

УДК 691.328.43:691.544

DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

К.Ю. БЕЛОМЕСОВА, канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА
(Брестский государственный технический университет)

В материале статьи рассмотрены основные положения предлагаемой расчетной модели, позволяющей определить количество базальтовой фибры, необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов на основе расширяющихся вяжущих с требуемыми жесткостными характеристиками. В основе предлагаемой модели лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы с условно выделенной из нее транзитной зоной и фибры. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны.

Предложенная модель позволяет учитывать влияние состава напрягающего бетона, а также свойства его компонентов на требуемое для оптимизации структуры количество базальтовой фибры.

Ключевые слова: напрягающий бетон, транзитная зона, дисперсное армирование, базальтовая фибра, модуль упругости, Теория Эффективной Среды.

Введение. Совершенствование технологии цементных бетонов привело к получению композита, лишённого одного из основных недостатков, присущих традиционным бетонам, – усадочных деформаций. Так, в 1974 году группой исследователей во главе с профессором В.В. Михайловым [1, с. 26] было предложено использовать в качестве вяжущего вещества в цементных композитах специальные вяжущие – расширяющиеся цементы (англ. *expansive cement*). Помимо борьбы с усадочными деформациями, присущими цементным системам и обусловленными сложными физико-химическими процессами, применение расширяющихся композитов с высокой энергией расширения (напрягающих цементов) дает возможность получить регулируемое исходное напряженно-деформированное состояние элементов конструкции. Также, благодаря изменению кинетики гидратационных процессов, наблюдается благоприятное влияние на такие характеристики, как водонепроницаемость, стойкость к агрессивным воздействиям, морозостойкость, износоустойчивость и другие важные эксплуатационные характеристики конструкций и изделий на основе такого рода бетонов. Изначально расширяющиеся и напрягающие цементы получали полупромышленным способом на основе цементного клинкера и сульфаталюминатной композиции путем совместного помола компонентов, отдозированных в определенной пропорции. Сейчас наиболее распространённым является использование смеси готовых продуктов: портландцемента и расширяющейся добавки, что упрощает технологию получения напрягающего бетона и вместе с этим позволяет гибко реагировать путем изменения пропорции между портландцементом и расширяющейся добавкой на необходимость варьирования энергии расширения применительно к каждому конкретному случаю.

Вместе с тем установлено, что применение в качестве вяжущего напрягающих цементов с маркой по самонапряжению НЦ-2 и выше в силу специфики механизма расширения такого рода систем может привести к частичному разуплотнению структуры, сопровождающемуся спадами прочности бетона¹ [2, с. 16].

Помимо возможных спадов прочности в высокоактивных расширяющихся цементах и бетонах на их основе, в процессе эксплуатации в воздушных условиях данным системам характерно некоторое снижение свободных и связанных деформаций расширения, что связано со сложными физико-химическими процессами, происходящими в такого рода системах, а именно: продолжающейся усадкой, частичной перекристаллизацией этtringита (переход высокосульфатной формы в моносульфатную).

С учетом вышесказанного, для модификации расширяющихся систем (нивелирование эффекта разуплотнения, предотвращения снижения расширения в процессе эксплуатации) предложено применять дисперсное армирование данных систем базальтовой фиброй. Благодаря своим размерам (диаметр $d_f = 10 \div 30$ мкм соизмерим с размером цементного зерна) базальтовую фибру предлагается рассматривать как компонент, модифицирующий цементный композит на уровне цементного микробетона – микроуровне². А благодаря использованию расширяющихся вяжущих, механизм расширения которых основан на образовании повышенного количества игольчато-волокнистых кристаллов этtringита, решается вопрос реализации модифицирования очередного уровня цементного композита – уровня цементирующего вещества (иначе – субмикроруровень).

¹ Paulava I., Belamesava K. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber addicting // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О.Н. Лешкевич и др. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75. URL: <https://belniis.by/collected-research-papers/archives/2019-1/2019-11-05.pdf> (см. с. 74).

² Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Воронеж, 2001. – 188 л. (см. с. 49).

В результате совместного использования расширяющихся вяжущих и базальтовой фибры реализуется многоуровневое дисперсное армирование цементных композитов, рассматриваемое с точки зрения решения проблем трещиностойкости и в целом повышения основных характеристик цементных композитов (прочности на растяжение при изгибе, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и др.).

Но если в случае получения расширяющихся композитов (с компенсированной усадкой и напрягающих) благодаря многолетним исследованиям разработаны базовые вариации используемых компонентов^{3,4} [1; 3], предложены методики расчета соотношения расширяющейся добавки к портландцементу, действует нормативная база по определению основных физико-механических характеристик расширяющихся композитов и т.д., то с дисперсно-армированными базальтовой фиброй расширяющимися композитами (ровно как и дисперсно-армированными базальтовой фиброй традиционными композитами) все обстоит гораздо сложнее. Нормативные документы, регламентирующие количество применяемого дисперсно-армирующего волокна (фибры), правила (способы) введения такого рода волокон в цементные системы, способы перемешивания таких систем, методы испытания – разрозненны и практически отсутствуют. Все имеющиеся результаты зачастую носят рекомендательный характер и базируются на результатах исследований, полученных эмпирическим путем.

Применение аналитических моделей, позволяющих прогнозировать свойства цементных композитов, выработать базовые подходы к оптимизации структуры – это новый виток эволюции в современном бетоне. В ряде случаев применение обоснованных моделей позволит сократить обширные эксперименты, снизить сроки их проведения и материалоемкость, а также позволит получить более универсальные результаты, не привязанные к определенной сырьевой базе и т.п.

В настоящей работе представлена расчетная аналитическая модель, позволяющая определить количество базальтовой фибры, необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов на основе расширяющихся вяжущих. В качестве базовой принята модель композитной системы, жесткостные параметры которой рассчитываются с учетом положений Дифференциальной Теории Эффективной Среды⁵.

Расчетная модель. Основные параметры. Основные положения базовой модели базируются на положениях, опубликованных в работе⁶. Далее модель предлагается модифицировать с учетом появления в рассматриваемой композитной системе базальтовой фибры.

В основе базовой модели лежит рассмотрение цементного композита как трехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны. Ввод в систему третьего компонента – транзитной зоны – обусловлен необходимостью учета специфики структурообразования расширяющейся композитной системы. При этом транзитная зона, являясь частью цементного камня, формирует совместно с зерном заполнителя т.н. «эффективный» заполнитель⁷.

Предложенная в данной работе модифицированная модель позволяет оценить введение еще одного компонента, а именно – базальтовой фибры.

В представленной работе использована рабочая гипотеза, согласно которой количество базальтовой фибры должно назначаться исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицы жесткостных характеристик, тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

При построении структурной модели расширяющегося дисперсно-армированного базальтовой фиброй цементного композита приняты следующие предпосылки (П):

П1 – при прогнозировании количества базальтовой фибры, вводимой в цементную систему, необходимо оценить влияние основных структурных факторов в неразрывной связи между собой: соотношения жесткостных характеристик компонентов композита (заполнитель, фибра, цементная матрица, транзитная зона) и геометрии структуры (объемная концентрация и удельная поверхность применяемого заполнителя, фибры);

П2 – цементный композит представлен в виде непрерывной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположены «эффективный заполнитель», представляющий собой зерна заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг, и армирующие волокна базальтовой фибры;

П3 – частица заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг заменяются эффективной частицей с радиусом $a = \bar{r}_{agg} + \delta_{itz}$.

³ Титов М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. – М., 2012. – 22 с.

⁴ Потапова Ю.И. Структура и свойства бетонов с двухстадийным расширением: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Ростов-на-Дону, 2015. – 254 л.

⁵ Основной идеей Теории Эффективной Среды (англ. Differential Effective Medium Theory, в дальнейшем D-EMT) является возможность замены согласно определенным правилам неупорядоченной композитной структуры, состоящей из элементов с различными характеристиками, гомогенной однородной средой с некоторыми усредненными, т.н. эффективными характеристиками.

⁶ Павлова И.П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Брест, 2005. – 159 л. (см. с. 82).

⁷ См. сноску 6, с. 86.

Для упрощения расчетов основных параметров структурной модели расширяющегося дисперсно-армированного базальтовой фиброй цементного композита был использован ряд допущений, не искажающих физического смысла рассматриваемого явления:

- моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя приведенного радиуса;
- в принятой структурной модели толщина транзитной зоны вокруг каждого зерна заполнителя имеет постоянное значение $\delta_{itz} = const$;
- армирующие волокна представляют собой цилиндры с диаметром d_f и длиной l_f .

Геометрические параметры структурной модели. На первом этапе, основываясь на принятых допущениях, рассчитываются следующие параметры: характеристический радиус зерна заполнителя \bar{r}_{agg} и фактическая удельная поверхность заполнителя $S_{y\phi}$. На этом же этапе согласно⁸ [4, с. 5538] определяется объемное содержание транзитной зоны в бетоне V_{itz} с учетом перколированных участков:

$$V_{itz} = 1 - e_v(\delta_{itz}) - c_{agg}. \quad (1)$$

Объем цементной матрицы V_m за вычетом объема, занимаемого транзитной зоной, может быть рассчитан по формуле:

$$V_m = 1 - c_{agg} - V_{itz}. \quad (2)$$

Жесткостные характеристики элементов структурной модели композита. На следующем этапе расчета предлагается в качестве заполнителя рассматривать некоторый «идеализированный заполнитель» сферической формы с размером зерна, равным размеру зерна заполнителя с транзитной зоной вокруг него (рисунок 1), и с усредненными, так называемыми, эффективными, упругими характеристиками.

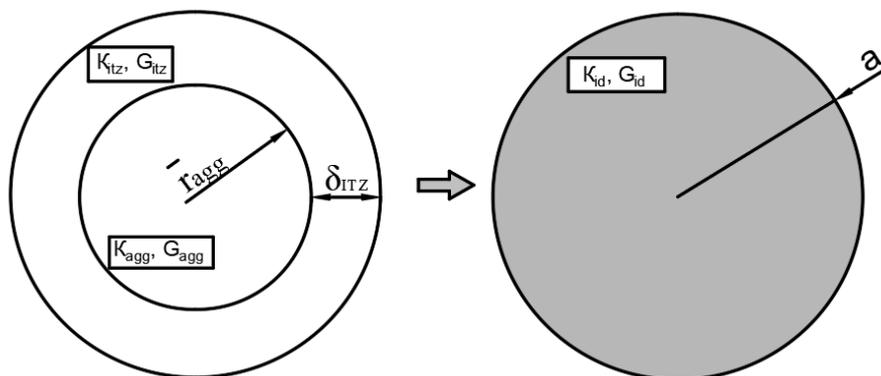


Рисунок 1. – Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D–EMT⁹

Для определения эффективных деформативных характеристик: объемный модуль упругости K_{id} и модуль сдвига G_{id} «идеализированного заполнителя» использованы положения Дифференциальной Теории Эффективной Среды¹⁰.

В соответствии с правилами, сформулированными в D–EMT, частица заполнителя с размером \bar{r}_{agg} и деформативными характеристиками K_{agg} , G_{agg} , помещенная в транзитную зону размером $\bar{r}_{agg} + \delta_{itz}$, с деформативными характеристиками K_{itz} , G_{itz} , заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \bar{r}_{agg} + \delta_{itz}$ и соответствующими деформативными характеристиками K_{id} , G_{id} .

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_{id} композитного включения с учетом транзитной зоны (эффективной частицы) находят из решения соответствующего квадратного уравнения [5, с. 459]:

$$A \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right)^2 + 2B \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right) + C = 0, \quad (3)$$

коэффициенты которого рассчитывают по формулам, приведенным в работе [5, с. 459].

⁸ Bentz D.P., Garboczi E.J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties. In book: Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites (P. 349–385). URL: https://www.researchgate.net/publication/239823312_Computer_Modelling_of_Interfacial_Transition_Zone_Microstructure_and_Properties (см. с. 371).

⁹ См. сноску 8, с. 373.

¹⁰ См. сноску 8, с. 373.

Эффективный объемный модуль упругости K_{id} «идеализированного заполнителя» с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по зависимости, предложенной в работе [5, с. 460]:

$$K_{id} = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1-p) \left[\frac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + 4/3G_{itz}} \right]}. \quad (4)$$

Приведенные решения справедливы для случая одиночного включения в бесконечной матрице (объемная концентрация заполнителя не превышает 0,05). Реальный же бетон содержит в своей структуре изначально большее количество заполнителя ($c_{agg} \geq 0,6 \dots 0,7$), поэтому следующим шагом будет поэтапное введение «идеализированного заполнителя» в цементную матрицу (K_m, G_m) до достижения концентрации заполнителя, равной реальной объемной концентрации заполнителя в цементном бетоне.

Расчет жесткостных характеристик цементной матрицы, содержащей реальное количество «идеализированного заполнителя», производится, используя следующие формулы согласно [5, с. 458]:

$$K_o = K_m + k \cdot K_m \cdot c; \quad (5)$$

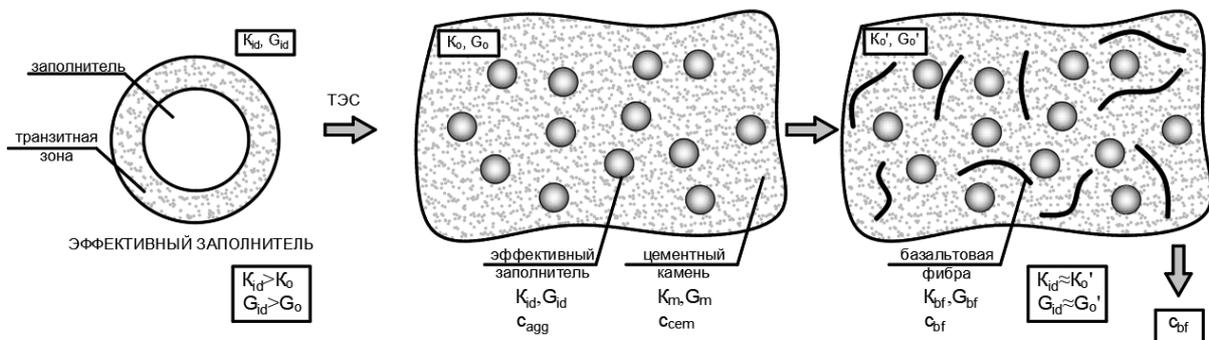
$$G_o = G_m + g \cdot G_m \cdot c, \quad (6)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, обычно определяемые как характеристические модули и зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_{id} и G_m/G_{id} .

Путем поэтапной квазигомогенизации для реальных значений концентрации заполнителя рассчитывается жесткость композитной системы K_o, G_o без учета введения фибры.

Для выполнения главного условия рабочей гипотезы должны выполняться следующие равенства: $K_o = K_{id}$ и $G_o = G_{id}$ соответственно. На данном этапе $K_o < K_{id}$ и $G_o < G_{id}$.

Поэтому на следующем этапе расчета в композитную систему, состоящую из «эффективного» заполнителя и цементного камня в реальных концентрациях, поэтапно, в соответствии с постулатами D–EMT, вводится базальтовая фибра, имеющая жесткостные характеристики K_{bf} и G_{bf} , до момента выполнения следующих равенств: объемный модуль и модуль сдвига композита станут равными аналогичным идеализированного «эффективного» заполнителя $K_o' = K_{id}$ и $G_o' = G_{id}$ соответственно. На рисунке 2 схематически представлена трансформация композитной системы в соответствии с положениями ТЭС.



K, G, c – соответственно объемный модуль, модуль сдвига и концентрация;
 id – эффективный заполнитель; m – цементная матрица; o – бетон без базальтовой фибры;
 o' – бетон с дисперсным армированием базальтовой фиброй

Рисунок 2. – Трансформация композитной системы для определения концентрации вводимой фибры

Модуль сдвига ($G_{itz}, G_f, G_m, G_{agg}$) и модуль объемных деформаций ($K_{itz}, K_f, K_m, K_{agg}$) каждого из компонентов композита определяют по следующим зависимостям согласно [6, с. 892]:

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (7)$$

где K – модуль объемных деформаций;
 G – модуль сдвига;
 E – модуль упругости;
 ν – коэффициент Пуассона.

Расчет жесткостных характеристик дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицы, содержащей реальное количество «идеализированного заполнителя», производится, используя формулы 5, 6 с вводом дополнительного коэффициента формы k_{shape} , позволяющего учесть ввод в систему цилиндрического включения.

Заключение. Разработана аналитическая модель для определения концентрации фибры, вводимой в расширяющуюся цементную систему, представляющая собой четырехкомпонентную систему, состоящую из заполнителя, цементной матрицы, расположенной между ними транзитной зоны и фибры.

Количество базальтовой фибры назначается исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик, тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя (заполнитель с транзитной зоной вокруг него) при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

Разработанная аналитическая модель применима для любых составов напрягающего бетона. Верификация модели и параметрические исследования будут опубликованы в следующей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.
2. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест: БПИ, 1998. – 244 с.
3. Михайлов В.В. Напрягающий цемент. В кн.: Труды совещания по химии цемента. – М.: Промстройиздат, 1956. – 120 с.
4. Lu B., Torquato S. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45, iss. 8. – P. 5530–5544.
5. Garboczi E.J., Berryman J.G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations // *Mechanics of Materials*. – 2001. – Vol. 33, № 8 – P. 455–470.
6. Giordano S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids // *European Journal of Mechanics*. – 2003. – Vol. 22, iss. 6. – P. 885–902.

REFERENCES

1. Mikhailov, V.V. & Litver, S.L. (1974). *Rasshiryayushchiysya i naprygayushchii tsementy i samonapryazhennyye zhelezobetonnyye konstruksii*. Moscow: Stroiizdat. (in Russ.).
2. Tur, V.V. (1998). *Ekspierimental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstruksii pri primenenii naprygayushchego betona*. Brest: BPI. (in Russ.).
3. Mikhailov, V.V. (1956). *Naprygayushchii tsement*. In *Trudy soveshchaniya po khimii tsementa*. Moscow: Promstroizdat. (in Russ.).
4. Lu, B. & Torquato, S. (1992). Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system. *Physical Review A*, 45(8), 5530–5544. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
5. Garboczi, E.J. & Berryman, J.G. (2001). Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations. *Mechanics of Materials*, 33(8), 455–470. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860258.
6. Giordano, S. (2003). Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids. *European Journal of Mechanics*, 22(6), 885–902. DOI: 10.1016/S0997-7538(03)00091-3.

Поступила 12.05.2023

ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATING THE AMOUNT OF BASALT FIBER TO PRODUCE DISPERSION-REINFORCED CONCRETE WITH AN OPTIMAL STRUCTURE

K. BELAMESAVA, I. PAULAVA
(*Brest State Technical University*)

The article deals with the main provisions of the proposed calculation model allowing to determine the amount of basalt fiber required to obtain dispersion-reinforced cement composites based on expansive binders with required stiffness characteristics. The proposed model is based on consideration of cement composite as a three-component material consisting of aggregate, cement matrix with conditionally separated from it transition zone, and fiber. The model applies the main provisions of the Effective Medium Theory taking into account the influence of the properties of the transition zone.

The proposed model allows taking into account the influence of the mix of the self-stressing concrete, as well as the properties of its components on the amount of basalt fiber required to optimize the structure.

Keywords: stressed concrete, transit zone, dispersed reinforcement, basalt fiber, elastic modulus, Theory of Effective Medium.