

УДК 625.815.5:691.54.001

*А.М. Краснов*

Краснов Анатолий Митрофанович родился в 1930 г., окончил в 1954 г. Ленинградский инженерно-строительный институт, кандидат технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог Марийского государственного технического университета. Имеет 150 печатных работ по разработке технологий дорожно-строительных материалов.



### **ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПЕСЧАНОГО БЕТОНА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ СБОРНЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Изложены два принципа формирования структуры высокопрочного песчаного бетона. Представлены расчетные усилия напряженно-деформированных дорожных плит покрытия лесовозных автомобильных дорог, обеспечивающие эксплуатационную долговечность конструкций.

Ключевые слова: цементная матрица, наполнитель, удельное давление, осадки плит.

Рост объемов перевозки пассажиров и грузов различными видами транспорта требует расширения сети автомобильных дорог как общего пользования, так и ведомственных. Дороги должны иметь высокий эксплуатационный уровень и долговечность. К таким дорогам относят сборные покрытия из цементно-бетонных плит, эксплуатация которых без ремонта более продолжительна по сравнению с нежесткими дорожными покрытиями. Их преимущества: круглогодичное производство плит, удлиненный сезонный срок строительства (что особенно важно для северных районов Российской Федерации) и ускоренный ввод в эксплуатацию. Эффективность работы дорожных плит может быть обеспечена применением не только щебня из высокопрочной горной породы, но и местных сырьевых материалов. Например, использование мелкодисперсного наполнителя позволит получить материал, не уступающий по свойствам тяжелым цементным бетонам, и снизить стоимость бетона.

В настоящее время широко обсуждают вопрос о возможности повышения качества мелкодисперсных строительных композитов на основе органических и минеральных вяжущих, что объясняется различной активностью дисперсных наполнителей и их разным химико-минералогическим составом [1–6, 10, 12].

Большое практическое значение имеет изучение физико-механических свойств композиционного материала (КМ) в зависимости от концентрации наполнителя в вяжущем. В создании прочной структуры такого материала следует рассматривать два технологических этапа.

Первый этап – снижение избыточной энергии в системе цементное зерно – вода – микронаполнитель и самопроизвольное объединение частиц дисперсной фазы в структурные агрегаты. Оно имеет место в том случае, когда сумма затрат различных видов энергии частиц ( $W$ ), возникающих при самоорганизации вяжущего, может быть определена по формуле [9, 10]

$$W = W_b + W_R + W_6 + W_{\pi}, \quad (1)$$

где  $W_b$  – потенциальная энергия двух взаимодействующих частиц, получаемая интегрированием сил Ван-дер-Ваальса;

$W_R$  – энергия взаимодействия двух двойных электрических слоев;

$W_6$  – энергия борновского отталкивания (электронное отталкивание при сближении частиц);

$W_{\pi}$  – энергия расклинивающего давления по Б.В. Дерягину.

Ко второму этапу относят внешнее механическое воздействие, при котором упорядочение частиц в КМ, по мнению ряда авторов [3, 10, 13, 14], может зависеть от параметра Грюнайзена ( $Y$ ). Уравнение этого параметра выведено на основании экспериментальных данных о коэффициенте теплового расширения, изотермическом модуле объемного расширения, объеме тела и теплоемкости при постоянном его объеме [14] и выражает изменение частоты нормальных колебаний кристаллической решетки в зависимости от изменения объема кристалла. В конечном виде параметр Грюнайзена выражают по уравнению

$$Y = (E_0 - E) / (LTE_0), \quad (2)$$

где  $E_0$  – модуль Юнга при 0 К;

$E$  – модуль Юнга в естественных условиях;

$L$  – коэффициент линейного расширения;

$T$  – температура.

Поскольку переменные  $P$  (давление) и  $T$  (температура) эквивалентны [3], в уравнении (2) произведем замену параметра  $T$  на  $P$ . Тогда уравнение (2) примет вид

$$Y = (E_0 - E) / (PE_0). \quad (3)$$

Эту формулу можно использовать для описания локального упорядочения фазовых частиц в КМ. Для рассмотрения эффекта этого процесса использована кластерная модель структуры [11], согласно которой твердые частицы упакованы в микрообласти структуры и окружены рыхлоупакованной цементной средой. В микроблоках действуют слабые межчастичные ван-дер-ваальсовы связи и сильные ангармонизмы взаимодействующих диполей частиц. Для диполей  $d_1$  и  $d_2$  при воздействии  $P$  энергия взаимодействия может быть описана уравнением [3]

$$W = -2d_1^2 d_2^2 / (3Th), \quad (4)$$

где  $h$  – расстояние между частицами.

Заменяв  $T$  на  $P$ , получим зависимость взаимодействия диполей  $d_1$  и  $d_2$  от давления:

$$W = -2d_1^2 d_2^2 / (3Ph). \quad (5)$$

Зависимость удельного объема  $V$  от давления может быть записана в соответствии с уравнением [7]

$$V_2 = V_1(1 + \beta\Delta t), \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения.

Так как объем и плотность обратно пропорциональны друг другу ( $P_1/P_2 = V_2/V_1$ ), то можно записать  $P_1 = P_2(1 + \beta\Delta t)$ . Отсюда получаем зависимость

$$P_2 = P_1 / (1 + \beta\Delta t). \quad (7)$$

Формула (7) справедлива для твердых тел. В этом случае величину  $\beta$  следует заменить на  $3\alpha$  (где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения), а  $P$  – на среднюю плотность композиционного материала  $\gamma$ . Тогда формулу (7) можно записать в виде

$$\gamma_2 = \gamma_1 / (1 + 3\alpha\Delta t). \quad (8)$$

Для определения средней плотности высокопрочного мелкозернистого песчаного бетона (ВМПБ)  $\gamma_2$  необходимо определить значение  $\Delta t$ . Его находят из уравнения обжатого твердого тела в силу структурной неразличимости структурной плотности ВМПБ [8]:

$$F = ES \left\{ 1 - \frac{l}{l_0} \left[ + \alpha (T - T_0) \right] \right\}, \quad (9)$$

где  $F$  – обобщенная сила обжатия, Н;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$S$  – площадь поперечного сечения стержня, см<sup>2</sup>;

$l$  – длина стержня, см.

В дальнейшем будем считать для плотного стержня величины  $E$  и  $\alpha$  постоянными, а  $T - T_0 = \Delta t$ . Раскрывая скобки в формуле (9), получаем:

$$F = ES \left( 1 - \frac{l}{l_0} - \alpha \frac{l}{l_0} \Delta t \right), \quad (10)$$

где  $l/l_0$  – отношение, близкое к единице.

Сила  $F$ , отнесенная к площади  $S$ , означает удельное давление формирования песчано-цементной смеси:  $F/S = P_{уд}$ . Тогда формула (10) примет вид

$$P_{уд} = -E\alpha \Delta t, \quad (11)$$

следовательно,

$$\Delta t = -P_{уд} / (E\alpha). \quad (12)$$

Подставляя  $\Delta t$  в уравнение (8), получаем среднюю плотность песчаного бетона:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1}{1 - \frac{3P_{\text{уд}}}{E}}. \quad (13)$$

По выражению (13) при известных  $\gamma_1$ ,  $P_{\text{уд}}$ ,  $E$  можно вычислить среднюю плотность высоконаполненной цементно-песчаной смеси во влажном состоянии, уплотненной под удельным давлением  $P_{\text{уд}} = 0,0131$  МПа. Это значение  $P_{\text{уд}}$  было получено автором расчетным путем и подтверждено экспериментально:

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{2050}{1 - \frac{3 \cdot 0,131}{2,5E}} = \frac{2050}{1 - 0,1572} \approx 2432 \text{ кг/м}^3.$$

Средняя плотность ВМПБ в воздушно-сухом состоянии  $\gamma = 2332 \text{ кг/м}^3$ .

Из работы [3] известно, что увеличение удельного объема структурной единицы модели кластера нижнего масштабного уровня можно объяснить изменением среднего числа молекул в структурной единице за счет изменения расстояния между молекулами или между твердыми частицами наполнителя в более высоком масштабном уровне, вплоть до дискретных блоков (рис. 1, *a*). При продолжительном механическом воздействии (вибрации) первоначальные структуры могут быть нарушены и доведены до упорядоченной решетчатой структуры с расстоянием между частицами  $2h_0$  (рис. 1, *б*). Использование разночастотной вибрации ( $f = 47$  Гц и  $f = 167$  Гц) позволит уменьшить толщину двухслойной сферы цементной пленки менее чем на 1,4 мкм [2] (рис. 1 *в*, *г*). При этом повышается плотность матричной системы за счет проникновения граничных слоев матрицы смежных частиц кварцевого наполнителя, возрастает контакт частиц, физическая адсорбция и хемосорбция. Более плотная структура КМ вызывает увеличение поверхностного контакта, эффективную передачу внешнего усилия на все частицы

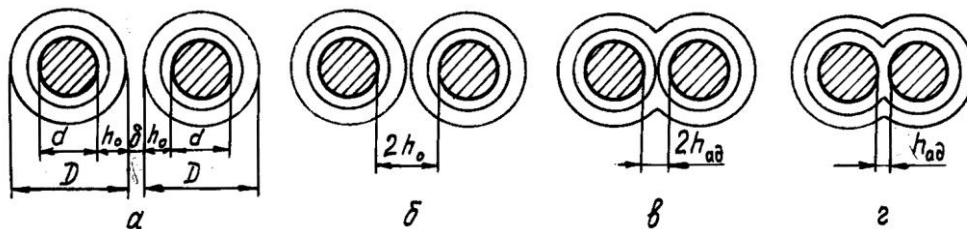
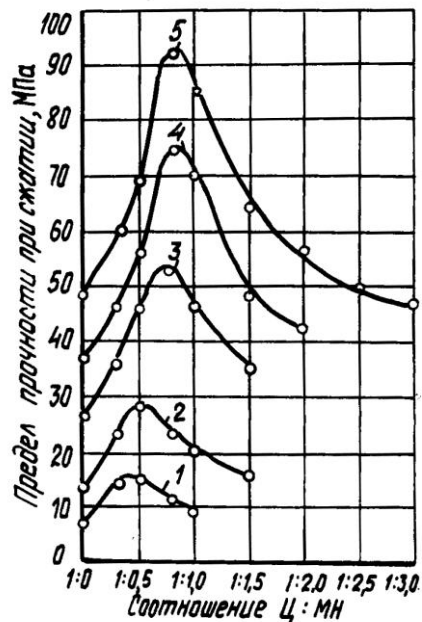


Рис. 1. Модели взаимодействия двух частиц наполнителя через граничные слои матрицы: *a* – в рыхлосвязном состоянии; *б* – прессованном; *в* – вибропрессованном; *г* – поливибропрессованном;  $h_0$  – проникаемые оболочки сферы из цементной пленки;  $\delta$  – расстояние дальнего действия частиц наполнителя;  $d$  – диаметр частиц наполнителя;  $D$  – диаметр частиц наполнителя со сферой из двух слоев;  $h_{\text{ад}}$  – толщина адсорбционного слоя

Рис. 2. Влияние механического воздействия виброуплотнения цементно-песчаной смеси на структурную прочность мелкозернистого песчаного бетона с наполнителем при расходе цемента  $306 \text{ кг/м}^3$ : 1 – уплотнение без пригрузки; 2 – с пригрузкой при  $P_{\text{уд}} = 0,0036 \text{ МПа}$ ; 3 – то же при  $P_{\text{уд}} = 0,0131 \text{ МПа}$ ; 4 – разночастотное виброуплотнение с  $P_{\text{уд}} = 0,0131 \text{ МПа}$ ; с отдельным вводом наполнителя и цемента; 5 – то же при совместном вводе наполнителя и цемента при их помоле при удельной поверхности  $S_{\text{уд}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$



наполнителя при полном смачивании их цементной матрицей. Этим можно объяснить усиливающееся сопротивление КМ разрушению от внешней нагрузки и рост прочности материала при оптимальной объемной концентрации наполнителя в структуре песчаного бетона (рис. 2). Жесткий структурный каркас с наполнителем улучшает физико-механические свойства композита.

Увеличение содержания наполнителя в матрице вяжущего при малом расходе последнего ( $306 \text{ кг/м}^3$ ) приводит к снижению прочностных свойств – разупрочнению структуры бетона. Это объясняется недостаточным содержанием связующего из цементного теста. Пленочная матрица перфорированно покрывает поверхность наполнителя с образованием пористого пространства в структуре композита. Уменьшается объем структурных связей между частицами наполнителя, наблюдается их неравномерное распределение по объему, что приводит к внутренним напряжениям и снижению прочности композита.

Спадающая ветвь прочностных значений сверх оптимальной концентрации наполнителя (рис. 2) наблюдается независимо от величины и способа уплотняющего воздействия цементно-песчаной смеси. Со снижением удельного давления на смесь оптимальная концентрация наполнителя в матрице вяжущего при одном и том же его расходе ( $306 \text{ кг/м}^3$ ) уменьшается и при гравитационном формовании составляет 25 ... 30 % от объемной доли матрицы КМ. При разночастотном виброуплотнении смеси и  $P_{\text{уд}} = 0,0131 \text{ МПа}$  концентрация наполнителя составила 80 %.

Использование в технологии получения мелкозернистого песчаного бетона таких факторов, как высокое наполнение цементной матрицы дисперсными частицами кварцевого песка и разночастотное виброуплотнение смеси при формировании оптимальной структуры мелкозернистого композита, улучшает физико-механические характеристики материала.

В индивидуальном производстве плит тяжелый цементный бетон на щебне можно заменить высоконаполненным мелкозернистым песчаным бетоном высокой прочности, особенно при строительстве kolejных сборно-разборных лесовозных дорог в районах с суровыми климатическими условиями.

Предварительные исследования конструкций дорожных плит из этого материала показали, что под воздействием колесных нагрузок, приложенных к углу и вдоль крайних зон плит колесопровода автопоезда МАЗ-509А+ГКБ-9383, равных для автомобиля-тягача  $P_1 = 32,5$  и  $P_2 = 89,18$  кН и прицепа-ропуса  $P_4 = P_5 = 61,75$  кН при использовании коэффициентов динамичности  $K_d = 1,3$  и перегрузки  $K_{пер} = 1,4$ , плиты размером  $3,0 \times 1,5 \times 0,16$  м выдерживают расчетные напряжения от отрицательных моментов  $M_y = -88,8$  кН·м с увеличением армирования сечения плит до 1,1% при конструктивном армировании 0,1 %.

Геометрические размеры плит ( $3,0 \times 1,5 \times 0,16 \dots 3,0 \times 1,5 \times 0,08$  и  $3,0 \times 1,0 \times 0,16$  м) оказывают влияние на расчетные значения изгибающих моментов, положительных и отрицательных осадок, армирование, давление плит на грунтовое основание. Чем меньше толщина плиты и ее ширина, тем выше отрицательные осадки (отрыв угла плит от грунтового основания) и все указанные выше расчетные значения.

При строительстве kolejных лесовозных автомобильных дорог для исключения отрыва углов (5 ... 7 см) первых въездных плит колесопровода необходимо предусмотреть их закрепление в грунтовом основании.

В табл. 1 представлены расчетные значения показателей напряженно-деформированного состояния первых въездных плит левого и правого колесопровода kolejного покрытия лесовозной автомобильной дороги в зависимости от толщины плит, имеющих размеры в плане  $3,0 \times 1,5$  м.

Данные, полученные по программе «OL PLATE»: «Расчет железобетонных фундаментных плит на грунтовом основании» говорят о том, что прочность и армирование плит представленных размеров удовлетворяют требованиям, предъявляемым к строительству kolejных покрытий лесовозных автомобильных дорог. В табл. 2 приведены основные расчетные характеристики напряженно-деформированных плит kolejного покрытия в зависимости от воздействий колесных нагрузок автопоезда МАЗ-509А+ГКБ-9383 при  $E_0 = 31 \cdot 10^3$  МПа; расчетных нагрузках с первой



Таблица 2

Серия расчетной схемы (код)	Размер плит, м	Зона приложения нагрузки $P_2$	Среднее давление плиты на грунтовое основание, кПа	Средний расход арматуры на 1 км колейного покрытия, т	Расход бетона на 1 км колейного покрытия, м <sup>3</sup>	Площадь покрытия из плит, м <sup>2</sup>
KR-1	3,0×1,5×0,16	Посередине	132	16,11	477,8	3000
KR-2	3,0×1,5×0,16	В продольном торце по середине	138	16,83	477,8	3000
KR-4	3,0×1,5×0,16	То же	134	16,28	477,8	3000
KR-5	3,0×1,5×0,16	В углу плиты	133	16,33	477,8	3000
SKP-11	3,0×1,5×0,14	То же	128	13,78	422,3	3000
SP-11	3,0×1,5×0,10	»	130	10,72	300,0	3000
SP-12	3,0×1,5×0,08	»	133	9,4	239,0	3000

входной плиты  $P_{4,5} = 61,75$  кН;  $P_2 = 89,18$  кН;  $P_1 = 32,5$  кН. Эти данные позволяют констатировать возможность использования мелкозернистого песчаного бетона высокой прочности в строительстве сборных покрытий автомобильных дорог.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрышев А.Н. и др. Эффект усиления свойств в дисперсно-наполненных композитах /А.Н. Бобрышев, В.И. Калашников, Д.В. Квасов и др. // Строительство и архитектура. – 1996. – № 2. – С. 48–52. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Бобрышев А.Н. и др. Синергетика композиционных материалов /А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Л.О. Бабин, В.И. Соломатов // Липецк: НПО «Ориус», 1994. – 153 с.
3. Бредихин В.В. Параметр Грюнайзена и локальный порядок в композиционных материалах // Строительство и архитектура. – 1997. – № 1–2. – С. 32–36. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Каримов И.Ш. Тонкодисперсные минеральные наполнители в составах цементных композиций: Дис... канд. техн. наук. – СПб., 1996.
5. Краснов А.М. Влияние поливибрационного уплотнения и микронаполнителя песчаной бетонной смеси на физико-механические характеристики // Совершенствование автомобильных дорог и искусственных сооружений на Северо-Западе РСФСР: Межвуз. тематич. сб. тр. / ЛИСИ. – Л., 1987. – С. 28–134.
6. Краснов А.М. Поливибрационный высокопрочный песчаный бетон // Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях: Тез. докл. респ. НТК. – СПб., 1995. – С. 152–155.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
8. Румер Ю.Б., Рывкин М.С. Термодинамика, статическая физика и кинематика. – М.: Наука. 1977. – 552 с.



9. Соломатов В.И., Бредихин В.В. Влияние полиструктурности цементного камня на эффективность термообработки бетона // Строительство. – 1995. – № 1. – С. 41–45. – (Изв. высш. учеб. заведений).

10. Соломатов В.И., Бредихин В.В. О силах взаимодействия в дисперсной системе // Строительство и архитектура. – 1996. – № 3. – С. 49–52. – (Изв. высш. учеб. заведений).

11. Соломатов, В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. Интенсивная технология бетонов. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 260.

12. Чернышев, Е.М., Дзяченко Е.Д. Силовые взаимодействия в структуре строительных композитов – фундаментальная проблема их материаловедения и технологии // Строительство и архитектура. – 1996. – № 3. – С. 43–48. – (Изв. высш. учеб. заведений).

13. Knopoff L., Shapiro J.N. Gruneisen parameter for liquids // Phys. Rev. B: Solid State. – 1970. – Vol. 1, N 10. – P. 3893–3895.

14. Shen M. Gruneuse function of semicrystalline polymers // Polymer Engng. Sei. – 1979. – Vol. 19, N 4. – P. 995–999.

Марийский государственный  
технический университет

Поступила 16.01.03

*A.M. Krasnov*

### **On Use of Fine-aggregate Sandy Concrete in Construction of Pre-cast Coating of Motor Roads**

Two principles of forming structure of high-strength sandy concrete are provided. Rated forces of deformation road slabs for forest truck roads providing operational life of constructions are presented.

---