УДК 691

А.П. Пустовгар, Е.В. Королев
НИУ МГСУ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ С НЕЛИНЕЙНЫМ ОТКЛИКОМ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Аннотация. Рассмотрены научные подходы к проектированию многокомпонентных композиций, предназначенных для работы в условиях динамических воздействий. Предложена модель композиции и проведен ее анализ. На основе анализа установлены рецептурные параметры рассматриваемых композиций. Определены требования к дисперсной и жидкой фазам. Показано, что на прочность рассматриваемых композиций оказывает влияние взаимная компенсация зависимостей количества и прочности контактов от диаметра частиц дисперсной фазы. Отмечено, что формирование точечного контакта происходит при объединении слоев жидкой фазы, окружающих контактирующие частицы дисперсной фазы. Выявлены характеристики компонентов, которым следует отдавать предпочтение при выборе дисперсной и жидкой фаз многокомпонентных композиций.

Ключевые слова: многокомпонентные композиции, дисперсная, фаза, жидкая фаза, нелинейный отклик на динамическое воздействие, плотность упаковки частиц, поверхностное натяжение, вязкость

DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.68-77

Строительные композиции с нелинейным откликом на динамическое внешнее воздействие — многокомпонентные композиции, содержащие дисперсную и жидкую фазы, в состав которых функционально входят вещества, придающие композиции необходимые свойства, обусловленные ее назначением (областью применения). В сущности, такие композиции в обычных условиях эксплуатации являются механическими смесями, свойства которых в основном аддитивно зависят от содержания и индивидуальных свойств компонентов:

$$I_j = \sum_k n_k i_k,$$

где I_j — свойство композиции; n_k — объемная доля i-го компонента; i_k — индивидуальное свойство i-го компонента; k — количество компонентов в композиции.

При динамических воздействиях свойства таких композиций изменяются нелинейно, что в основном является следствием проявления неньютоновского характера течения жидкой фазы композиции. Несмотря на простоту таких композиций, при разработке их рецептур необходимо решить ряд задач, связанных с обоснованием выбора как вида компонентов, так и их характеристик. Ближайшими аналогами таких материалов являются каркасные композиционные материалы [1–5].

Модель композиции и ее анализ. Оценку качества сформировавшейся структуры таких композиций целесообразно производить аналогично оценке качества структуры композиционных материалов, т.е. по их прочности. В первом приближении модель рассматриваемых композиций можно представить

© Пустовгар А.П., Королев Е.В., 2016

как совокупность сферических частиц с диаметром d_f, покрытых слоем жидкой фазы толщиной h и уложенных в представленном объеме в массив с плотностью упаковки частиц η_f. В областях пересечения слоев жидкой фазы соседних частиц будет формироваться контакт (рис. 1), имеющий прочность, равную f_c. В первом приближении прочность такой композиции можно описать уравнением П.А. Ребиндера [6]:

$$R = \gamma f_c N_c^{2/3},$$

где γ — безразмерный коэффициент; f_c — прочность единичного контакта; N_c — количество контактов.

В [7] предложено решение, которое можно применить при условии обеспечения формирования в зонах контакта частиц менисков жидкой фазы. После некоторых преобразований решение, предложенное в [7], имеет вид:

$$f_c = \sigma\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right) + \frac{4\sin(\varphi+\theta)}{d_f \sin(\varphi)}\right],$$

где σ — поверхностное натяжение жидкой фазы;

$$r_1 = \frac{d_f}{2}\sin(\varphi) - \left[\frac{d_f}{2}\left(1-\cos(\varphi)+\frac{h}{2}\right)\right]\left(\frac{1-\sin(\varphi+\theta)}{\cos(\varphi+\theta)}\right);\ \varphi = \arccos\left(\frac{d_f+h}{d_f+2h}\right);$$

$r = \dfrac{2d_f\left(1-\cos(\varphi)\right)+h}{4\cos(\varphi+\theta)}$; θ — краевой угол смачивания жидкой фазой частиц дисперсной фазы.

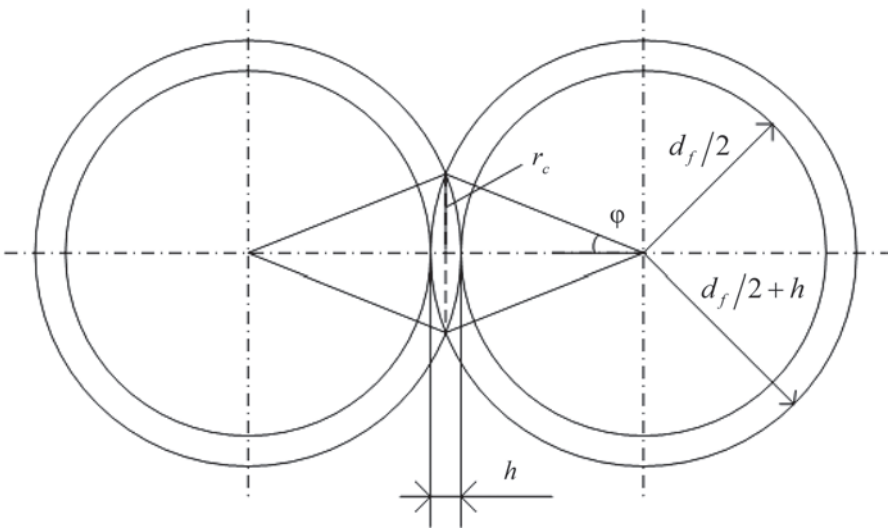


Рис. 1. Модель формирования единичного контакта

При условии изготовления композиции посредством полного покрытия частиц жидкой фазой указанное решение не применимо. При формировании контакта, приведенного на рис. 1, в первом приближении f_c можно получить из уравнения

$$2\pi\sigma r_c^2 = F_c l,$$

где r_c — радиус площади контакта; l — расстояние, при котором действием сил межмолекулярного притяжения можно пренебречь.

С учетом геометрических характеристик модели прочность контакта f_c равна

$$f_c = \frac{\pi}{2k} \frac{\sigma\left(d_f + 2h\right)^2}{\sqrt[3]{\frac{M}{\rho_m N_o}}} \sin^2(\varphi),$$

где M — молярная масса жидкой фазы; ρ_m — плотность жидкой фазы; N_o — число Авогадро; k — коэффициент, характеризующий уменьшение сил межмолекулярного притяжения:

$$k = \frac{U\left(r_0\right)}{U\left(r\right)} = \sqrt[6]{\varepsilon^{-1}},$$

здесь $U(r)$ — энергия притяжения $U\left(r\right) = -A/r^6$, где A — константа; r — расстояние; ε — заданная величина, $\varepsilon << 1$.

При прочих равных условиях прочность контакта зависит от диаметра частицы дисперсной фазы и толщины оболочки жидкой фазы (рис. 2).

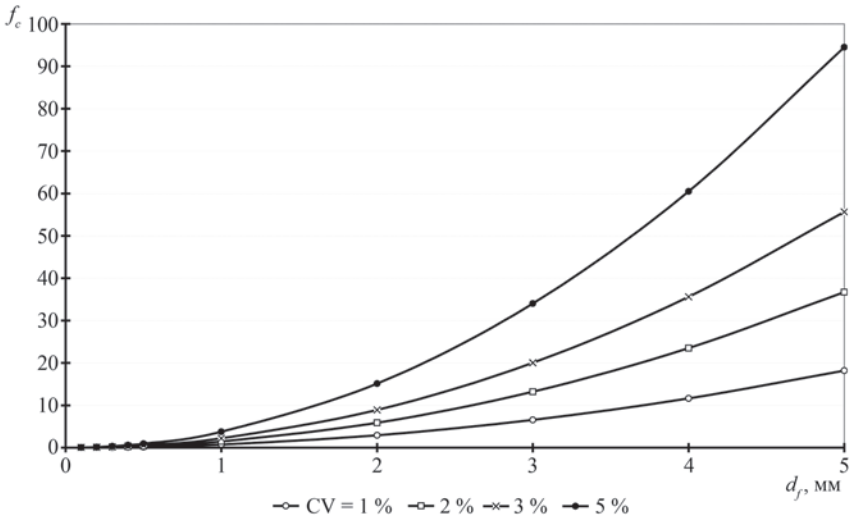


Рис. 2. Зависимость прочности контакта от геометрических характеристик модели (для расчета принято: ε = 0,001 %; M = 0,018 кг/моль; ρ_m = 1000 кг/м^3; σ = 72,72 мПа/м)

Очевидно также, что указанное формирование контакта возможно только до определенного значения угла φ^*. Принято, что $\varphi^* \le 15°$.

Количество контактов N_c безусловно зависит от величины координационного числа, которое характеризует плотность упаковки частиц в объеме, и для частиц неправильной формы может быть представлено числом Ньютона $N(F)$ [8]. В первом приближении (без учета количества частиц, расположенных на поверхности изделия) количество контактов равно

$$N_c = N_f N(F) = \frac{6\nu_f}{\pi d_f^3} V_o N(F),$$

где N_f — количество частиц дисперсной фазы; ν_f — объемная доля дисперсной фазы в объеме V_o; d_f — диаметр частиц дисперсной фазы.

Зависимость количества контактов от диаметра частиц имеет характеристическую точку (рис. 3), указывающую на изменение скорости $N_c = f(d_f)$.

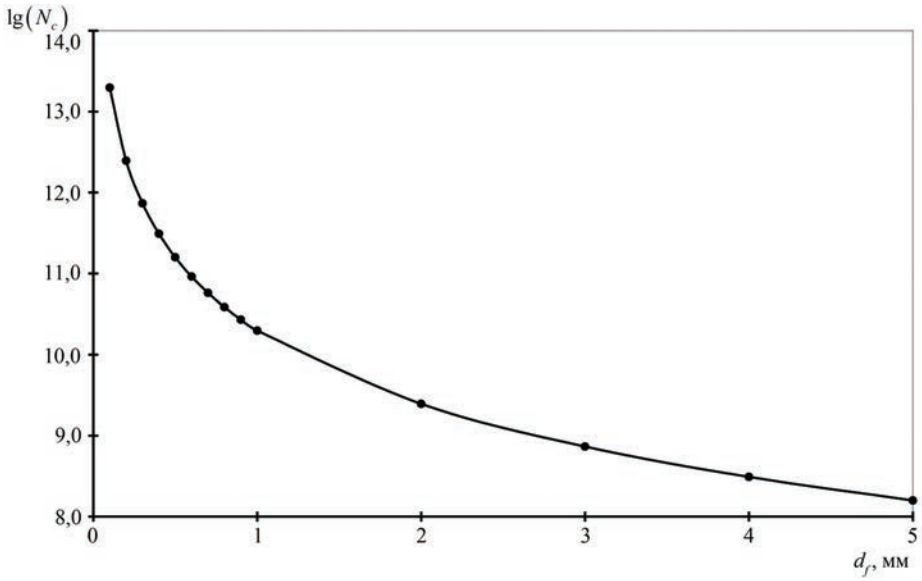


Рис. 3. Зависимость $N_c = f(d_f)$

С применением полученных формул для f_c и N_c запишем общее уравнение прочности рассматриваемых композиций:

$$R = \gamma C_N C_F \left(1 + \frac{2h}{d_f}\right)^2 \sin^2(\varphi),$$

где $C_F = \frac{\pi\sigma}{2k}\left(\frac{M}{\rho_m N_o}\right)^{-1/3}$; $C_N = \left(\frac{6\nu_f}{\pi} V_o N(F)\right)^{2/3}$.

Из последней формулы следует, что в соответствии с принятой моделью прочность рассматриваемых композиций практически не зависит от диаметра частиц дисперсной фазы и в существенной мере зависит от содержания жидкой фазы (рис. 4).

На основе полученных уравнений и проведенного анализа произведем установление рецептурных параметров рассматриваемых композиций.

Выбор параметров компонентов композиции. Безусловно, химический и фазовый составы основных компонентов (дисперсной и жидкой фаз) определяются областью применения композиции [9, 10]. Разработанная модель позволяет установить требования только к некоторым параметрам рецептур таких композиций.

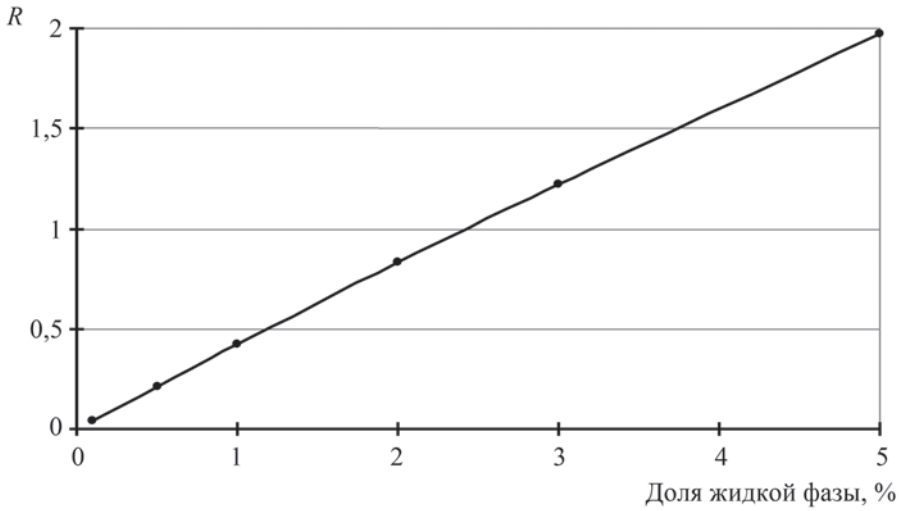


Рис. 4. Зависимость $R = f\left(C_V\right)$

Размер частиц дисперсной фазы. Как было показано ранее, прочность рассматриваемых композиций слабо зависит от крупности частиц дисперсной фазы вследствие взаимной компенсации зависимостей количества и прочности контактов от диаметра частиц (см. рис. 2 и 3). Однако было отмечено, что зависимость $N_c = f\left(d_f\right)$ имеет характеристическую точку, условно разделяющую указанную зависимость на два участка: участок с быстрым и медленным ростом N_c. Характеристическая точка является некоторым компромиссом при выборе d_f между числом контактов и способностью к технологической переработке смеси. Последнее можно оценить по продолжительности технологической операции нанесения жидкой фазы

$$t_{\text{н}} = \frac{S_f}{\vartheta_S} = \frac{3}{2}\frac{\nu_f}{d_f \vartheta_S} V_o,$$

где S_f — площадь поверхности всех частиц дисперсной фазы; ϑ_S — скорость нанесения жидкой фазы на единицу площади поверхности частиц.

Очевидно, что характер зависимости $t_{\text{н}} = f\left(d_f\right)$ аналогичен зависимости $N_c = f\left(d_f\right)$. По данным, приведенным на рис. 3, абсцисса характеристической точки (компромиссный диаметр частицы дисперсной фазы), определенная по методике [11], равна $d_f^* = 0{,}4$ мм.

Содержание жидкой фазы. Для удобства проведения рецептурных расчетов содержание жидкой фазы целесообразно определять по формуле

$$C_V = \frac{V_m}{V_f} = \frac{3}{2}\left(\frac{h}{d_f}\right) \text{ или } C_V = C_m \frac{\rho_f}{\rho_m},$$

где $C_m = M_m / M_f$; M_f, M_m — соответственно, массы жидкой и дисперсной фазы; ρ_m, ρ_f — соответственно, плотность жидкой и дисперсной фазы.

Максимальная величина h/d_f определится максимальным значением φ:

$$\left(\frac{h}{d_f}\right)_{\max} = \frac{1-\cos\left(\varphi^*\right)}{2\cos\left(\varphi^*\right)-1}.$$

Используя представленные формулы, получим

$\left(h/d_f\right)_{\max} = 0{,}037$ и $C_{V,\max} = 5{,}48$ %.

Основные требования к жидкой фазе. Установление требований к жидкой фазе носит в основном эмпирический характер.

1. Формирование точечного контакта происходит при объединении слоев жидкой фазы, окружающих контактирующие частицы дисперсной фазы. Отсюда очевидным условием, которое должно быть установлено в отношении жидкой фазы, является смачивание поверхности частиц дисперсной фазы, т.е. $\theta << 90°$.

2. В формуле для определения прочности композиций величина коэффициента C_F прямо пропорционально зависит от поверхностного натяжения и обратно пропорционально молярному объему жидкой фазы. Зависимость поверхностного натяжения жидкости и молярного объема была предложена Этвешом [12]:

$$\sigma V_m^{2/3} = K\left(T_c - T\right),$$

где K — константа, равная для неассоциированных жидкостей $k = 2{,}12$; T_c — критическая температура.

Из последнего уравнения следует, что предпочтения следует отдавать жидкостям с высоким поверхностным натяжением и малым молярным весом.

3. При эксплуатации различных объемных изделий, изготовленных из рассматриваемых композиций, закономерно будет возникать расслоение вследствие стекания жидкой фазы под действием гравитации. Поэтому жидкая фаза должна обладать высокой вязкостью, а также проявлять неньютоновский характер течения, который определяет нелинейное изменение свойств композиции при внешнем динамическом воздействии [13].

4. Дополнительными требованиями, обеспечивающими высокие эксплуатационные свойства, являются низкая летучесть (высокая температура кипения) и гидрофобность.

Очевидно, что многие из указанных требований зависят исключительно от природы вещества жидкой фазы, и их выполнение осуществляется посредством выбора из группы веществ, соответствующих первичным требованиям. В рассматриваемом случае таким требованием является гидрофобность, т.е. выбор вещества жидкой фазы необходимо осуществлять из группы гидрофобных веществ и только затем по максимальной температуре испарения, поверхностному натяжению и молярной массе. Регулирование вязкости может быть осуществлено посредством наполнения жидкой фазы высокодисперсными частицами функциональных соединений, которые дополнительно усиливают неньютоновский характер течения жидкой фазы и функциональные свойства композиции. В [14] предложена зависимость для определения вязкости дисперсных систем:

$$\frac{\mu}{\mu_o} = 1 + 10c_l\left(\frac{L}{d_l}\right)^2 + 27{,}84c_l^2\left(\frac{L}{d_l}\right)^4,$$

где μ_o — вязкость дисперсионной среды; c_l — объемная доля частиц; L и d_l — длина и диаметр частицы.

Из представленного уравнения видно, что при прочих равных условиях преимущество имеют частицы в виде волокон. Очевидно, что величины c_l и L/d_l взаимозависимы. При хаотической ориентации волокон в жидкой фазе (указанное является наиболее вероятным) в [15] предложена зависимость для определения объемной доли волокон:

$$c_l = \frac{3}{2}\eta_l n_l^3\left(\frac{d}{L}\right)^2,$$

где n_l — константа, равная соотношению длины волокна и диаметра сферы d_{sf}, в которой располагается волокно: $L = n_l d_{sf}$; η_l — максимальная плотность упаковки сфер, в которых располагаются волокна.

Уравнение для определения вязкости с учетом последнего уравнения преобразуется к виду:

$$\frac{\mu}{\mu_o} = 1 + 15\eta_l n_l^3 + 62{,}64\eta_l^2 n_l^6.$$

При $n_l = 1$ ($L = h$; естественно принять, что толщина прослойки жидкой фазы на поверхности частиц h) и $\eta_l = 0{,}74$ вязкость жидкой фазы будет равна $\mu = 46{,}4\mu_o$ (при $n_l = 2$ вязкость значительно возрастает: $\mu = 2285\mu_o$). При заданных геометрических характеристиках волокон вычисляется их объемная доля в жидкой фазе композиции:

$$c_l = 1{,}11\left(\frac{L}{d_l}\right)^{-2}.$$

Определение расхода волокон осуществляется традиционным расчетом с учетом объема жидкой фазы в композиции [16].

Таким образом, установлены основные требования к компонентам композиций, обладающим нелинейным изменением свойств при динамических внешних воздействиях. Показано, что компромиссный диаметр частиц дисперсной фазы композиции равен 0,4 мм; максимальное объемное содержание жидкой фазы композиции — 5,48 %; жидкая фаза должна хорошо смачивать дисперсную фазу, обладать гидрофобностью, высокой температурой кипения, высокими поверхностным натяжением и вязкостью. Регулировать вязкость рационально посредством введения волокон, длина которых не превышает толщину прослойки жидкой фазы на поверхности частиц дисперсной фазы композиции. Это позволяет существенно повысить вязкость жидкой фазы и усилить характеристики неньютоновского характера ее течения, а следовательно, и функциональные характеристики таких композиций.

Библиографический список

1. *Ицкович С.М.* Крупнопористый бетон : технология и свойства. М. : Стройиздат, 1977. 119 с. (Наука — строительному производству)

2. *Селяев В.П., Соломатов В.И., Ерофеев В.Т.* Композиционные строительные материалы каркасной структуры. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1993. 167 с.

3. *Ерофеев В.Т., Мищенко Н.И., Селяев В.П., Соломатов В.И.* Каркасные строительные композиты : в 2 ч. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1995. Ч. 1: Структурообразование. Свойства. Технология. 199 с. ; Ч. 2: Химическое и биологическое сопротивление. Долговечность. 371 с.

4. *Королев Е.В., Соколова Ю.А., Королева О.В.* Радиационно-защитные серные бетоны каркасной структуры. М. : Палеотип, 2009. 192 с.

5. *Королев Е.В., Баженов Ю.М., Смирнов В.А.* Строительные материалы вариатропно-каркасной структуры. М. : МГСУ, 2011. 303 с. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ)

6. Физико-химическая механика дисперсных структур : сб. ст. / под ред. П.А. Ребиндера М. : Наука, 1966. 400 с.

7. *Гегузин Я.Е.* Физика спекания. М. : Наука, 1967. 360 с.

8. *Яглом И.М.* Проблема тринадцати шаров. Киев : Вища школа, 1975. 85 с.

9. *Алдошин С.М., Бадамшина Э.Р., Грищук А.А., Тарасов А.Е., Эстрин Я.И., Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Курменев Д.В., Пустовгар А.П.* Исследование влияния способов диспергирования одностенных углеродных нанотрубок на свойства нанокомпозитов на основе эпоксидной смолы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 96–101.

10. *Кузнецов Е.О., Пустовгар А.П., Нефедов С.В.* Тонкомолотые наполнители silverbond в гипсовых сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 52–53.

11. *Королев Е.В., Прошин А.П., Соломатов В.И.* Серные композиционные материалы для защиты от радиации / под общ. ред. В.И. Соломатова. Пенза : ПГАСА, 2001. 209 с.

12. *Адам Н.К.* Физика и химия поверхностей / пер. с англ. Д.М. Толстого; под ред. проф. А.С. Ахматова. М. ; Л. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. 552 с.

13. *Захаров В.А., Пустовгар А.П.* Реология строительных растворов для механизированного нанесения // Строительные материалы. 2008. № 2. С. 8–9.

14. Реология. Теория и приложения / под ред. Ф. Эйриха ; пер. с англ.; под общ. ред. Ю.Н. Работнова, П.А. Ребиндера. М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. 824 с.

15. *Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А.* Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы. М. : Палеотип, 2006. 272 с.

16. *Пустовгар А.П., Пашкевич С.А., Нефедов С.В.* Повышение эффективности дисперсного армирования бетонов // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : науч. тр. III Всеросс. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону (г. Москва, 12–16 мая 2014 г.): в 7 тт. М. : МГСУ, 2014. С. 57–63.

Поступила в редакцию в августе 2016 г.

Об авторах: **Пустовгар Андрей Петрович** — кандидат технических наук, профессор, проректор по научной работе, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, PustovgarAP@mgsu.ru;

Королев Евгений Валерьевич — доктор технических наук, профессор, советник РААСН, директор научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», проректор, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 188- 04-00, KorolevEV@mgsu.ru.

Для цитирования: *Пустовгар А.П., Королев Е.В.* Строительные композиции с нелинейным откликом на динамическое внешнее воздействие // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 68–77. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.68-77

A.P. Pustovgar, E.V. Korolev

BUILDING STRUCTURES WITH NONLINEAR RESPONSE TO EXTERNAL DYNAMIC LOADING

Abstract. Construction compositions having nonlinear response to dynamic loading are compound compositions possessing disperse and liquid phases. They functionally comprise agents which give the composition the required properties depending on its aim and field of application. Under dynamic loadings such compositions are nonlinearly changed. Though such compositions are quite simple it is necessary to solve a number of tasks when developing their formula.

The article considers scientific approaches to design of compound compositions aimed for operation under dynamic loadings. A composition model is proposed and analyzed. Basing on the analysis the formula parameters of the considered compositions are specified. The requirements to disperse and liquid phases are determined. The authors showed that the cancellation of the dependencies of quantity and strength on contacts from the diameter of disperse phase particles influences the strength of the considered compositions. It is noted that spot contact is formed when the layers of liquid phase which surround the contacting particles of the disperse phase merge. The features of the components are specified. The considered features should be preferred when choosing the disperse and liquid phases of compound compositions.

Key words: compound compositions, disperse phase, liquid phase, nonlinear response to dynamic load, component density, surface tension, viscosity

References

1. Itskovich S.M. *Krupnoporistyy beton : tekhnologiya i svoystva* [No-Fine Concrete : Technology and Properties]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977, 119 p. (Nauka — stroitel'nomu proizvodstvu [Science — to Construction]) (In Russian)

2. Selyaev V.P., Solomatov V.I., Erofeev V.T. *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy karkasnoy struktury* [Composite Building Materials with Frame Structure]. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 1993, 167 p. (In Russian)

3. Erofeev V.T., Mishchenko N.I., Selyaev V.P., Solomatov V.I. *Karkasnye stroitel'nye kompozity* [Frame Building Composites]. In two volumes. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 1995, part 1: Strukturoobrazovanie. Svoystva. Tekhnologiya [Structure Formation. Properties. Technology]. 199 p. ; part 2: Khimicheskoe i biologicheskoe soprotivlenie. Dolgovechnost' [Chemical and Biological Resistance. Durability]. 371 p. (In Russian)

4. Korolev E.V., Sokolova Yu.A., Koroleva O.V. *Radiatsionno-zashchitnye sernye betony karkasnoy struktury* [Radiation-Protective Sulfur Concrete with Frame Structure]. Moscow, Paleotip Publ., 2009, 192 p. (In Russian)

5. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Smirnov V.A. *Stroitel'nye materialy variatropno-karkasnoy struktury* [Construction Materials with Variable Density Frame Structure]. Moscow, MGSU Publ., 2011, 303 p. (Biblioteka nauchnykh razrabotok i proektov MGSU [Library of Research Results and Projects of MGSU]) (In Russian)

6. Rebinder P.A., editor. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur : sbornik statey* [Physical and Chemical Mechanics of Disperse Structures : Collection of Articles]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 400 p. (In Russian)

7. Geguzin Ya.E. *Fizika spekaniya* [Physics of Clinkering]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 360 p. (In Russian)

8. Yaglom I.M. *Problema trinadtsati sharov* [Problem of Thirteen Spheres]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1975, 85 p. (In Russian)

9. Aldoshin S.M., Badamshina E.R., Grishchuk A.A., Tarasov A.E., Estrin Ya.I., Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Kurmenev D.V., Pustovgar A.P. Issledovanie vliyaniya sposobov

dispergirovaniya odnostennykh uglerodnykh nanotrubok na svoystva nanokompozitov na osnove epoksidnoy smoly [Investigation of Dispersal Methods Influence of Single-Wall Carbon Nanotubes on the Properties of Nanocomposites on the Basis of Epoxy]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2015, no. 3, pp. 96–101. (In Russian)

10. Kuznetsov E.O., Pustovgar A.P., Nefedov S.V. Tonkomolotye napolniteli silverbond v gipsovykh sukhikh stroitel'nykh smesyakh [Floured Fillers Silverbond in Dry Gypsum Construction Mixes]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2010, no. 12, pp. 52–53. (In Russian)

11. Korolev E.V., Proshin A.P., Solomatov V.I. *Sernye kompozitsionnye materialy dlya zashchity ot radiatsii* [Sulphur Composite Materials for Radiation Shielding]. Penza, PGASA Publ., 2001, 209 p. (In Russian)

12. Adam N.K. The Physics and Chemistry of Surfaces. Oxford University Press, 1944.

13. Zakharov V.A., Pustovgar A.P. Reologiya stroitel'nykh rastvorov dlya mekhanizirovannogo naneseniya [Rheology of Mortars for Mechanical Application]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2008, no. 2, pp. 8–9. (In Russian)

14. Eirich F.R., editor. Rheology. Theory and Applications. Academic Press, 1967.

15. Korolev E.V., Proshin A.P., Bazhenov Yu.M., Sokolova Yu.A. *Radiatsionno-zashchitnye i korrozionno-stoykie sernye stroitel'nye materialy* [Radiation Protective and Corrosion Proof Sulphur Construction Materials]. Moscow, Paleotip Publ., 2006, 272 p. (In Russian)

16. Pustovgar A.P., Pashkevich S.A., Nefedov S.V. Povyshenie effektivnosti dispersnogo armirovaniya betonov [Increasing the Efficiency of Fiber-Reinforced Concretes]. Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee : nauchnye trudy, III Vserossiyskaya (II Mezhdunarodnaya) konferentsiya po betonu i zhelezobetonu (g. Moskva, 12–16 maya 2014 g.) [Concrete and Reinforced Concrete — Glance into the Future : scientific works, 3rd All-Russian (2nd International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete (Moscow, May 12–16, 2014)]. In 7 volumes. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 57–63. (In Russian)

About the authors: **Pustovgar Andrey Petrovich** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Vice Rector for Research, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; PustovgarAP@mgsu.ru; +7 (495) 739-03-14 (ext. 1338);

Korolev Evgeniy Valer'evich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor of RAACS, Director, Research and Educational Center "Nanomaterials and Nanotechnologies", Prorector, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KorolevEV@mgsu.ru; +7 (499) 188-04-00.

For citation: Pustovgar A.P., Korolev E.V. Stroitel'nye kompozitsii s nelineynym otklikom na dinamicheskoe vneshnee vozdeystvie [Building Structures with Nonlinear Response to External Dynamic Loading]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 11, pp. 68–77. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.68-77