for quieter pavements on existing roadways. Tech Brief. National Concrete Pavement Technology Center, pp. 1–4.

12. Bentz D. P., E. J. Garboczi, E. S. Langergren (1998) Multi-scale microstructural modeling of concrete diffusivity. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 20, 1 pp. 129–139.

13. Scrivener K. L., K. M. Nematy (1996) The percolation of pore space in cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, 1, pp. 35–40.