

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СТРУКТУРЕ ФИБРОКАУТОНА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

В даній статті показано використання методу Монте-Карло для визначення кількісних характеристик перетинів фібри в структурі фіброкаутону з урахуванням заданих розмірів зразків і представлені графіки залежності кількості областей з розмірами меншими, ніж діаметр допустимої неоднорідності від процентного вмісту фібрового волокна. Отримано аналітичне та математичне обґрунтування оптимального відсотка армування каутону різними видами фібрових волокон

Ключові слова: каучуковий бетон (каутон), дисперсне армування, металева фібра, математичне моделювання, метод Монте-Карло

В данной статье показано использование метода Монте-Карло для определения количественных характеристик пересечений фибры в структуре фиброкаутонa с учетом заданных размеров образцов и представлены графики зависимости количества областей с размерами меньшими, чем диаметр допустимой неоднородности от процентного содержания фибрового волокна. Получено аналитическое и математическое обоснование оптимального процента армирования каутонa различными видами фибровых волокон

Ключевые слова: каучуковый бетон (каутон), дисперсное армирование, металлическая фибра, математическое моделирование, метод Монте-Карло

О. Л. Фиговский

Кандидат технических наук,
директор по науке и развитию

Международный нанотехнологический
исследовательский центр Polymate

South Industrial Area, POB 73, Migdal Haemek, Israel, 23100

E-mail: oleg@figovsky.com

Ю. Б. Потапов

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: potapov@vgasu.vrn.ru

Д. В. Панфилов

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: panfilov_dv@vgasu.vrn.ru

С. В. Каштанов

Ассистент**

E-mail: postmortem2005@bk.ru

Е. М. Юдин

Инженер

E-mail: tibet1776@mail.ru

*Кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова***

Кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов*

***Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Россия, 394006

1. Введение

Современная строительная индустрия и отрасли промышленности испытывают острый дефицит в современных химически стойких материалах и конструкциях. Технический прогресс строительства существенным образом зависит от уровня развития предприятий промышленности строительных материалов, от их оснащённости современной технологией, позволяющей чутко реагировать на возрастающие требования строительного производства, среди которых долговечность сооружений, изделий и материалов занимает ведущее место.

Одним из недостатков традиционных бетонов является их недостаточно высокая прочность при воздействии растягивающих, срезающих, истирающих и динамических нагрузок, а также хрупкости разрушения. Введение в состав бетонов дисперсной арматуры значительно улучшает их деформацион-

но-прочностные свойства, показатели долговечности и технико-экономические характеристики. Использование волокон для дисперсного армирования позволяет в ряде случаев избежать использования продольной и поперечной арматуры, а также увеличить прочность материала, повысить его предельную растяжимость, ремонтпригодность, износостойкость [1, 2].

2. Литературный обзор

Началом изучения процессов разрушения хрупких тел принято считать работу Алана Гриффитса «Явление разрушения и течение твердых тел», опубликованной в 1921 г. В этой работе Гриффитс ввел априорное существование в материале микротрещин, объяснив тем самым существенное снижение теоретической прочности материала. Впервые была разработана модель, количественно описывающая процесс разруше-

ния в хрупких телах. На базе этой идеи был разработан новый раздел механики твердого деформируемого тела – механики разрушения. С помощью аппарата теории упругости были получены важнейшие соотношения, которые до сих пор являются актуальными и востребованными.

Последующие исследования, однако, показали, что опираясь лишь на методы «макроскопического подхода» не удастся описать процессы, происходящие на микроуровне.

Основным отличием «микроскопического подхода» является то, что для возникновения трещины совершенно необязательно, чтобы в твердом теле присутствовал зародыш будущей трещины. При рассмотрении физических механизмов образования микротрещин принято различать два принципиальных способа зарождения – в зависимости от «строительного» материала микротрещины. Микротрещина может возникнуть либо из-за диффузии вакансий, либо из-за слияния дислокаций. Идея этого подхода заключается в том, что под воздействием внешней нагрузки в хрупких телах возникают дополнительные вакансии. С течением времени концентрация этих вакансий возрастает, они начинают сливаться с образованием микропор. И именно микропоры согласно данному подходу являются начальным элементом для дальнейшего роста трещин. Микропора образуется и растет за счет диффузии вакансий, образующихся в хрупких телах под нагрузкой. После зарождения микропоры могут превратиться в трещину, если нагрузка превысит критическое значение. В этой связи актуальным является вскрытие природы и критериев устойчивости формы зародыша новой фазы, поскольку в процессе роста форма микропоры может флуктуировать и ее морфология меняться. Например, пора, имеющая первоначально сферическую форму, в процессе роста может потерять свою устойчивость и превратиться в эллипсоид и т. п. [3].

В ранних работах по исследованию фиброкартона, армированного различными типами волокон, не было изучено и описано распределение, количество и размеры микроскопических неоднородностей, которые могли образоваться при перемешивании, формовании и вулканизации. Влияние этих дефектов негативным образом сказывается на прочностных и деформативных характеристиках композита [4]. В полученных ранее данных о композите, где снижение прочности материала описывалось как локальное скопление волокон между зернами, которое приводило к раздвижке зерен наполнителя и, в конечном итоге, к появлению значительных дефектов в его структуре не было учтено наличие дефектов на микроуровне. А определение оптимального процента дисперсного армирования исследовалось только экспериментальным методом [5].

Создание материалов с низким содержанием дефектов структуры является одной из актуальных проблем современного материаловедения. В процессе производства новых материалов, как правило, образуются различного рода дефекты, а именно: микро и нано-трещины, дефекты упаковки кристаллических решеток и т.п. Возникающие в процессе производства материалов дефекты роста, а также дефекты, образующиеся в процессе работы материала, могут приводить к их деградации и снижению срока службы.

Исследования в области механики разрушения фиброкартоновых конструкций показали, что дефекты в материалах могут возникать в процессе их эксплуатации [6], а не на стадии получения материалов.

3. Цели и задачи исследования

Цель данного исследования состоит в получении аналитического и математического обоснования оптимального дисперсного армирования фиброкартона, их анализ и сопоставление с экспериментальными данными.

Задачами исследования является адаптация метода Монте-Карло для изучения распределения микроскопических неоднородностей в структуре композита при его армировании различными видами волокон, а также изучение влияния волокон на прочность композита.

4. Экспериментальные исследования распределения фиброволокон и дефектов в каутоне и обсуждение полученных результатов

Для проведения эксперимента были выбраны 3 вида фибровых волокон, представленных на рис. 1.



a



b



в

Рис. 1. Виды армирующих волокон: *a* – стальная рубленная фибра $L=40$ мм., $d=0.8$ мм; *b* – стальная латунированная фибра $L=15$ мм, $d=0.3$ мм; *в* – полипропиленовая фибра $L=12$ мм., $d=12$ мкм

Был произведен подсчет количества волокон, необходимых для дисперсного армирования стандартного образца размером 4x4x16 см в объемной доле, равной 1, 2, 3 и 4 % для каждого вида фибры. В виду наличия различия волокон между собой по размеру, массе и условному диаметру, с учетом статистического распределения и допустимым интервалом в 5 %, были получены значения количества волокон, представленные в табл. 1.

Таблица 1
Количество волокон, необходимых для дисперсного армирования

Процент содержания волокна в образце	Вид армирующего волокна		
	Стальная рубленая фибра L=40 мм, d=0.8 мм	Стальная латунированная фибра L=15 мм, d=0.3 мм	Полипропиленовая фибра L=12 мм, d=12 мкм
1 %	124–130	2450–2574	1838800–1933000
2 %	248–260	4900–5148	3677600–3866000
3 %	374–390	7350–7722	5516400–5799000
4 %	496–520	9800–10296	7355200–7732000

Введем положение о необходимости чередования с определенным шагом неоднородностей и центрами тяжести фибр по кратчайшим из возможных расстояний между ними, так как наиболее вероятное распространение трещины от одной неоднородности к другой должно протекать прежде всего в направлении соответствующему минимальному значению энергетических затрат, необходимых для разрушения материала. В общем случае размещение центров фибр может быть осуществлено по двум структурным схемам: в центре граней фигур, либо на их вершинах. Подобные схемы размещения центров фибр в макроскопических ячейках оптимальны с точки зрения создания препятствий для развития трещин между неоднородностями в объеме каутона.

Величину допускаемых диаметров макроскопических неоднородностей можно установить по формуле:

$$d_n = \left(\frac{1.5 \cdot \mu_n \cdot d_f^2 \cdot l_f \cdot n_{fc}}{\mu_f} \right)^{1/3}$$

Результаты допускаемых диаметров неоднородностей представлены в табл. 2.

Ввиду того, что расположение фибровых волокон в материале является хаотичным, можно предположить образование областей, где расстояние между центрами тяжести фибры меньше допускаемых диаметров неоднородностей.

Для определения количественных характеристик пересечений фибры в структуре фиброкаутона с учетом заданных размеров образцов можно применить метод Монте-Карло. Идея данного метода заключается в генерации множества точек, имеющих координаты (x, y, z), удовлетворяющих условиям:

- $0 \leq x \leq a$, где a – длина образца, м;
- $0 \leq y \leq b$, где b – ширина образца, м;
- $0 \leq z \leq c$, где c – высота образца, м.

Геометрические размеры помещения задаются в декартовой прямоугольной системе координат XYZ таким образом, чтобы левый нижний угол имел координату (0, 0, 0) и стороны образца совпадали с координатными осями.

Подсчет количества пересеченных фибр в испытываемых образцах осуществлялся с помощью стохастической модели, реализованной в среде MatLab с применением метода Монте-Карло. Идея данного метода заключается вероятностном рассеивании заданного количества фибра в объеме образца.

Далее для каждого случая произвольным образом выбиралось число волокон, удовлетворяющих данным таблицы 1, и рассеивалось в объеме, ограниченном размерами образца. После осуществлялся подсчет пересечений фибр, расстояние между центрами тяжести которых, являлось меньше заданного порогового значения, равного допускаемому диаметру неоднородности – по табл. 2. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2.

Таблица 2

Допускаемые диаметры неоднородностей

Вид армирующего волокна	Стальная рубленая фибра L=40 мм, d=0.8 мм		Стальная латунированная фибра L=15 мм, d=0.3 мм		Полипропиленовая фибра L=12 мм, d=12 мкм		
	В вершинах ячейки	В центре граней	В вершинах ячейки	В центре граней	В вершинах ячейки	В центре граней	
Процент содержания волокна в образце	1 %	6,15	4,35	2,32	1,65	0,34	0,24
	2 %	4,93	3,44	1,83	1,28	0,27	0,19
	3 %	4,26	2,96	1,62	1,14	0,24	0,17
	4 %	3,86	2,71	1,45	1,03	0,22	0,15

Анализ графиков показал, что с увеличением процентного содержания фибровых волокон в материале увеличивается и число «проблемных» областей, где с гораздо большей вероятностью может пойти разрушение материала. Соотнеся полученные распределения с прочностью материала, представленной на рис. 3, табл. 3, можно сделать вывод о влиянии концентраторов напряжений в этих областях на прочность материала в целом.

По результатам проведенного эксперимента получены уравнения, адекватно описывающие результаты эксперимента:

1. Металлическая рубленая 40/0.8

$$\sigma_{сж} = -8,7 \times \mu_2 + 38,6 \times \mu + 59,06;$$

2. Металлическая латунированная 15/0.3

$$\sigma_{сж} = -9,935 \times \mu_2 + 40,105 \times \mu + 56,91;$$

3. Полипропиленовая

$$\sigma_{сж} = -4,14 \times \mu^2 + 17,83 \times \mu + 62,46,$$

где μ – процент армирования, %.

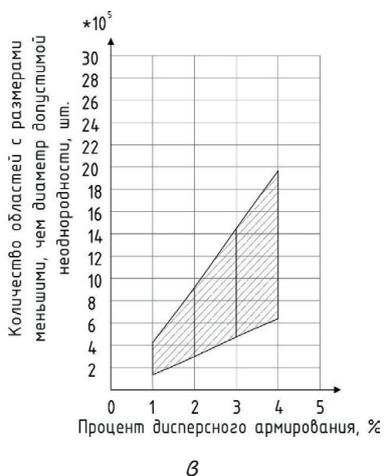
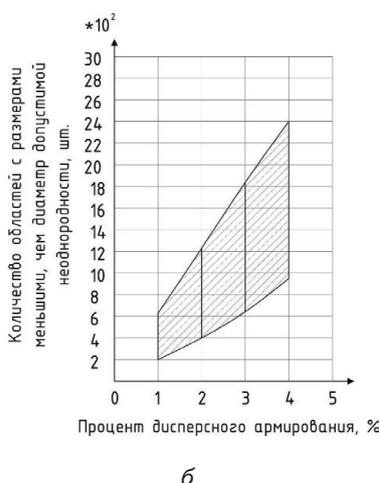
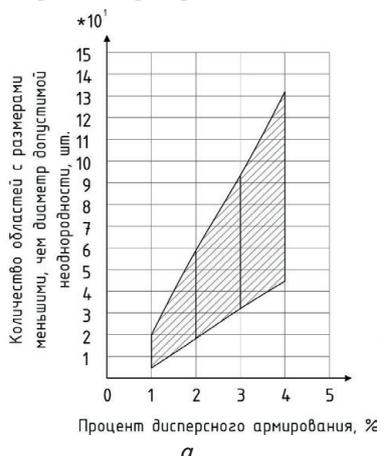


Рис. 2. Графики зависимости количества областей с размерами меньшими, чем диаметр допустимой неоднородности от процентного содержания фибрового волокна: а – стальная рубленая фибра L=40 мм, d=0.8 мм; б – стальная латунированная фибра L=15 мм, d=0.3 мм; в – полипропиленовая фибра L=12 мм, d=12 мкм

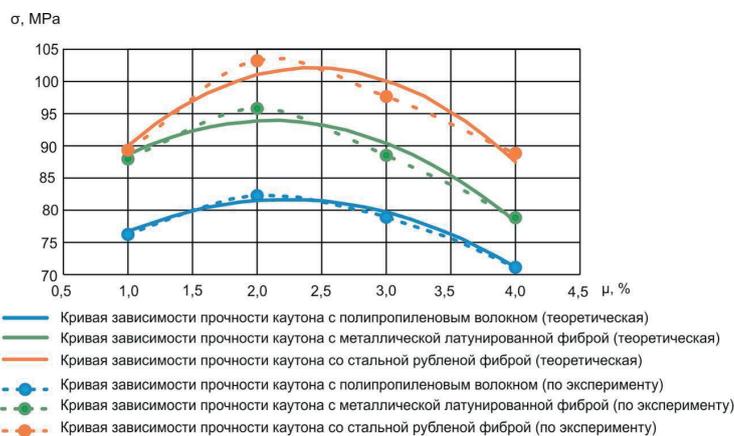


Рис. 3. Прочность фиброкаутона на сжатие в зависимости от процента дисперсного армирования

Таблица 3

Результаты испытаний образцов каутона и фиброкаутона на сжатие

Вид фибры	Процент содержания, μ , %	Относительная длина, l / d	Прочность, σ , МПа	
			По эксперименту	По регрессии
Стальная рубленая фибра	0	40/0.8	80.31	
	1		88.26	88.96
	2		101.46	101.88
	3		96.56	95.52
Стальная латунированная фибра	0	15/0.3	80.31	
	1		87.08	89.12
	2		94.38	92.18
	3		87.81	90.81
Полипропиленовая фибра	0	12/0.12	80.31	
	1		76.15	77.45
	2		81.56	83.52
	3		78.69	75.21

Во время испытания образцов наблюдали за процессом их разрушения, которое происходило по зернам заполнителя и дефектам структуры каучукового связующего. Поверхность разрушения имела четко выраженную конусообразную форму, что является характерным для бетонов и полимербетонов. Разрушения на границе полимерное связующее – заполнитель не наблюдалось, что говорит о хорошей адгезионной связи с заполнителем. Что касается фиброкаутона, то в целом процесс его разрушения такой же, как и у каутона без фиброармирования, но разрушение происходит только после разрыва волокон, а это значит, что введение фибры благоприятно сказывается на деформационно-прочностных характеристиках материала.

5. Выводы

Успешно адаптирован и применен метод Монте-Карло для изучения распределения фибры в композите, произведен подсчет неоднородностей, в которых возможно возникновение и развитие трещин.

Испытаниями установлено, что увеличение процента армирования повышает прочность каутона на сжатие. Максимальная прочность достигается только при 2 %-ом армировании образца. Дальнейшее увеличение процента армирования ведет к снижению этого показателя, что объясняется комкованием смеси при $\mu > 2$ % и снижением удобоукладываемости обуславливающим образование дефектных областей в материале.

В ходе испытаний установлен характер разрушения образцов в зависимости от вида применяемой фибры и её процентного содержания. Армирование каутона стальными фибрами определяло хрупкое разрушение, ввиду незначительного удлинения фибры в момент разрушения образца, тогда как для каутона армированного полипропиленовым волокном было характерно пластическое разрушение. Определен оптимальный процент армирования для каждого вида фибры. Получено аналитическое и математическое обоснование оптимального процента армирования каутона представленными видами фибровых волокон.

Доказано, что фиброкаутон по своим деформационно-прочностным показателям и трещиностойко-

сти, определенным при действии кратковременных сжимающих нагрузок, соответствует техническим требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в агрессивных средах. Полученные результаты получили продолжение в других работах, в частности, при расчетах изгибаемых элементов [7], исследовании прочности нормальных сечений двуслойных балок из бетона и каутона [8] и изучении вопроса об их армировании [9], а также балок таврового сечения [10].

Данные исследования были выполнены с использованием приборов и контрольно-измерительной аппаратуры центра коллективного пользования имени профессора Ю. М. Борисова Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (Россия) в рамках государственного задания по теме: "Научное обоснование, разработка и реализация технологий эффективных композиционных материалов из минерального и полимерного сырья и разработка на их основе конструкций специального назначения".

Литература

1. Figovsky, O. Advanced Polymer Concretes and Compounds [Text] / O. Figovsky, D. Beilin. – CRC Press, New York, 2014. – 245 p. doi: 10.1201/b16237
2. Borisov, Yu. Wear Resistance Coverings on the Basis of Oligodiens Oligomer [Text] / Yu. Borisov, D. Barabash // Scientific Israel – Technological Advantages. Scientific Herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 1, Issue 4, 5. – P. 77–81.
3. Кузьмичев, С. В. Эволюция морфологии микропоры в хрупком твердом теле под действием внешней механической нагрузки [Текст] : сб. матер. / С. А. Кукушкин // XVIII Петербургские Чтения по проблемам прочности и роста кристаллов, 2008. – С. 65.
4. Borisov, Yu. Stress – Strain Characteristics of Fiber Polymer Concrete Based on Polybutadiene Binder [Text] / Yu. Borisov, D. Panfilov, S. Kashtanov, Ye. Yudin // Journal "Scientific Israel - Technological Advantages". "Scientific Herald" of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 15, Issue 4. – P. 30–37.
5. Борисов, Ю. М. Дисперсно-армированные строительные композиты [Текст] / Ю. М. Борисов, Д. В. Панфилов, С. В. Каштанов, Е. М. Юдин // Журнал «Строительная механика и конструкции», Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – 2010. – № 2. – С. 32–37.
6. Борисов, Ю. М. Напряженно-деформированное состояние сжатых полок изгибаемых конструкций из армокаутона [Текст] / Ю. М. Борисов, А. Э. Поликутин, А. С. Чуудинов, Ф. З. Нгуен // Журнал «Строительная механика и конструкции», Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – 2010. – № 2 (5). – С. 77–85.
7. Borisov, Yu. Strength Calculation for Oblique Sections of Bending Elements Made of Rubber Concrete [Text] / Yu. Borisov, A. Polikutin // Journal "Scientific Israel - Technological Advantages". – 2013. – Vol.15, Issue 4. – P. 38–44.
8. Borisov, Yu. Stress- Strain State of Normal Cross-Section of Two-Layer Caoutchouc Concrete-Concrete Bending Elements of Building Structures [Text] / Yu. Borisov, A. Polikutin, Phan Duy Nguyen // Journal "Scientific Israel - Technological Advantages". "Scientific Herald" of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Construction and Architecture. – 2011 – Vol. 2, Issue 10. – P. 6–13.
9. Borisov, Yu. Research of Reinforced Two-Layer Beams Made from Conventional And Rubber Concretes [Text] / Yu. Borisov, A. Polikutin, Phan Duy Nguyen // Journal "Scientific Israel - Technological Advantages". – 2012. – Vol.14, Issue 2. – P. 5–11.
10. Borisov, Yu. Study of T-flanges rubber concrete bended beams [Text] / Yu. Borisov, A. Polikutin, A. Chudinov, M. Okunev, A. Bystrov // Journal "Scientific Israel - Technological Advantages". "Scientific Herald" of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 15, Issue 4. – P. 65–72.