

## Методика проектирования состава дисперсно-армированного серного материала

*С.А. Болтышев, И.Ю. Шитова*

*ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г.Пенза*

**Аннотация:** введение волокна в состав композита приводит к изменению структуры, свойств и технологии изготовления материала. В настоящей работе представлена методика расчета составов дисперсно-армированных серных материалов. Представлены формулы для определения суммарной поверхности частиц наполнителя и волокон; поверхности, количества и объема одного волокна; коэффициента армирования; объемной доли наполнителя; масс серы, наполнителя, волокон и модификаторов.

**Ключевые слова:** проектирование, сера, серный бетон, серная мастика, дисперсно-армированный материал, композит, наполнитель, волокно, оптимизация состава, объемная доля, коэффициент армирования, плотность, структура.

Анализ научно-технической литературы показал [1-9], что в открытой печати недостаточно сведений о способах проектирования составов дисперсно-армированных серных материалов.

Очевидно, что методы проектирования составов серных бетонов не могут быть использованы при проектировании составов серных дисперсно-армированных материалов, так как при проектировании рецептуры композиционного материала предполагается получение материала с определенной структурой, а как известно, структура такого композиционного материала, как бетон, имеет существенные отличия от структуры дисперсно-армированного материала.

Оптимизацию составов дисперсно-армированных материалов целесообразно проводить аналогично оптимизации таких композиционных материалов, как бетон, то есть проводить последовательную масштабную оптимизацию на двух уровнях: микроструктуры (структуры серной мастики) и макроструктуры (структуры материала, армированного волокнами). В результате оптимизации состава мастики получают оптимальную структуру материала [10-13]. Очевидно, что введение волокон приведет к увеличению

---

площади границы раздела фаз, к отклонению топологических параметров структуры мастики от оптимальных значений и, следовательно, к изменению свойств материала. Целесообразно предположить, что оптимизацию макроструктуры такого композита необходимо проводить при условии:

$$S_{\text{opt}} = S_f + S_{fl} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{opt}}$  – оптимальная поверхность раздела фаз;  $S_f$ ,  $S_{fl}$  – соответственно, суммарная поверхность частиц наполнителя и волокон.

Безусловно, условие (1) справедливо в достаточно узком диапазоне изменения количества волокнистого наполнителя, так как введение волокна приводит к изменению структуры, свойств и технологии изготовления материала.

Оптимальная поверхность раздела фаз равна:

$$S_{\text{opt}} = \frac{6\nu_{f,\text{opt}} \cdot V_o}{d_f}, \quad (2)$$

где  $\nu_{f,\text{opt}}$  – оптимальная объемная доля наполнителя в мастике;  $V_o$  – общий объем;  $d_f$  – диаметр частицы наполнителя.

Суммарная поверхность частиц наполнителя равна:

$$S_f = N_f \cdot \bar{S}_f = \frac{6\nu_f V_o}{\pi d_f^3} \cdot \pi d_f^2 = \frac{6\nu_f V_o}{d_f}, \quad (3)$$

где  $\nu_f$  – объемная доля наполнителя;  $N_f$  – количество частиц наполнителя;  $\bar{S}_f$  – поверхность одной частицы наполнителя.

Суммарную поверхность волокон определим:

$$S_{fl} = N_{fl} \cdot \bar{S}_{fl}, \quad (4)$$

где  $N_{fl}$  – число волокон;  $\bar{S}_{fl}$  – поверхность одного волокна.

Количество волокон равно:

$$N_{fl} = \frac{V_{fl}}{\bar{V}_{fl}}, \quad (5)$$

где  $V_{fl}$  – объем волокон;  $\bar{V}_{fl}$  – объем одного волокна:

$$V_{fl} = \frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} = \frac{(1 - \nu_f)\mu V_o \rho_s}{\rho_{fl}}; \quad (6)$$

здесь  $m_{fl}$  – масса волокон:  $m_{fl} = (1 - \nu_f)V_o \mu \rho_s$ ;  $\rho_{fl}$  – плотность волокон;  $\mu$  – коэффициент армирования композита, выраженный в % от массы серы;  $\rho_s$  – плотность серы.

Объем волокна определяется по геометрическим размерам:

$$\bar{V}_{fl} = \frac{\pi}{4} d_{fl}^2 l_{fl}, \quad (7)$$

где  $d_{fl}$ ,  $l_{fl}$  – соответственно, диаметр и длина волокна.

Подставляя выражения (7) и (6) в формулу (5), получим:

$$N_{fl} = \frac{4(1 - \nu_f)\mu V_o \cdot \rho_s}{\pi d_{fl}^2 \cdot l_{fl}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{fl}}. \quad (8)$$

Поверхность одного волокна приближенно равна:

$$\bar{S}_{fl} \approx \pi d_{fl} \cdot l_{fl}. \quad (9)$$

Подставляя формулы (8) и (9) в выражение (4), получим:

$$S_{fl} = \frac{4(1 - \nu_f)\mu V_o \cdot \rho_s}{d_{fl}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{fl}}. \quad (10)$$

По Ромуальди число волокон в единице объема равно:

$$n_{fl} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_o F}{f_a}, \quad (11)$$

где  $F$  – площадь сечения образца материала;  $f_a$  – площадь поперечного сечения волокна;  $\mu_o$  – объемный коэффициент армирования материала.

Объемный коэффициент армирования связан с  $\mu$  соотношением:

$$\mu_o = \frac{V_{fl}}{V_o} = \frac{m_{fl}}{V_o \rho_{fl}} = \frac{(1-\nu_f)\rho_s V_o \mu}{V_o \rho_{fl}} = \frac{(1-\nu_f)\rho_s \mu}{\rho_{fl}}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в формулу (11), получим:

$$n_{fl} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{(1-\nu_f)\rho_s \mu}{\rho_{fl}} \cdot \frac{4F}{\pi d_{fl}^2} = \frac{16}{\pi^3} \cdot \frac{(1-\nu_f)\mu F}{d_{fl}^2} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{fl}}. \quad (13)$$

Значения  $n_{fl}$  можно также определить, используя решетчатое приближение (рис. 1):

$$n_{fl} = \frac{4\eta F}{\pi(d_{fl} + h_s)^2}, \quad (14)$$

где  $h_s$  – толщина прослойки серной мастики;  $\eta$  – максимальная степень наполнения.

Из выражений (13) и (14)  $\mu$  равно:

$$\mu = \frac{\pi^2 \eta d_{fl}^2 \rho_{fl}}{4(1-\nu_f)(d_{fl} + h_s)^2 \rho_s}. \quad (15)$$

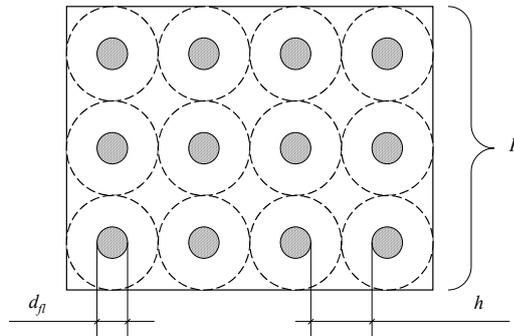


Рис. 1. – Структура дисперсно-армированного материала

Подставляя выражения (15), (10), (3), (2) в формулу (1), получим:

$$\frac{6\nu_{f,opt} V_o}{d_f} = \frac{6\nu_f V_o}{d_f} + \frac{\pi^2 \eta d_{fl}}{(d_{fl} + h_s)^2}. \quad (16)$$

Из формулы (16)  $\nu_f$  определится:

$$v_f \approx v_{f,\text{opt}} - 1,216 \frac{d_{fl} \cdot d_f}{(d_{fl} + h_s)^2}. \quad (17)$$

Определив объемную долю наполнителя в мастике, можно рассчитать расходы компонентов:

– масса наполнителя

$$m_f = v_f V_o \rho_f; \quad (18)$$

– масса серы

$$m_s = (1 - v_f) V_o \rho_s; \quad (19)$$

– масса волокна

$$m_{fl} = \mu(1 - v_f) V_o \rho_s = \frac{\pi^2 \eta d_{fl}^2 \rho_{fl} V_o}{4(d_{fl} + h_s)^2}. \quad (20)$$

При введении модификаторов ( $m_c = a_s m_s = 0,01 \cdot a_s (1 - v_f) V_o \rho_s$ , где  $a_s$  – количество добавки, выраженной в % от массы серы) суммарный объем компонентов превышает  $V_o$  и поэтому необходимо ввести коэффициент пересчета:

$$k_v = \frac{V}{V_o} = 1 + \frac{\pi^2 \eta d_{fl}^2}{4(d_{fl} + h_s)^2} + 0,01 \cdot a_s (1 - v_f) \cdot \frac{\rho_s}{\rho_c}, \quad (21)$$

где  $\rho_c$  – плотность модификатора.

Тогда уточненные расходы компонентов равны:

$$\begin{aligned} m'_f &= \frac{1}{k_v} \cdot m_f; & m'_s &= \frac{1}{k_v} \cdot m_s; \\ m'_{fl} &= \frac{1}{k_v} \cdot m_{fl}; & m'_c &= \frac{1}{k_v} \cdot m_c. \end{aligned} \quad (22)$$

Подводя итог порядок расчета состава серного дисперсно-армированного материала можно представить следующим образом. По формуле (17) вычисляют объемную долю наполнителя, по зависимостям (18)

...(20) расходы основных компонентов материала (серы, наполнителя и волокна). Затем по формуле (21) вычисляют коэффициент пересчета, а по зависимости (22) уточненные расходы компонентов материала. Настоящий алгоритм проектирования составов дисперсно-армированного серного композита можно использовать в практических целях, что существенно сокращает время и затраты на проведение экспериментальных исследований и выявления оптимальных решений.

### Литература

1. Баженов Ю.А., Соколова Ю.А. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы. М.: Палеотип, 2006. 272 с.
2. Eisaburo O., Yukio T., Tatsuya M., Yukihiro H. Effekt of  $\gamma$  – ray Irradiation on superplasticiser and superplasticised concretes. Review 37 Jer. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. – Tokyo, 1993. – pp. 98 – 100.
3. Королев Е.В., Прошин А.П., Болтышев С.А., Королева О.В., Авдеева Е.Н. Выбор соотношения между мелкими и крупными заполнителям // Известия тульского государственного университета. Выпуск 3. Тула ТГУ, 2002. С. 142-146.
4. Королев Е.В., Прошин А.П., Болтышев С.А., Макаров О.В. Подбор состава радиационного – защитного серного бетона // Материалы научно-технического семинара. Совершенствование методов проектирования составов бетона. Украина, Ровно, Ровенский ГТУ, 2001. С. 104 – 109.
5. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона, 2014, №2, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476)
6. Курилова С.Н. Прессованные цементно-минеральные композиты для дорожного строительства // Инженерный вестник Дона, 2017, №2, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4245](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4245)

7. Makatious A.S., Megahid R.M. Sekondaty  $\gamma$  - dose distvibutions in light and heavy weight concrete shields. «Int. I. Appl. Radiat and Isotop» 1992. – №7. – pp. 569 – 573.
8. Шитова И.Ю., Самошин Е.Н. Внутренние напряжения в наномодифицированных серных композиционных материалах //Современные проблемы науки и образования, 2015, № 1 (часть 1); с. 106. URL: science-education.ru/121-17131
9. Яушева Л.С. Серобетоны каркасной структуры. Дис... канд. техн.наук. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 1998. 170 с.
10. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Материалы юбилейной конференции. М.: МИИТ, 2001. С. 56-66.
11. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Материалы юбилейной конференции. М.: МИИТ, 2001. С. 41-56.
12. Баженов Ю.М., Данилов А.М., Королев Е.В., Гарькина И.А. Системный подход к разработке и управлению качеством материалов специального назначения // Архитектура и строительство, 2006, №1. С. 45-54.
13. Антонов А.В. Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004. 454 с.

### References

1. Bazhenov Ju.A., Sokolova Ju.A. Radiacionno-zashhitnye i korrozionno-stojkie sernye stroitel'nye materialy [Radiation-protective and corrosion-resistant sulfur construction materials]. М.: Paleotip, 2006. 272 p.
  2. Eisaburo O., Yukio T., Tatsuya M., Yukihiko H. Effekt of  $\gamma$ -rau Irradiation on superplasticiser and superplasticised concretes. Review 37 Jer. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. Tokyo, 1993. pp. 98-100.
-



3. Korolev E.V., Proshin A.P., Boltyshev S.A., Koroleva O.V., Avdeeva E.N. Izvestija tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 3. Tula TGU, 2002. pp. 142-146.
4. Korolev E.V., Proshin A.P., Boltyshev S.A., Makarov O.V. Materialy nauchno-tehnicheskogo seminaru. Sovershenstvovanie metodov proektirovanija sostavov betona. Ukraina, Rovno, Rovenskij GTU, 2001. pp. 104-109.
5. Kudrjavcev P.G., Figovskij O.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476)
6. Kurilova S.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4245](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4245)
7. Makatious A.S., Megahid R.M. Sekondaty  $\gamma$  - dose distvibutions in light and heavy weight concrete shields. «Int. I. Appl. Radiat and Isotop» 1992. №7. pp. 569-573.
8. Shitova I.Ju., Samoshin E.N. Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2015, № 1 (chast' 1); p. 106. URL: [science-education.ru/121-17131](http://science-education.ru/121-17131)
9. Jausheva L.S. Serobetony karkasnoj struktury [Serebyany frame structure]. Dis... kand. tehn.nauk. Saransk: MGU im. N.P. Ogareva, 1998. 170 p.
10. Solomatov V.I. Materialy jubilejnoj konferencii. M.: MIIT, 2001. pp. 56-66.
11. Solomatov V.I. Materialy jubilejnoj konferencii. M.: MIIT, 2001. pp. 41-56.
12. Bazhenov Ju.M., Danilov A.M., Korolev E.V., Gar'kina I.A. Arhitektura i stroitel'stvo, 2006, №1. pp. 45-54.
13. Antonov A.V. Sistemnyj analiz [System analysis]. M.: Vysshaja shkola, 2004. 454 p.