

*Бабаев В. Б., аспирант,  
Строкова В. В., д-р техн. наук, проф.,  
Нелюбова В. В., канд. тех. наук, доц.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова*

## БАЗАЛЬТОВОЕ ВОЛОКНО КАК КОМПОНЕНТ ДЛЯ МИКРОАРМИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ\*

sphinx-sx@mail.ru

*Обобщен опыт применения базальтового волокна в строительной отрасли. Приведены исследования физико-механических и коррозионных свойств базальтового волокна, полученного с помощью различных технологий. Определены устойчивые перспективы развития и применения базальтовых волокон.*

**Ключевые слова:** базальтовое волокно, цементный камень, коррозионная стойкость, микроармирование, фибра.

Получение эффективных строительных материалов и изделий, к которым сегодня предъявляются все более высокие требования, может быть достигнуто применением технологий, использующих композиционные материалы. Одним из перспективных конструкционных материалов являются дисперсно-армированные бетоны. В таких материалах сочетаются матрица, обладающая сравнительно небольшой прочностью при растяжении, и волокна, характеризующиеся значительным сопротивлением разрыву и более высоким по сравнению с матрицей модулем упругости.

Однако, как правило потенциал дисперсно-армирования полностью не реализуется ввиду малой эффективности или из-за чрезвычайно высокой стоимости компонентов для микроармирования бетонов. Так, стальная фибра обладает малой удельной поверхностью, полипропиленовая фибра невысокой адгезией к цементному камню, органические волокна имеют недостаточную прочность, а кевларовые и карбоновые волокна обладают завышенной стоимостью. Очевидно, что наиболее эффективным компонентом для микроармирования цементных композитов может стать базальтовое волокно. Это связано с его природными свойствами, простотой производства и технологическими особенностями его применения.

Базальтовое волокно по прочности превосходит сталь, и за счет малого диаметра (5-12 мкм), обладает гораздо большей поверхностью сцепления с цементным камнем, имея с ним химическое сродство. При этом относительное удлинение при разрыве базальтовой фибры в два раза ниже, чем стальной, что позволяет ей более эффективно препятствовать образованию микротрещин в бетоне при нагружении.

Однако, недостаточная изученность стойкости волокон в цементных системах ограничи-

вает область и объем применения фибробетона в строительстве.

Одним из способов повышения стойкости стеклянной фибры является применение щелочестойкого волокна с высоким содержанием оксида циркония. Однако, высокая стоимость и сложность технологии его получения сдерживает его применение [1].

В результате исследований, учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова было установлено, что высокие эксплуатационные характеристики фибробетонов на основе армирующих волокон различного происхождения позволяют рекомендовать данные материалы для устройства дорожных покрытий [1-6].

Исследованиями [7-11] установлено, что все минеральные волокна независимо от химического состава вступают в химическое взаимодействие с растворами, имитирующими среду твердеющего бетона на портландцементе. По химической стойкости, определяемой по количеству поглощенного СаО, растворившегося SiO<sub>2</sub>, связанных щелочей и изменению прочности, минеральные волокна можно выстроить в ряд: бесщелочное > щелочное > кварцевое > базальтовое > циркониевое. Изучение различных свойства базальтового волокна (БВ) выполнялись зарубежными и отечественными организациями, например, факультетом наук о материалах (МГУ им. М.В. Ломоносова), лабораторией базальтовых волокон (ЛБВ), Институтом материаловедения АН Украины, НИИЖБ, ЦНИИ-Промзданий, ЛатНИИСтроительства, АрмНИ-ИСВ, Basaltex Masureel Group, Department of Textiles (Ghen University Belgium) и др. Однако, имеющиеся данные о коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных матрицах носят частный и противоречивый характер, что, в свою очередь, создает затруднение для широкого использования цементобазальтовых композитов в строительстве.

Есть основания [12] предполагать, что кинетика окислительного коррозии, т.е. скорость процесса и режим его протекания (внутри или на поверхности волокна), может существенным образом зависеть от характера распределения катионов в стеклообразной матрице. В зависимости от состава исходного природного сырья (магматические породы группы габбро-базальта), возможной подшихтовки и технологических параметров диспергирования базальтового расплава могут быть получены волокнистые материалы с различной микроморфологией и типом неоднородностей.

Коллективом ученых под руководством В.И. Путляева, А.В. Кнотько и А.В. Гаршева [12], установлено, что при термообработке неподшихтованного (с содержанием Са и Na, соответствующим природному базальту, образцы Б-Л, Б-И и Б-Н) стекла на первой стадии процесса окисления образуются магнитные наночастицы ( $>20$  нм согласно данным ПЭМ)  $(Mg_2Fe)_3O_4$  в немагнитной стеклообразной матрицы (т.е. окисление протекает как внутренняя реакция), а в дальнейшем происходит кристаллизация плагиоклазов и пироксенов. В стеклах, обогащенных СаО, (Б-Р) кристаллизация плагиоклазов и пироксенов происходит одновременно с выделением шпинельной фазы, маскируя последнюю на дифрактограммах. Анализы распределения катионов в сечении волокна показал, что отжиг в окислительных условиях приводят к увеличению у поверхности волокна концентрации Са в случае неподшихтованного материала (Б-Л) и Na в случае стекла с повышенным содержанием СаО (Б-Р). Наблюдаемые различия могут быть связаны с разницей в диффузионной подвижности катионов, которая, в свою очередь, определяется нахождением их в полостях или каналах алюмосиликатного каркаса, соотношение которых в материале определяется, в первую очередь, соотношением в нем содержания Si и Al. Гидролиз образцов в кислой среде приводил к некоторому уменьшению в их составе содержания щелочных металлов, без значительных изменений их поведения в окислительных отжигах.

Однако, по мнению ученых А. А. Даленкевич, К. С. Гумаргалиева, С. С. Мараховской и А. В. Суханова [13] – химическая стойкость БВ к воздействию агрессивных сред (кислых и щелочных), определяемая, как правило, по степени изменения их прочности после некоторого времени выдержки (старения) в этих средах, зависит от их химического состава, природы агрессивной среды и температурно-временных условий воздействия. Большое значение имеет соотношение в составе базальта оксидов кремния,

алюминия, кальция, магния и железа [14–16]. Именно наличие оксидов железа в силикатном каркасе БВ и придает им повышенные, по сравнению с СВ, химическую и термическую стойкости [14, 17, 18]. В случае поверхностно-активных сред (щелочи, растворы некоторых солей и т.п.) наряду с химическим составом большое значение имеет также и состояние поверхностного слоя волокон [14–20], т.е. термическая или технологическая предыстория волокна.

Равномерное распределение волокон по объему матрицы – одно из проблемных мест в технологии приготовления базальтофибробетона. В то же время решение этого вопроса позволит получить фиброкомпозиты с высокими эксплуатационными характеристиками и высокой долговечностью.

Основными параметрами, влияющими на качество фибробетонной смеси наряду с физико-механическими свойствами матрицы и армирующих волокон, являются: равномерность распределения волокон в смеси, предельная концентрация их в смеси (максимальные процент армирования, который может быть достигнут), «комкуемость» волокон (свойство их скатываться в комки-гранулы) в процессе перемешивания [21–26].

С точки зрения проблематики, равномерно-дисперсного распределения волокна по всей структуре композита, упрочнение волокнами основывается на предположении, что материал бетонной матрицы передает волокнами приложенную нагрузку посредством касательных сил, действующих по поверхности раздела, и, если модуль упругости волокна больше модуля упругости матрицы, то основную долю приложенных напряжений воспринимают волокна, а общая прочность композиции пропорциональна их объемному содержанию [24, 25].

В основу оценки долговечности фибробетона, положена методика А.А. Пашенко, в которой усовершенствован численный расчет скорости взаимодействия компонентов базальтовых волокон с компонентами матрицы. Расчеты, показывают, что достоверно можно прогнозировать долговечность композита до 100 лет.

Критической длиной волокна  $L_{кр}$  называют минимальную длину волокон, при которой они разрушаются в композиционном материале (КМ). Величина  $L_{кр}$  зависит от прочности связи между матрицей и волокнами и от диаметра волокон. Как показывают расчеты, уже при  $L/L_{кр}=10$  прочность композиционного материала с дискретными волокнами достигает 95 % прочности материала с непрерывными волокнами [23, 25].

Процесс изготовления дисперсно-армированных бетонов состоит из трех основных технологических этапов: получение фибровой арматуры, приготовление фиброармированной бетонной смеси, укладка смеси в форму. При рассмотрении в литературе основных методов приготовления и укладки фибробетонных смесей, таких как: метод смешивания компонентов, метод виброэкструзии, метод напыления компонентов, метод контактного формования, метод вибропогружения волокна [21, 26] основное внимание уделяется проблеме слеживаемости волокон до введения в смеситель и скатывания волокон в комки-гранулы в процессе приготовления фибробетонной смеси.

Технологической особенностью базальтового грубого волокна является его хрупкость. В процессе перемешивания волокна не комкуются, а интенсивно дробятся, поэтому основное внимание предлагается уделять сохранению длин волокон, обеспечивающих требуемые конструкционные свойства базальтофибробетона, а систему «смеситель – растворная смесь» предлагается рассматривать как «измельчитель» для волокна.

Таким образом, основной задачей технологии приготовления базальтофибробетонной смеси является обеспечение геометрических характеристик волокон, соответствующих максимальной прочности композиционного материала. А именно, доля волокон с длиной  $L = 10 \cdot L_{кр}$  должна быть максимальной.

В ходе экспериментов авторами [26] установлено, что на длину волокна оказывают влияние следующие факторы: вязкость растворной смеси, ее плотность, скорость перемешивания.

Для отслеживания качества базальтофибробетонной смеси и прогнозирования качества конструкций научным сообществом ведется работа по выбору и обоснованию критерия, отражающего состояние волокон в смеси и непосредственно влияющего на физико-механические характеристики базальтофибробетона.

Для конструкционных фибробетонов характерно сочетание матрицы с невысокой прочностью на растяжение с фибрами, обладающими значительным сопротивлением разрыву и более высоким, по сравнению с матрицей, начальным модулем упругости. При использовании базальтофибробетонов в дорожном строительстве, особое внимание уделяется демпфирующим способностям дорожного покрытия, что обеспечивает устойчивую прочность композита на растяжение.

Применение базальтовых волокон для армирования бетонов позволит изготавливать кон-

струкции сложной конфигурации (искусственные сооружения в транспортном строительстве, дорожные покрытия, высокопрочные перекрытия, подземные водные каналы и др.); решит проблемы морозостойкости и долговечности изделий, так как базальтовые волокна не поддаются электрохимической коррозии, в отличие от обычной арматуры, которая является электрическим проводником и подвергается катодному эффекту; уменьшит общий вес конструкций. Кроме того, волокно заменит традиционное армирование, связанное с применением конструктивной стальной арматуры, уменьшит ее объемы, тем самым снизит трудозатраты и себестоимость готового изделия.

Таким образом, введение базальтового волокна в структуру цементного камня, позволяет решать актуальную задачу современной строительной и дорожно-строительной отрасли – сохранение прочностных характеристик наряду со снижением количества цемента.

*\*Данная работа выполнена при финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013 годы), Мероприятие 1.5 «Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей»: № 14.В37.21.1218 и мероприятие 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук»: № 14.В37.21.0930*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев С.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна / С.В. Клюев, Р.В. Лесовик // Бетон и железобетон. – 2011. – № 3. – С.7–9.
2. Юрьев А.Г. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием техногенного песка / А.Г. Юрьев, Р.В. Лесовик, Л.А. Панченко // Известия высших учебных заведений. – Строительство. – 2008. – № 11. – С. 121 – 125.
3. Клюев С.В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций / Клюев С.В. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 4. – С. 71 – 75.
4. Клюев С.В. Ползучесть и деформативность дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Клюев С.В. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 85.

5. Алфимова Н.И. Влияние сырья вулканического происхождения и режимов твердения на активность композиционных вяжущих / Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневецкая, П.В. Трунов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 1. – С. 52 – 55.

6. Алфимова Н.И. Повышение эффективности стеновых камней за счет использования техногенного сырья / Н.И. Алфимова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 56 – 59.

7. Стеклофибробетон в строительстве: материалы семинара. – М.: Центральный Российский Дом знаний. – 1992. – 354 с.

8. *Velde K.* Basalt fibers as reinforcement for composites / *Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L.* // Van de Department of Textiles, Ghent University, Technologiepark 907. – B-9052 Zwijnaarde.

9. Разработка технологии, конструкторской документации, изготовление и испытания опытно-промышленных партий композитных (стеклопластиковых и других видов) соединителей слоев бетона и трехслойных стеновых панелей. – М.: Стройизд. – 1988. – 382 с.

10. *Розенталь Н.К.* Коррозионно-стойкие бетоны особо малой проницаемости / Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний // Бетон и железобетон. – 1988. – №1. – С. 27 – 29.

11. R.F. Cooper, J.V. Fanelow, D.V. Poker. *Geocbim.CosmocbimActa*, 1996, v.60.N17.p3253-3256.

12. *Кнотько А.В.* Химические процессы при термообработке базальтового волокна / А.В. Кнотько, В.И. Пуляев, В.К. Иванов, А.В. Гаршев, Ю.Д. Третьяков // Сборник трудов Строительное материаловедение – теория и практика. Всероссийская научно-практическая конференция. – Москва., – 2006.

13. *Даленкевич А.А.* Современные базальтовые волокна и полимерные композиционные материалы на их основе// А. А. Даленкевич, К. С. Гумаргалиева, С. С. Мараховской и А. В. Суханова// Конструкции из композиционных материалов №3. – 2010. – С. 86 – 88.

14. *Джигирис Д.Д.* Основы производства базальтовых изделий и волокон / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 407 с.

15. *Новицкий А.Г.* Высокотемпературные теплоизоляционные материалы на основе

волокон из горных пород типа базальтов / А.Г. Новицкий, В.Л. Мазур // Химическая промышленность Украины. – 2003. – №3. – С.42 – 43.

16. *Соколинская М.А.* Прочностные свойства базальтовых волокон / М.А. Соколинская, Л.К. Забава, Т.М. Цыбуля, А.А. Медведев // Стекло и керамика – 1991. – №10. – С. 8 – 9.

17. *Далинкевич А.А.* Кинетика старения базальтовых волокон в щелочной среде / А.А. Далинкевич, К.З. Гумаргалиева, А.В. Суханов, А.В. Асеев, А.И. Жаров // Пластические массы. – 2002. – №3. – С. 7 – 10.

18. *Далинкевич А.А.* Кинетика старения базальтовых и некоторых стеклянных волокон в щелочной среде / А.А. Далинкевич, К.З. Гумаргалиева, А.В. Суханов, А.В. Асеев, А.И. Жаров // Пластические массы – 2002. – №12. – С. 23 – 26.

19. *Далинкевич А.А.* Базальтоволокнистые композиты в армировании бетона / А.А. Далинкевич, А.В. Суханов, А.В. Асеев // Технологии бетонов. – 2005. – №3. – С. 10 – 13.

20. *Асланова М.С.* Стеклянные волокна, под ред. М.С. Аслановой / М.С. Асланова, Ю.И. Колесов, В.Е. Хазанов – М.: Химия, 1979. – С. 597 – 604.

21. *Бирюкович К.Л.* Стеклоцемент в строительстве / К.Л. Бирюкович, Ю.Л. Бирюкович. – Киев: Будивельник – 1986. – 96 с.

22. *Королев А.С.* Теория и практика создания модифицированных магнезиальных цементов / А.С. Королев, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, В.М. Горбаненко // Вестник ЮУрГУ серия «Строительство и архитектура» Вып. 1. – №5. – 2001. – С. 10 – 13.

23. *Карпинос Д.Н.* Новые композиционные материалы / Д.Н. Карпинос, Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков. – Киев: Вища школа. – 1977. – 312 с.

24. *Пащенко А.А.* Физико-химические основы композиции неорганическое вяжущее – стекловолокно / А.А. Пащенко, В.П. Сербин. – Киев: Вища школа. – 1979 – 224 с.

25. *Пащенко А.А.* Использование стеклянных волокон для армирования неорганических вяжущих / А.А. Пащенко – Киев: УкрНИИНТИ. – 1976.

26. *Рабинович Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / Ф.Н. Рабинович. – М.: издательство АСВ. – 2004. – 560 с.