

УДК 691.322

*М. Г. Салихов, В. В. Савельев,
Е. В. Веюков, О. Г. Ермакова*

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТОБЕТОНОВ С ДОБАВКАМИ АСФАЛЬТОВОГО ГРАНУЛЯТА

Исследованы прочностные свойства цементобетонов с добавками из асфальтогранулята. Выявлены закономерности в изменении прочности образцов в зависимости от состава смесей.

***Ключевые слова:** цементобетон, асфальтогранулят, полужёсткие бетоны, добавки.*

Введение. В дорожной отрасли происходит постоянная разработка технологических приёмов конструкционных материалов, снижающих себестоимость строительства дорожных одежд, решаются вопросы совершенствования методик исследования различных свойств дорожно-строительных материалов с целью поиска путей повышения их качества и долговечности в процессе эксплуатации в дорожных конструкциях. Традиционно применяемые в покрытиях автомобильных дорог асфальтобетоны из-за резко возросшей в последние десятилетия интенсивности движения перестали удовлетворять требованиям долговечности. Например, максимальное сопротивление сдвигу асфальтобетона при 50 °С составляет не более 0,2–0,4 МПа, в то же время нагрузка современных транспортных средств на участках торможения достигает 2,0 МПа. Циклическая долговечность асфальтобетонов составляет 10^6 циклов, что соответствует всего 2–3 годам эксплуатации. Требованию долговечности отвечают дорожные одежды с жёсткими покрытиями, например, цементобетонные. Возможность использования цементобетонных покрытий обеспечивается за счёт высоких дорожно-эксплуатационных характеристик: хорошего сцепления колёс автомобиля с поверхностью покрытия, надёжности, высокой прочности, водонепроницаемости, долговечности покрытия и т.д.

В России срок службы цементобетонных покрытий до капитального ремонта составляет не менее 25 лет [1], что выше значения данного показателя для асфальтобетонных покрытий на 10–15 лет [2]. По сравнению с асфальтобетоном, цементобетоны обладают рядом преимуществ: у них более высокие значения показателей прочности, морозостойкости, меньшая зависимость прочностных свойств от изменения положительных температур и т.д. [3, 4]. В то же время им свойственны определённые недостатки: большая себестоимость из-за необходимости устройства покрытия большей толщины (20–24 см [1]), высокая жёсткость. Последнее требует устройства температурных швов, что ухудшает комфортность проезда пассажиров. Цементобетоны плохо сопротивляются действию противогололёдных хлористых солей, используемых на дорогах, и имеют низкую сопротивляемость изгибающим и растягивающим нагрузкам, большую усадку при схватывании и затвердевании. При этом цементобетонные покрытия обладают сравнительно низкой ремонтпригодностью.

Таким образом, традиционно применяемые в покрытиях дорожных одежд автомобильных дорог материалы, такие как асфальтобетоны и цементобетоны, в сложных дорожно-климатических условиях не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям. Выдвигается гипотеза о том, что введение в структуру жёсткого цементобетона позволит снизить его жёсткость, повысить его трещиностойкость и долговечность покрытия. В данной работе предложен и исследован способ снижения жёсткости цементобетонов путём введения в структуру битумосодержащих отходов продукта холодного фрезерования старого асфальтобетонного покрытия.

Целью работы является изучение влияния добавок асфальтогранулятов (АГ) холодного фрезерования на показатели прочности и жёсткости цементобетонов, в качестве которых приняты пределы прочности на сжатие, растяжение при изгибе и модуль упругости материала.

Задачей исследования является экспериментальное установление зависимостей прочности цементобетонов различного срока твердения при сжатии, растяжении при изгибе и модуля упругости от количества добавок АГ различных фракций.

Методика проведения эксперимента. Для экспериментального изучения свойств цементобетона были изготовлены партии образцов в виде кубов размерами 10x10x10 см и балок размером 10x10x40 см с добавками АГ 0, 10, 20, 30 % по массе. Для изучения влияния крупности зёрен АГ на структурообразование цементобетонов часть опытов проведена при изменении фракционного состава добавок в пределах: 0–10, 0–20, 5–20 мм. Образцы цементобетона испытывались после твердения во влажных условиях в течение 7, 10, 15, 20 суток. Водоцементное отношение (ВЦ) во всех образцах принято равным 0,45.

Физико-механические свойства компонентов цементобетонов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические свойства компонентов цементобетонов

Наименование материала, поставщик	Показатели
1. Щебень М1200 по ГОСТ 8267-93 (ООО «Южноуральск», г. Сатка Оренбургской области)	1. Фракция 5 ... 20 мм 2. Плотность $\rho = 2,85 \text{ г/см}^3$ 3. Насыпная плотность $\delta_{\text{н}} = 1,48 \text{ г/см}^3$ 4. Пустотность $v_{\text{пуст}} = 0,48$ 5. Средняя плотность $\delta_{\text{ср}} = 1480 \text{ кг/см}^3$ 6. Марка по морозостойкости $F = 300$ 7. Содержание пылевидных и глинистых частиц $Q_{\text{п, гл}} = 0,10 \%$
2. Песок природный по ГОСТ 8736-93 (Студёнковский песчаный карьер Республики Марий Эл)	1. Модуль крупности $M_{\text{к}} = 2,10$ 2. Плотность $\rho = 2,63 \text{ г/см}^3$ 3. Насыпная плотность $\delta_{\text{н}} = 1440 \text{ кг/см}^3$ 4. Содержание пылевидных и глинистых частиц $P_{\text{п, гл}} = 2,00 \%$
3. Портландцемент по ГОСТ 10178-85 марка ПЦ-500 (ОАО «Вольскцемент»)	1. Активность $A = 49,50 \text{ МПа}$ 2. Плотность $\rho = 3,1 \text{ г/см}^3$ 3. Насыпная плотность $\delta_{\text{н}} = 1250 \text{ кг/см}^3$
4. Асфальтогранулят холодного фрезерования (с Ленинского проспекта г. Йошкар-Олы и а/д Йошкар-Ола – Зеленодольск на участке обхода п. Куяр)	Грансостав (содержание в % по массе) 0 – 40 мм (100); 5 – 40 (46,0); 3 – 5 (10,5); 2,5 – 3,0 (3,7); 1,25 – 2,5 (5,3); 0,63 – 1,25 (16,4); 0,28 – 0,63 (10,8); 0,14 – 0,28 (1,9); 0,08 – 0,14 (0,2); менее 0,08 (0,2).

Образцы цементобетона готовились из смеси компонентов с расходом на одну форму объёмом 4100 см³ (литра): щебня – 5,775 кг; песка – 3,230 кг; портландцемента – 1,637 кг; воды – 0,739 кг; асфальтогранулята – 0; 0,578; 1,185; 1,733 кг; химической добавки С₃ – 0,0081 кг.

Изготовление и испытание образцов в виде балок на растяжение при изгибе и модуль упругости осуществлялось по стандартным методикам ГОСТ 10180 –90 [5] и ВСН 46 – 83 [3]; кубических образцов на сжатие – по методикам ГОСТ 10180 –90 [5]. Достоверность опытов обеспечивается проведением необходимого количества приложений на одну точку с обеспечением надёжности. После заполнения смесь в форме уплотнялась на лабораторной виброплощадке и затем подвергалась твердению при комнатных температурах в камере, где в течение расчётного времени постоянно поддерживался насыщенный пар.

При испытаниях на растяжение при изгибе и установлении модуля упругости нагружение до полного разрушения выполняли ступенчато с шагом 100 Па с фиксацией полной и упругой деформаций (прогибов) при помощи гидравлического пресса.

Значения пределов прочности образцов при изгибе $R_{изг}$ и при сжатии $R_{сж}$ рассчитывались по формулам (1) и (2):

$$R_{изг} = 0,1 \cdot K_M \cdot \frac{P_P \cdot \ell}{a \cdot b^2} \cdot K_W, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P_P – разрушающая нагрузка при изгибе, кгс*; ℓ – расстояние между опорами балки, см; a и b – размеры поперечного сечения образцов, см; K_M – масштабный коэффициент, $K_M = 1,0$; K_W – поправочный коэффициент, учитывающий влажность.

$$R_{сж} = 0,1 \cdot \frac{P}{F} \cdot K_W, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где P – разрушающая нагрузка при сжатии, кгс; F – площадь действия сжимающей нагрузки, см².

Значения модуля упругости E рассчитывались по формуле:

$$E = \frac{K_\ell \cdot K_t \cdot P_1 \cdot \ell^3}{48 \cdot f \cdot J}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где $P_1 = 0,5 P_P$, нагрузка при изгибе, кгс; K_ℓ , K_t – поправки, зависящие от соотношения «длина измерительного устройства – расчётный пролёт балки», $K_\ell = 1,0$; $K_t = 1,0$; f – упругий прогиб балки, мм; J – момент инерции сечения образца.

Момент инерции рассчитывался по формуле:

$$J = \frac{b \cdot a^3}{12}. \quad (4)$$

Результаты экспериментов и их анализ. Результаты экспериментов по изучению пределов прочности цементобетонных 28-суточного твердения при изменении количества добавок АГ от 0 до 30 % по массе представлены в табл. 2.

Изменение значений пределов прочности образцов цементобетона на растяжение при изгибе, при сжатии и модуля упругости в различные сроки твердения показано в табл. 3.

Из полученных экспериментальных данных, приведённых в табл. 2 и 3, видно, что по мере добавления в структуру цементобетона АГ холодного фрезерования значения прочностных показателей и модуля упругости образцов цементобетонных снижаются

*Введение данной размерности в формулах (1)–(3) приведено из-за тарировки испытательного пресса в кгс.

соответственно пропорционально массовой доле АГ холодного фрезерования. При этом, во-первых, скорость снижения значений модуля упругости в начальный период значительно интенсивнее, чем прочности при сжатии и изгибе; во-вторых, чем меньше размеры вводимых добавок, тем больший эффект снижения конечной прочности при сжатии образцов цементобетона. Последнее говорит о соответственном снижении модуля упругости. Также можно заметить, что добавление до 30 % АГ не влияет на характер набора прочности цементобетона во времени.

Т а б л и ц а 2

Пределы прочности цементобетонных при изменении количества добавок АГ

Параметры	Q _{АГ} , % мас.				
	0	10	20	30	
Крупность, мм	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 10	5 – 20
R _{изг} , МПа	3,23	3,11	2,62	2,31	–
R _{сж} , МПа	46,00	42,40	35,50	25,80	26,20
E · 10 ⁴ , МПа	1,688	0,368	0,211	–	–

Т а б л и ц а 3

Пределы прочности компонентов цементобетонных при изменении добавок АГ

Содержание асфальтогранулятов Q _{АГ} , % массовых (фракция АГ, мм)	Продолжительность твердения цементобетона, сутки			
	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа		Модуль упругости E · 10 ⁴ , МПа	
	0	30 (0 – 10)	0	30 (0 – 10)
7	1,60	1,56	0,58	0,37
10	1,96	1,76	0,82	0,52
15	2,31	2,07	1,08	0,75
23	2,37	2,19	1,34	1,23
30	3,23	3,11	1,60	1,38

В процессе твердения цементобетонной смеси после затворения водой начинаются химические реакции: в первой стадии алит взаимодействует с водой с образованием гидросиликатов кальция ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$) и гидроксида кальция ($3\text{Ca}(\text{OH})_2$), далее идут реакции гидратации трёхкальциевого алюмината с образованием на поверхностях негидратированных частиц рыхлых метастабильных гидратов. Часть трёхкальциевого алюмината реагирует с водой быстро, образуя более устойчивый шестиводный гидроалюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Алюминат кальция в среде насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вступает в реакцию с природным гипсом ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), образуя гидросульфаталюминат кальция или эттрингит. Далее процессы гидратации продолжаются до образования более устойчивых структур [6].

Анализ результатов экспериментов показывает, что присутствие битумосодержащих дисперсных частиц не может приостановить гидратационные

процессы, хотя их и замедляет. Это, возможно, происходит из-за поверхностно-активных углеводородных составляющих гранулята на межфазных поверхностях дисперсных частиц, образующихся в процессе гидратации минералов. В завершающей стадии гидратации (твердения) между продуктами гидратации, частью гидросиликата кальция (т.е. цементного камня) и частью непрореагировавших зёрен клинкера и в гелевых порах цементного камня оказываются полусвязанные смолистые части битума, которые под действием механических воздействий будут работать как эластичное тело. Кроме того, при этом свою роль могут сыграть процессы изменения свободной поверхностной энергии структурообразующих элементов. Такие процессы, с одной стороны, должны привести к уменьшению жёсткости, с другой стороны – к повышению водостойкости и морозостойкости цементобетона. Для подтверждения или опровержения этой гипотезы в дальнейшем потребуется провести дополнительные эксперименты по изучению свойств и микроструктуры цементобетонных смесей с добавками асфальтогранулята.

Выводы

1. Установлено, что введением в цементобетонные смеси асфальтогранулятов холодного фрезерования в пределах до 30 % по массе можно регулировать показатели жёсткости и прочности цементобетонных смесей. Этот способ позволяет повысить морозостойкость, водостойкость, долговечность цементобетонных смесей как конструктивного материала для покрытий, бетонных и железобетонных изделий для автомобильных дорог.

2. Выдвинута гипотеза структурообразования цементобетонных смесей в присутствии дисперсных битуминированных частиц – асфальтогранулятов холодного фрезерования.

Список литературы

1. Методические рекомендации по проектированию жёстких дорожных одежд. Введ. 2003-12-03. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 88 с.
2. ОДН 218.046-2001. Проектирование нежёстких дорожных одежд. – Введ. 2001-01-01. – М.: Информавтор, 2001. – 106 с.
3. Носов, В.П. Цементобетон в дорожном строительстве. Состояние. Проблемы. Перспективы: Тезисы докладов международного семинара «Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве» / В. П. Носов. – М.: МАДИ, 2002. – С. 5 - 9.
4. Богуславский, А.М. Цементобетон – материал для дорожных и аэродромных покрытий / А.М. Богуславский, В.В. Доргин // Автомобильные дороги. – 1985. – № 14. – С. 14 – 16.
5. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 1991-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 44 с.
6. Горчаков, Г.И. Строительные материалы. Учеб. для студентов вузов / Г.И. Горчаков. – М.: Высшая школа, 1981. – 412 с., ил.

Статья поступила в редакцию 30.09.11.

*M. G. Salikhov, V. V. Savelyev,
E. V. Veukov, O. G. Ermakova*

RESEARCH OF STRUCTURE FORMATION AND STRESS-STRAIN PROPERTIES OF CEMENT CONCRETE WITH ADDITIVES FROM GRANULAR ASPHALT

Properties of cement concrete with additives of granular asphalt are researched. The regularities concerning changes in the strength of the samples depending on composition of the mixtures are revealed.

Key words: *cement concrete, granular asphalt, semirigid concretes, concrete admixture.*

САЛИХОВ Мухаммет Габдулхаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильных дорог МарГТУ. Область научных интересов – физико-химические процессы и экологические аспекты производства и применения дорожно-строительных материалов. Автор 170 публикаций, 9 патентов и авторских свидетельств СССР и РФ на изобретения.

E-mail: SalihovMG@marstu.net

САВЕЛЬЕВ Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и оснований МарГТУ. Область научных интересов – вопросы обоснования оптимальных параметров бетонных и железобетонных плит лесовозных автомобильных дорог в системе автоматизированного проектирования. Автор 90 публикаций.

E-mail: Saveliev44@mail.ru.

ВЕЮКОВ Евгений Валерианович – аспирант кафедры автомобильных дорог МарГТУ. Область научных интересов – разработка и исследование антигололедных щебеночно-мастичных асфальтобетонов для покрытий автомобильных дорог. Автор пяти публикаций.

E-mail: VeukovEV@marstu.net

ЕРМАКОВА Ольга Геннадьевна – аспирант кафедры автомобильных дорог МарГТУ. Область научных интересов – разработка способов и технологий получения, производства и применения полужёстких покрытий с использованием местных материалов.

E-mail: kad@marstu.net