по величине деформациям сдвига γ_{zy} , нелинейно растет. Аналогичные результаты получены для нормальных деформаций полимера в направлении вектора скорости скольжения. Следовательно, при толщине покрытия $h > z_0$, влияние металлической подложки на контактные деформации, а по этой причине – и на перемещения поверхности трения, не должно быть существенным.

Анализ представленных на рисунках 1 и 2 зависимостей свидетельствует о существовании корреляции между предварительным смещением и толщиной покрытия. Так, выход кривой $\delta(h)$ на полку при $p_0 = 10$ МПа наблюдается при $h_0 \approx 500$ мкм, а толщина интенсивно деформируемого слоя $z_0 = 1680$ мкм (здесь $b = 120$ мкм). Аналогично, при $p_0 = 6,5$ МПа: $h_0 = 300$ мкм, $z_0 = 700$ мкм, $b = 98$ мкм, а при $p_0 = 4,5$ МПа: $h_0 = 200$ мкм, $z_0 = 320$ мкм, $b = 54$ мкм. Видно, что существует связь между z_0 и толщиной слоя, превышение которой не оказывает влияния на предварительное смещение. Однако абсолютные значения z_0 и h_0 не совпадают, причем, с увеличением нормальной нагрузки это расхождение возрастает. Тот факт, что $h_0 < z_0$, связан с тем, что предварительное смещение обусловлено деформацией материалов контактирующих выступов, средний размер площадок контакта которых меньше ширины контактной площадки сопряжения цилиндр – плоский образец.

Описанные закономерности процессов деформации и предварительного смещения при фрикционном нагружении полимерного слоя, лежащего на жестком основании, сказываются на их сопротивлении изнашиванию. Установлено, что при уменьшении толщины покрытия профиль его изношенной поверхности соответствует более равномерному распределению износа вдоль дорожки трения. Наблюдаемое при уменьшении h общее снижение интенсивности изнашивания I_h покрытия обусловлено не только предварительным смещением. Важным, если не более существенным, фактором является то, что уменьшение толщины покрытия сопровождается снижением внутренних растягивающих напряжений, которые, суммируясь с циклически действующими контактными растягивающими напряжениями, вызывают разрушение поверхности трения. Испытания показали, что увеличение толщины эпоксидного покрытия (базовая композиция № 1) сопровождается монотонным ростом внутренних напряжений $\sigma_{вн}$ (таблица 1). В области малых толщин (до 1 мм) зависимость $\sigma_{вн}(h)$ более ярко выражена. Для толстых покрытий характерно менее существенное влияние их толщины на внутренние напряжения. При введении в состав композита солей жирных кислот (композиция № 2) характер зависимости $\sigma_{вн}(h)$ не изменяется, однако в целом внутренние напряжения снижаются.

Таблица 1 – Внутренние напряжения в эпоксидных покрытиях различной толщины

Внутренние напряжения, МПа	Толщина покрытия, мм						
	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5	2,0
Композиция №1	0,40	0,76	1,05	1,52	1,75	2,05	2,17
Композиция №2	0,40	0,62	0,93	1,05	1,40	1,56	1,85

С уменьшением толщины покрытия должно быть более значительное снижение интенсивности его изнашивания, т. к. снижаются внутренние напряжения, возрастает отвод генерируемой при трении теплоты от зоны контакта и уменьшается предварительное смещение в зонах реверса. Однако это не совсем четко проявляется в испытаниях эпоксидных покрытий. По-видимому, существенное влияние на разрушение поверхностного слоя оказывает адгезия полимера к металлической подложке. В частности, наличие несплошностей на границе раздела композит – металл ускоряет процесс усталостного изнашивания.

УДК 691.32

ОЦЕНКА КИНЕТИКИ АДСОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ВЛАГИ И ЕЕ ПАРОВ НА РАСТВОРЫ И БЕТОНЫ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

А. А. ВАСИЛЬЕВ

Белорусский государственный университет транспорта

Процесс карбонизации взаимодействия углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция в поровом пространстве рассматривается по аналогии с действием гидравлического насоса, в котором периодические изменения температуры и влажности способствуют частой смене уровня поровой

жидкости, которая служит поршнем гидравлического насоса в газовой среде поры. Чем чаще происходят перепады температуры и меняется влажность, тем выше скорость карбонизации, из-за более эффективной работы гидравлических насосов, обеспечивающих подсос воздуха в поры. Можно предполагать, что в седиментационных порах движение воды возможно за счет периодического испарения, насыщения или оводнения за счет перепада температуры. При этом тонкий слой воды по периметру поры перемещается из зоны с более низкой температурой к поверхности с более высокой температурой, а зеркало жидкости перемещается в глубь поры, выполняя функцию поршня. Капиллярные поры в большей степени чувствительны к изменению влажности воздуха, что способствует частой смене уровня поровой влаги вследствие капиллярной конденсации и десорбции паров воды.

Насыщение и испарение поровой влаги сопровождается сменой объема электролита, что должно изменять электросопротивление бетона. Поэтому метод измерения электросопротивления бетона наиболее приемлем для изучения поведения бетона при смене влажностного режима. Данный метод также позволяет проследить кинетику адсорбции и десорбции влаги бетонами и растворами.

Для проведения исследований были изготовлены образцы различных составов, на разных заполнителях, с различными условиями твердения. В кубики заделывали два электрода, выполненных из меди с площадью поперечного сечения 1 см^2 . Один электрод располагали на расстоянии $0,5 \text{ см}$ от грани куба, другой – в центре куба. Для изучения распределения влаги по глубине использовали образцы с тремя электродами. Первый электрод располагали на расстоянии $0,5 \text{ см}$ от грани куба, остальные – на расстоянии $2,2 \text{ см}$ в направлении центра.

Измерение электросопротивления проводили по упрощенной методике без устранения тангенциальной составляющей. Во всех экспериментах соблюдались постоянство площади электродов и расстояния между ними, а также площадей граней кубов и объемов кубов.

Прочность бетона является интегральной характеристикой, которая зависит от свойств бетона, его состава, условий приготовления, твердения, эксплуатации и испытаний. Поэтому параллельно проводили испытания бетона на прочность на сжатие. Для испытаний использовали 3 – 5 образцов одинаковых составов бетонов.

В результате проведенных экспериментов исследована кинетика изменения R_s (электросопротивления порового электролита) растворов и бетонов с различным содержанием вяжущего и заполнителей. Это позволило более детально выяснить причины различного поведения образцов с момента их затворения, твердения и контакта с воздушной средой помещения, когда начинается свободное испарение воды с поверхности образцов.

Полученные результаты показывают, что наибольшей скоростью испарения обладают строительные растворы с мелкопористой структурой на известковой и цементной основе. Известковый раствор по сравнению с цементно-песчаным имеет скорость испарения в три раза выше. Еще меньшая скорость испарения воды наблюдается у раствора на цементной основе, в котором весовое отношение цемента к заполнителю в 2 раза выше. Замедление испарения с одинаковых площадей образцов на цементной основе, по сравнению с известковой, обусловлено продолжающейся гидратацией портландцемента, что непрерывно понижает концентрацию несвязанной воды в гелекристаллизационных структурах. Карбонизация поверхностных слоев известкового раствора, наоборот, сопровождается выделением воды. Более высокая пористость образцов также может заметно влиять на скорость испарения влаги.

Для образцов бетонов, у которых твердение проводили в нормально-влажностных условиях, скорость испарения воды значительно отличается от скорости испарения воды в образцах, выполненных из растворов. В этом случае скорость зависит от размеров крупного заполнителя. После набора прочности бетонов во влажных условиях и выставления их для сушки в комнатных условиях скорость испарения зависит от гранулометрического состава крупного заполнителя. Более низкая прочность наблюдалась у образца, в котором размер щебня достигал 20 мм , и в $1,3$ раза была выше у образцов с мелкой фракцией. Поскольку цементно-песчаный раствор слитной структуры имеет значительно большую скорость испарения воды, чем бетоны, то можно предположить, что кинетика испарения бетонов в значительной степени зависит от весового соотношения Ц+П/Щ или П/Щ. Наружная площадь испарения воды образцов с цементно-песчаной фракцией выше.

Результаты измерений зависимостей $R_s - t$ на разной глубине залегания в бетоне показали, что в начальной стадии испарения воды из поровой структуры скорость изменения R_s в поверхностном слое значительно выше, чем в глубине. Через 8 суток процесс массопереноса воды выравнивается и становится стационарным по скорости, но разным по содержанию поровой влаги.

В глубине бетона уровень влажности был выше, чем в наружном слое. Можно предположить, что такое различие будет возрастать с дальнейшим углублением в тело бетона. Поэтому процесс массопередачи при испарении, адсорбции и десорбции, водонасыщении капилляров и пор будет происходить преимущественно в поверхностном слое (до 5 см) при сравнительно коротких сменах влажностного режима (для насыщения парами – до 8 суток, а при водонасыщении – до 3 суток). Это подтверждается изучением кинетики адсорбции и десорбции паров воды как бетонами, так и растворами.

В большинстве изученных образцов полное водонасыщение достигается через трое суток. Сравнение показателей R_s водонасыщенного состояния для всех образцов со значениями начальных R_s (когда происходил переход смесей из суспензий в гелеобразное состояние) позволило судить о влиянии скорости испарения на завершенность процессов гидратации и образования кристаллической структуры в растворах и бетонах на цементной основе. Чем больше разность $R_s^b - R_s^h$ (водонасыщенного и начального), тем глубже прошел процесс гидратации и выше закристаллизованность цементного камня.

Рассмотренные физико-химические процессы будут происходить с достаточно высокой скоростью в поверхностных слоях бетонов и растворов толщиной до 3 см, а по мере углубления скорость будет снижаться.

Проведенные эксперименты показали, что в начальный период времени скорость испарения поровой влаги из поверхностных слоев бетона выше, чем в глубине. При смене влажности адсорбция бетонами влаги протекает медленней, чем десорбция; испарение поровой влаги влияет на полноту гидратации цемента и прочность бетона; смена влажности и дождевые осадки вызывают периодическое изменение влажностного состояния бетона и нарушение диффузионных процессов в поровой структуре, что приводит к неподчинению законам диффузии в газовых средах.

УДК 624.012.45

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. А. ВАСИЛЬЕВ, В. П. БОГДАНОВ, С. В. ДЗИРКО, О. Г. КАНАРСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта

Железобетонные конструкции (ЖБК) составляют основную долю конструкций капитальных зданий и сооружений, поэтому от их состояния зависят эксплуатационная надежность и долговечность большинства объектов народного хозяйства.

В процессе эксплуатации ЖБК подвержены воздействию различных сред, которые оказывают определенное влияние на их долговечность. Все ЖБК, эксплуатирующиеся в воздушной среде, подвержены влиянию находящихся в ней кислотных газов. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе в $10-10^4$ раз выше концентрации других кислотных газов, основным процессом его нейтрализации является карбонизация бетона. При карбонизации бетона изменяется содержание карбонатной составляющей, по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, приводящие к перерождению цементного камня бетона, снижению его защитных свойств по отношению к арматуре, что способствует развитию коррозии арматуры с последующим разрушением защитного слоя. Дальнейшее развитие этих процессов приводит к потере конструкцией несущей способности и возникновению аварийной ситуации.

Оценка карбонизации бетона основана на определении толщины нейтрализованного слоя бетона под воздействием фенолфталеиновой пробы. При этом считается, что бетон в неокрашенной зоне карбонизируется на всю глубину, а в окрашенной – сохраняет свои защитные свойства по отношению к арматуре. Это вытекает из существующей теории, согласно которой карбонизация происходит в тонком (порядка 1 мм) слое. Многолетние исследования ЖБК по глубине бетона, выполненные НИЛ «СКО-ИФ», показывают, что карбонизация бетона не заканчивается на определенном этапе, а продолжает-ся все время эксплуатации конструкций. При этом значение толщины слоя бетона, в которой он по-