

УДК 666.972.5

ЦЕМЕНТОБЕТОННЫЕ ДОРОЖНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Н.М. ЗАЙЧЕНКО^а, доктор техн. наук, профессор, **А.В. НАЗАРОВА**^б, канд. техн. наук, с.н.с., доцент, **А.А. СОКОЛОВА**^а, магистрант

^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

^б ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», г. Луганск

Рассмотрена целесообразность применения цементных бетонов для устройства покрытий автомобильных дорог, приведены основные преимущества в сравнении с традиционными асфальтобетонными покрытиями. Показано, что применение самоуплотняющихся бетонных смесей обеспечивает повышение качества и долговечности бетонного полотна, а также значительно снижает трудоёмкость работ. Разработаны составы самоуплотняющихся бетонных смесей для жестких покрытий автомобильных дорог. Ключевая роль для соответствия бетонных смесей условиям формования отводится добавкам, в т.ч. модификаторам вязкости.

Ключевые слова: дорожные покрытия, самоуплотняющаяся бетонная смесь, суперпластификатор, модификатор вязкости.

Введение. Рост грузоподъёмности автомобилей и их скоростей, высокие транспортно-эксплуатационные расходы требуют создания прочных дорожных одежд, улучшения качества и увеличения срока их службы. Наблюдается динамика повышения интенсивности движения (более чем в два раза за последние 10 лет) и нагрузки на ось от 6–10 до 11,5–13 т для одиночных осей; от 14–16 до 18–22 т для спаренных осей; от 20–22 до 26–30 т для строенных осей. Возрастающим требованиям движения, особенно на грузонапряжённых магистралях, в наибольшей степени отвечают цементобетонные покрытия [1–4].

Мировая практика показывает, что в качестве основной альтернативы асфальтобетону при строительстве покрытий автомобильных дорог рассматривается цементный бетон. В конце 1950-х в США началось интенсивное строительство сети межштатных магистральных дорог с цементобетонными покрытиями. В настоящее время 60 % межштатных дорог с интенсивным движением транспортных средств имеют цементобетонные покрытия.

Строительство дорог с цементобетонным покрытием в Австрии концентрируется преимущественно на высококлассных автобанах и скоростной дорожной сети, где постоянно растёт интенсивность движения с участием тяжёлых грузовиков и где повышаются требования к безопасности движения не только на трассах, но особенно в туннелях, длина которых превышает более 1000 м [5–7].

В Чехии за последние 15 лет построено 65 % новых дорог из цементобетона. В Австрии и Великобритании доля цементобетонных дорог составляет свыше 50 %, в Бельгии — 40 %, в Германии — 38 % [8]. Даже в тех странах, где асфальтобетонные покрытия имеют экономические преимущества в сравнении с цементобетонными, с целью совершенствования и развития конкурирующей технологии за счёт государственных субсидий поддерживается строительство цементобетонных покрытий на уровне 10–20 % общего объёма строительства автодорог с капитальными типами покрытий [2]. В то же время, в Российской Федерации доля дорог с цементобетонным покрытием составляет лишь 3 % [9].



*Зайченко
Николай Михайлович*



*Назарова
Антонина Васильевна*



*Соколова
Анна Александровна*

В качестве обобщающих преимущественных строительно-технических характеристик цементобетонных покрытий перед асфальтобетонными специалистами выделены следующие [1-12]:

- существенно более высокая прочность при сжатии, что обеспечивает надлежащую несущую способность;
- стабильность деформативных свойств цементобетона при изменении температуры, что обеспечивает ровность покрытий и исключает колейность, наплывы и т. п.;
- рост прочности цементобетона во времени при благоприятных условиях эксплуатации;
- доступность оборудования для скоростного строительства бетонных покрытий с высокими показателями ровности;
- высокая морозостойкость бетона при применении суперпластификаторов и воздухововлекающих добавок;
- светлый цвет дороги, позволяющий значительно снизить расходы на её освещение; низкий уровень шума;
- высокая износостойкость поверхности;
- стойкость к воздействию масел и топлива;
- достаточная шероховатость поверхности, обеспечивающая развитие высокой скорости автомобилей; стабильность коэффициента сцепления покрытия с колёсами автомобилей, слабая его зависимость от степени увлажнения;
- возможность использования местных сырьевых материалов (цемент, заполнители), независимость от цен на нефтяном рынке;

- значительное снижение трудозатрат при устройстве дорожных оснований и покрытий из литых бетонных смесей, улучшение условий труда, уменьшение энергоёмкости и стоимости строительства дорог.

Постановка проблемы и её связь с важными научно-практическими задачами. Современные технологии строительства цементобетонных покрытий предполагают полную автоматизацию основных процессов по укладке и уплотнению бетонных смесей, отделке поверхности бетона, устройству температурных швов и уходу за бетоном в период набора прочности. Это позволяет существенно повысить эффективность строительных работ: улучшить ровность, увеличить производительность укладки, снизить стоимость и трудоёмкость работ, увеличить срок службы дорожных одежд.

В последние годы в России и за рубежом (Германия, Испания, Канада, Норвегия, США, Швеция, Япония) на дорогах в сельской местности, на внутрихозяйственных и промышленных площадках, съездах, стоянках, на военных объектах и т. д. применяют устройство покрытий и оснований из жёстких бетонных смесей, уплотняемых укаткой. Отличительной особенностью данной технологии является использование общестроительной техники для приготовления, распределения бетонной смеси (профилировщик, автогрейдер, асфальто- или бетоноукладчик) и уплотнения (катки различного типа, в том числе виброкатки, пневмокатки) [9].

С другой стороны, при строительстве автомагистралей с жёстким дорожным покрытием повсеместно используются специальные бетоноукладчики – слипформеры, которые не требуют какой-либо стальной или деревянной опалубки и обеспечивают непрерывное бетонирование дорожного полотна толщиной от 50 до 300 мм и шириной от 1800 до 6100 мм (рис. 1). Процесс бетонирования объединяет укладку бетонной смеси, уплотнение и отделку свежотформованной поверхности в единый процесс. Бетонная смесь с подвижностью по осадке конуса менее 5 см загружается в переднюю часть слипформера, который перемещается со скоростью до 4,5 м/мин. Бетонная смесь, попадая в полость слипформера, уплотняется внутренними вибраторами [13].

Недостатком данного способа бетонирования является образование на поверхности дорожного полотна так называемых продольных «вибрационных дорожек» – в местах действия вибраторов, где свойства бетона значительно отличаются от основного массива (рис. 2) [14]. Это обусловлено высокой интенсивностью вибрационных колебаний для разжижения малоподвижной бетонной смеси.

Применение литых и самоуплотняющихся бетонных смесей в дорожном строительстве обеспечивает



Рис. 1. Бетонирование дорожного полотна слипформером

улучшение качества дорожного полотна, повышение скорости строительства, снижение энергопотребления и трудоёмкости процесса. Согласно [9] бригада из пяти человек может укладывать и обрабатывать в смену до 1000–1200 кв. м покрытий или оснований.

Использование литых бетонных смесей вместо смесей с осадкой конуса 1–4 см позволяет на 10 % снизить расход цемента, сократить трудозатраты на 30–40 % и улучшить условия труда [9].

Отличительными особенностями технологии строительства из литых и самоуплотняющихся бетонных смесей является необходимость предварительной установки опалубки или бортовых камней, отсутствие распределяющих механизмов. Бетонные смеси уплотняются под действием собственной массы и не уступают обычным бетонам по прочности, деформативности и морозостойкости (табл. 1) [15].

Создание дорожных бетонов повышенной прочности, деформативности и морозостойкости достигается с помощью комплекса технических решений – выбора исходных материалов и добавок, проектирования оптимальных составов, реализации эффективных технологий изготовления и укладки бетонной смеси, ухода за бетоном в период твердения.

Целью работы является разработка состава самоуплотняющегося бетона и исследование влияния комплексной органоминеральной добавки, представленной микрокремнезёмом, суперпластификатором, добавкой, снижающей усадку, и модификатором вязкости, на свойства бетонной смеси и бетона.

Материалы и оборудование. В качестве вяжущего вещества использован портландцемент (ПЦ) Амвросиевского цементного завода ПЦ I-500 Н (активность 510 кгс/см², предел прочности при изгибе 64 кгс/см²; нормальная густота 25,5 %); активной минеральной добавки – микрокремнезём (МК) «Mareplast SF» с насыпной плотностью 620 кг/м³ и содержанием SiO₂ 88% по массе.



Рис. 2. Продольные контуры («вибрационные дорожки») на поверхности цементбетонного покрытия

Мелким заполнителем служил песок кварцевый (П) с показателем модуля крупности $M_k=2,35$. Крупный заполнитель представлен щебнем (Щ) гранитным Торезского карьера (фракция 5–20 мм, насыпная плотность 1480 кг/м³, марка по прочности при раздавливании в цилиндре 1000).

В качестве химических добавок использованы:

- суперпластификатор на основе модифицированного акрилового полимера Dynamon SR-3, Marei, плотность 1,08±0,02 г/см³;
- добавка, снижающая усадку бетона, на основе полипропиленгликолиевого полимера Маресиге SRA25, Marei, плотность 0,99±0,02 г/см³;
- модификатор вязкости бетонной смеси на основе высокомолекулярного биополимера Viscofluid SCC/10, Marei, плотность 1,02±0,02 г/см³.

Благодаря специально разработанному составу модификаторы вязкости позволяют бетонной смеси достичь оптимальной вязкости, обеспечивая

Таблица 1. Характеристика дорожных бетонов из литых смесей [15]

Конструкция дорог и тротуаров	Класс бетона по прочности на сжатие	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Модуль упругости, МПа	Марка по морозостойкости
Покрытия скоростных дорог и магистральных улиц	B30	5,0	40 000	F200
Улицы и дороги местного значения	B27,5	4,5	35 000	F200
Основания дорожных покрытий	B15	3,0	24 000	F100
Тротуары, отмотки, площадки	B25	4,0	29 000	F200

адекватный баланс между подвижностью и устойчивостью к расслоению.

Средний уровень прочности бетона при сжатии (f_{cm}) (класс бетона В30) и на растяжение при изгибе ($f_{c,if}$) (класс бетона Вt4,0) для покрытий скоростных дорог и магистральных улиц (табл. 1 [15]). В соответствии с ДСТУ Б В.2.7-224:2009:

$$f_{cm} = C_n \cdot k_t = 30 \cdot 1,28 = 38,4 \text{ МПа} \quad (1)$$

$$f_{c,if} = C_n \cdot k_t = 4,0 \cdot 1,28 = 5,1 \text{ МПа} \quad (2)$$

Расчетная величина В/Ц по прочности на растяжение при изгибе 0,42; по прочности при сжатии 0,56; по морозостойкости – не более 0,5. Для дальнейших расчётов принято значение В/Ц=0,42.

В соответствии с рекомендациями Европейской федерации специалистов по строительной химии и бетона [16] расчёт состава самоуплотняющейся бетонной смеси выполнен в соответствии со следующими принципами (табл. 2):

- соотношение вода / порошок (цемент, минеральная добавка, фракции песка мельче 0,125 мм) по объёму – от 0,80 до 1,10;
- содержание цемента – 350-450 кг/м³;
- общее содержание дисперсных материалов – от 160 до 240 литров (400–600 кг) на куб. метр;
- содержание крупного заполнителя – от 28 до 35 % по объёму бетонной смеси;
- содержание воды не более 200 л/м³.

Технологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБ) определены в соответствии с Европейскими [16] и Американскими директивами [17] по самоуплотняющимся бетонам. Показателями технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей служат такие характеристики, как подвижность (текучесть), выражаемая диаметром расплыва стандартного конуса (*Slump Flow, SF*, мм), и вязкость, выражаемая временем растекания конуса бетонной смеси до достижения диаметра 500 мм

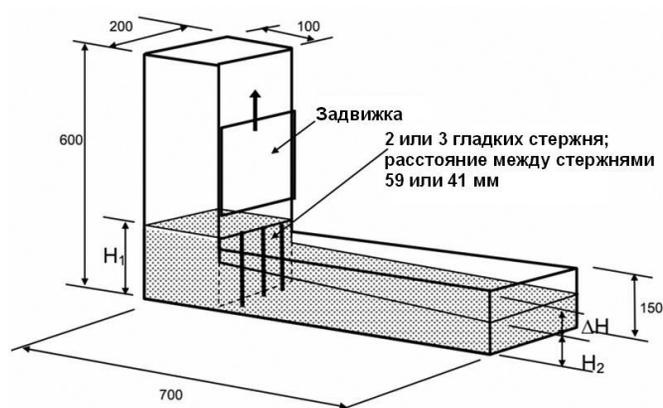


Рис. 3. Определение способности СУБ преодолевать препятствия (passing ability) с помощью L-образного ящика («L-box» test)

(Viscosity Speed, VS/VF, T_{500} с). Для оценки способности СУБ преодолевать препятствия (Passing Ability, PA) использовали L-образный ящик («L-box») с длиной основания 700 мм, в конструкции которого имеется открывающаяся задвижка и три вертикальных арматурных стержня (рис. 3). Вертикальная часть ящика ровень с краями заполняется бетонной смесью. Одновременно с поднятием задвижки засекается время, за которое бетон растекается по горизонтальной части ящика, преодолевая препятствия из стержней. По достижении бетоном отметки 400 мм фиксируется время. После завершения истечения бетонной смеси из вертикальной части в горизонтальную измеряются уровни бетонной смеси в месте заполнения (H_1) и в месте достижения крайнего положения (H_2). Определяется отношение H_2/H_1 .

Оценку стойкости бетонной смеси к сегрегации (Segregation Resistance, SR) проводили по показателю равномерности распределения зёрен крупного заполнителя в трёхсекционной цилиндрической форме общей высотой 450 мм, высотой секции 150 мм и диаметром 150 мм, разделяемой на секции двумя задвижками (рис. 4). Цилиндрическая форма

Таблица 2. Состав самоуплотняющихся бетонных смесей

№ состава	Расход компонентов, кг/м ³					Расход химических добавок, л/м ³		
	ПЦ	МК	П	Щ	В	SR-3*	SRA25*	SCC/10*
1	398	54	744	901	188	2,25	–	–
2	398	54	744	901	177	2,25	4,5	6,5
3	407	45	747	901	170	3,375	6,75	9,75
4	416	36	749	901	163,5	4,5	9	13

* Расход суперпластификатор SR-3 принят 0,5–0,75–1 л / 100 кг (ПЦ + МК); расход добавки, снижающей усадку SRA25 – 1,0–1,5–2,0 л / 100 кг (ПЦ + МК); расход модификатора вязкости SCC/10 – 1,0–1,5–2,0 л / 100 кг (ПЦ + МК + П ≤ 0,125)

Таблица 3. Технологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей

Состав бетона, №	Диаметр расплыва конуса, SF, мм	Время растекания конуса, T ₅₀₀ , с	Отношение H ₂ /H ₁ («L-box» test)	Стойкость к сегрегации, SR, %
1	534	2,0	0,83	14,5
2	546	2,5	0,85	9,3
3	558	2,8	0,87	6,4
4	562	3,4	0,88	5,1



Рис. 4. Определение стойкости СУБ к сегрегации в трёхсекционной цилиндрической форме

под углом 45 град. полностью заполняется бетонной смесью (крупность заполнителя до 20 мм) и отстаивается в вертикальном положении около 30 минут. При помощи двух горизонтальных задвижек бетонная смесь в цилиндре разделяется на три секции, и содержимое каждой из секций взвешивается. Затем содержимое каждой секции промывают водой на сите с размером ячейки 5 мм. Щебень после промывания высушивают и взвешивают. Равномерность распределения зёрен заполнителя определяется путём сравнения трёх масс сухого заполнителя крупностью 5–20 мм, полученного из трёх секций после промывания.

Оценка вероятности трещинообразования в СУБ выполнена в соответствии с ASTM C1581-04 «Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage» [18].

Результаты и обсуждение. По результатам исследования технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей установлено, что разработанный базовый состав № 1, содержащий микрокремнезём

и суперпластификатор, согласно [16] характеризуется следующими классами: по подвижности – SF1, по вязкости – VS1/VF1, по проникающей способности – PA1, по стойкости к сегрегации – SR2 (табл. 3).

Введение в состав СУБ № 2 дополнительно добавок – модификатора вязкости и добавки, снижающей усадку, – обеспечивает практически те же классы технологических свойств бетонных смесей, однако при этом незначительно увеличивается текучесть смеси (диаметр расплыва конуса), повышается вязкость (класс VS2/VF2) и стойкость к сегрегации.

По мере увеличения содержания химических добавок (составы 3 и 4) наблюдается более существенное повышение подвижности, вязкости и стойкости бетонной смеси к сегрегации (снижение разброса ключевого показателя – содержания зёрен крупного заполнителя в трёхсекционной цилиндрической форме). Следует отметить, что последний показатель улучшается на фоне уменьшения содержания в бетонной смеси микронаполнителя – микрокремнезёма, за счёт модификатора вязкости, который при этом не оказывает негативного влияния на подвижность (предельное напряжение сдвига с точки зрения реологии).

Показатели предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения для бетонов составов 1-3 находятся в пределах 52–58 МПа (рис. 5), что существенно превышает показатель

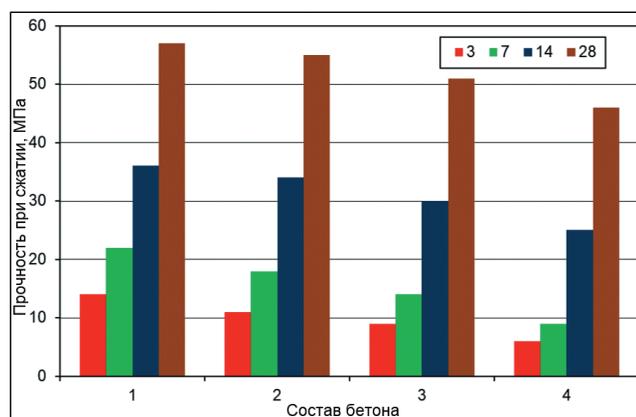


Рис. 5. Кинетика роста прочности бетона в нормальных условиях

Таблица 4. Оценка вероятности трещинообразования в бетоне согласно ASTM C 1581-04

Период времени до образования трещины t_{cr} , сут.	Уровень напряжений при образовании трещины, S, МПа/сут.	Вероятность трещинообразования
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 0,34$	высокая
$7 < t_{cr} \leq 14$	$0,17 < S < 0,34$	средне-высокая
$14 < t_{cr} \leq 28$	$0,10 < S \leq 0,17$	средне-низкая
$t_{cr} < 28$	$S \leq 0,10$	низкая

средней прочности бетона класса В30 – 38,4 МПа (1), а также требуемую прочность бетона при сжатии (f_c), обеспечивающая нормируемую прочность бетона на растяжение при изгибе (3):

$$f_c = \left(\frac{C_n}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = \left(\frac{5,1}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 50,9 \text{ МПа} \quad (3)$$

Отмечено также замедляющее влияние на рост прочности бетона добавки, снижающей усадку бетона SRA25. При этом более существенный эффект наблюдается в раннем возрасте твердения.

С другой стороны, установлено положительное влияние данной добавки на снижение риска трещинообразования бетона, вызванного усадочными деформациями при высыхании бетона в стеснённых условиях (в реальных условиях эксплуатации

стеснённые условия обусловлены, например, сцеплением бетона дорожной одежды с основанием).

В соответствии с ASTM C1581-04 [18] вероятность трещинообразования оценивается уровнем напряжений при образовании трещины, S, МПа в определённом возрасте бетона, которому соответствует величина предела прочности бетона на растяжение (табл. 4).

Время до образования трещины – это период времени от образования трещины до съёма с поверхности образца бетона защитной плёнки, предотвращающей испарение влаги. Трещина (микротрещина) в бетоне возникает в том случае, когда, например, напряжения, вызванные усадочными деформациями, превышают величину предела прочности бетона на растяжение. Последовательность проведения эксперимента и процессы,

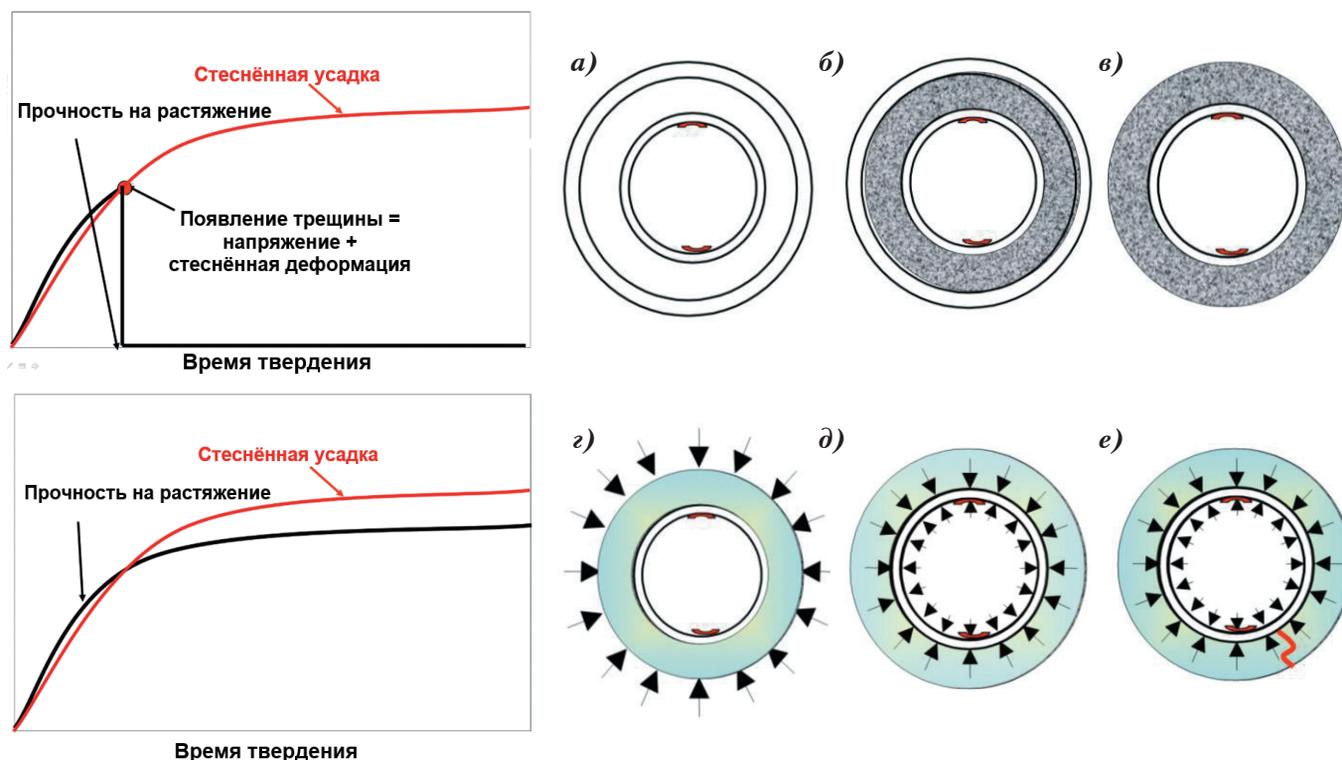


Рис. 6. Последовательность проведения эксперимента и развитие напряжений в бетоне вследствие стеснённой усадки: а) подготовка внутренней и наружной форм-колец и установка тензодатчиков; б) формование; в) съём наружной формы; г) твердение бетона и развитие усадки при высыхании; д) реакция стального кольца; е) образование трещины

происходящие в кольцах бетона и стальной формы, представлены на рис. 6.

Твердение бетона в форме в течение трёх суток происходит при температуре $t=26,5-27,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях, исключающих испарение влаги из бетона.

Далее снимают внешнюю форму и торцы бетонного кольца защищают от испарения влаги парафинированием, при этом обеспечивая возможность испарения влаги с радиальной поверхности образца бетона. После этого подключают тензодатчики, которые выводятся на модуль регистрации «ОВЕН МВ-110-224.4ТД» и ПК. В дальнейшем твердение (усадка при высыхании) бетонного кольца проходит при температуре $t=26,5-28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 70–65 %.

Расчёт величины среднего растягивающего напряжения в бетоне как функцию времени твердения $\sigma_{avg}(t)$ (МПа) осуществляют по формуле [19]:

$$\sigma_{avg}(t) = \frac{E_s r_{ic} h_s}{r_{is} h_c} \times (\varepsilon_s(t)) \times 10^{-6}, \quad (4)$$

где E_s – модуль упругости стали (МПа);
 r_{ic} – внутренний радиус кольца бетона (мм);
 r_{is} – внутренний радиус стального кольца (мм);
 h_c – толщина стенки бетонного кольца (мм);
 h_s – толщина стенки стального кольца (мм);
 $\varepsilon_s(t)$ – деформация в стальном кольце как функция времени (мкм/м).

Геометрические параметры стального и бетонного колец приведены на рис. 7.

Установлено, что в процессе твердения и высыхания бетонного кольца состава СУБ № 1 в нем

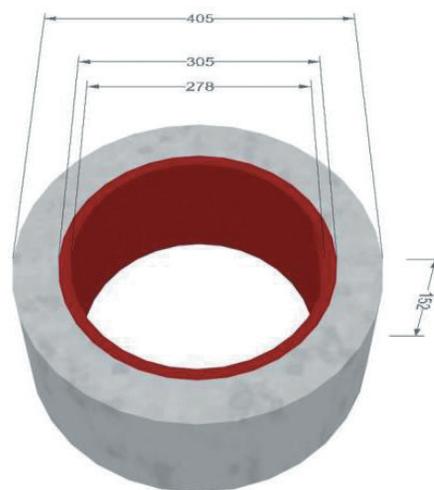


Рис. 7. Геометрические параметры стального и бетонного колец

возникают и развиваются растягивающие напряжения, которые к возрасту 13 суток твердения и 10 суток высыхания достигают величины 3,82 МПа и обуславливают образование трещины (рис. 8). Согласно данным табл. 4 при величине уровня напряжений при трещинообразовании в возрасте до 14 суток $0,17 < S < 0,34$ МПа/сут. ($S_{факт.} = 0,38$ МПа/сут.) состав СУБ № 1 можно характеризовать как бетон с высокой вероятностью трещинообразования.

Положительное влияние на снижение риска трещинообразования оказывает добавка, снижающая усадку SRA 25 (составы № 2–4), при этом по мере увеличения содержания добавки величина напряжений бетона в возрасте твердения 28 суток

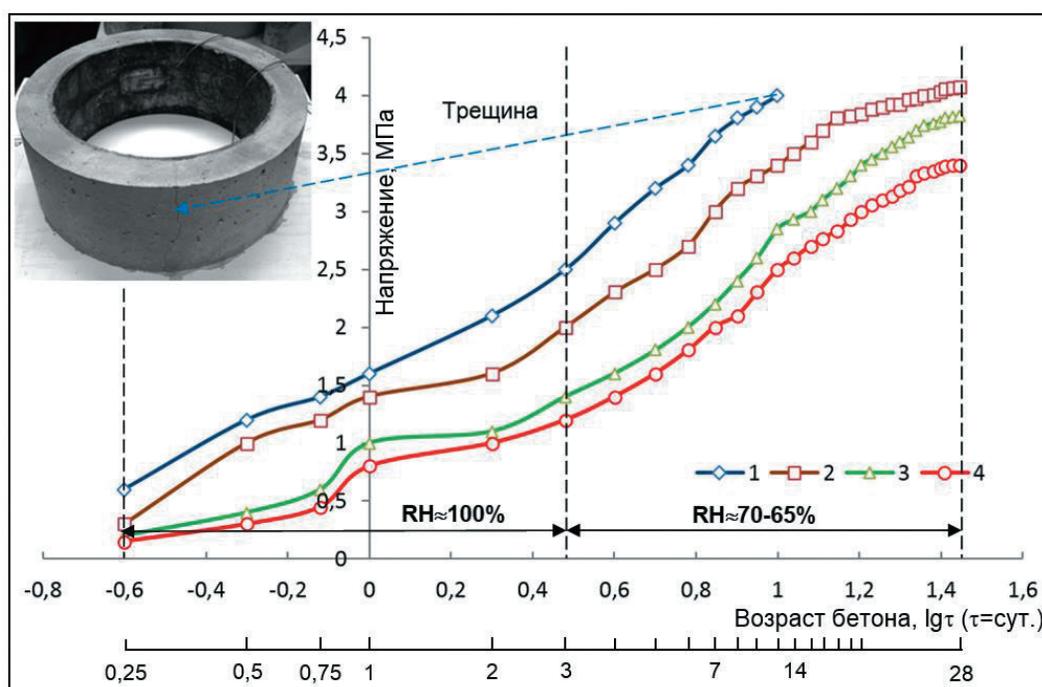


Рис. 8. Стеснённая усадка СУБ составов 1-4

и возрасте высушивания 25 суток составляет соответственно $S_{\text{факт.}} = 0,152$ МПа/сут. для состава № 2; $S_{\text{факт.}} = 0,14$ МПа/сут. для состава № 3, $S_{\text{факт.}} = 0,124$ МПа/сут. для состава № 4 – средне-низкая вероятность трещинообразования.

Библиографический список

1. Ушаков, В.В. Автомобильные дороги. Ремонт цементобетонных покрытий автомобильных дорог. Обзорная информация [Текст] / В.В. Ушаков // М.: Информационный центр по автомобильным дорогам. – 2002. – Вып. 6.
2. Ушаков, В.В. Магистралям России – Долговечные покрытия [Текст] / В.В. Ушаков // Российский информационно-технический журнал «Дороги Евразии». – 2014. – № 1 – Январь-Февраль. – С. 22–25.
3. Гамеляк, І.П. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям [Текст] / І.П. Гамеляк, А.С. Корецький, С.С. Корецький // Автошляховик України. – 2013. – № 5 (235). – С. 24–31.
4. Носов, В.П. Основные тенденции в строительстве цементобетонных покрытий на автомобильных дорогах [Текст] / В.П. Носов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 4 (59). – С. 1–3.
5. Радовский, Б.С. Цементобетонные покрытия в США [Текст] / Б.С. Радовский // Дорожная техника. – 2009. – С. 50–58.
6. Буров, М.П. Эколого-экономические проблемы и совершенствование бетонного производства [Текст] / М.П. Буров // Технологии бетонов. – 2012. – № 9–10. – С. 26–29.
7. New Generation Cement Concretes. Ideas, Design, Technology and Applications 2 / R. Hela, L. Vodnarova et al. // LLP-Erasmus: 8203-0519/IP/Kosice 03/REN: Brno University of Technology, 2009. – 174 pp.
8. Коганзон, М.С. Автомобилизация требует жёстких дорожных одежд. Современные возможности применения цементобетона при строительстве дорожных одежд в России / М.С. Коганзон // Газета «Строительный эксперт». – 12 ноября 2004 г.
9. Коровяков, В.Ф. Литые бетонные смеси для дорожного строительства [Текст] / В.Ф. Коровяков, Туан Ми Чан // Технологии бетонов. – 2012. – № 9–10. – С. 52–55.
10. Толмачев, С.Н. Строительство автодорог с цементобетонным покрытием в Украине – реальность сегодняшнего дня [Текст] / С.Н. Толмачев // Автошляховик України. – 2013. – № 4(234). – С. 36–40.
11. Требования к цементам для дорожного и аэродромного строительства [Текст] / Энтин З.Б., Феднер Л.А., Шейнин А.М., Эккель С.В. // Цемент и его применение. – 1997. – № 1. – С. 30–33.
12. Радовский, Б.С. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей [Текст] / Б.С. Радовский, А.С. Супрун, И.И. Козаков. – К.: Будівельник, 1989. – 168 с.
13. Self-Consolidating Concrete – Applications for Slip-Form Paving: Phase I (Feasibility Study) / K. Wang, S.P. Shah, D.J. White, J. Gray et al // Final Report: Center for Portland Cement Concrete Pavement, Technology Iowa State University. – November 2005. – 63 pp.
14. Mbele, J.-J. Optimization of Self-Consolidating Concrete for Slip-form pavement / Jean-Juste Mbele // A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering: Northwestern University, April 2006. – 83 pp.
15. Дворкин, Л.И. Специальные бетоны [Текст] / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
16. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use // SCC European Project Group, May 2005. – 63 pp.
17. «ACI 237R-07, Self-Consolidating Concrete», American Concrete Institute, 2007. – 30 pp.
18. ASTM C1581-04 «Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage».
19. Development of Test Methods to Evaluate Cracking Tendency of Repair Materials – Field Study Phase II / K.F. Von-Fay, M. Morency, B. Bissonnette, A.M. Vaysburd // MERL Research Report 2009-1, May 2009. – 44 pp.