

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ФИБРОКАУТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ

©2014 Д. В. Панфилов, Ю. Б. Потапов, С. В. Каштанов, И. А. Константинов

Воронежский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, ул. 20-летия Октября, 84,  
394006 Воронеж, Россия  
e-mail: kashtanov@vgasu.vrn.ru

Поступила в редакцию 05.06.2014 г.

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с определением оптимального процента армирования. Приведено описание технологии изготовления каутона, армированного различными видами фибр (стальная рубленая  $L=40$  мм,  $d=0.8$  мм, стальная латунированная  $L=15$  мм,  $d=0.3$  мм, полипропиленовая  $L=12$  мм  $d=12$  мкм). Представлены графики зависимости прочности материала от процента армирования, диаграммы зависимости между напряжениями и деформациями в фиброкаутоне при сжатии, а также зависимости ударной стойкости плиты от её толщины. Приведены результаты по определению процентного содержания фибрового волокна в каутоне и графики зависимости прочности каутона на сжатие от процента армирования, диаграммы зависимости между напряжениями и деформациями в фиброкаутоне при сжатии, а также зависимости ударной стойкости плиты от её толщины.

**Ключевые слова:** каучуковый бетон (каутон), дисперсное армирование, металлическая фибра.

### 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 так же хрупкость разрушения. Введение в состав бетонов дисперсной арматуры значительно улучшает их деформационно-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 и ремонтпригодность.

В Воронежском государственном архитектурно-строительном университете разработаны бетоны, вяжущую основу которых составляют жидкие каучуки. Эти бетоны нами названы каучуковыми бетонами или сокращенно каутонами. В этих композитах в качестве связующего используют олигодиены. Как показывают исследования, границы введения жидкого каучука в композицию находятся в пределах 6...14% по массе. Следует отметить, что жидкие каучуки выпускаются ведущими отечественными и зарубежными фирмами в постоянно увеличивающихся объемах. Это делает полимеры данного вида перспективным и бездефицитным в сравнении с полимербетонами, изготовленными с применением традиционных смол.

Каутонам свойственны благоприятные деформационно-прочностные характеристики, высочайшая стойкость к агрессивным средам, хорошие электроизоляционные и демпфирующие свойства, высокая адгезия к различным видам поверхностей и т. д.

Следует выделить также повышенную трещиностойкость каутона, которая достигается дисперсным армированием. Армирование фиброволокном повышает не только порог трещиностойкости, но

и увеличивает сопротивление материала к ударным воздействиям, а это важно для предприятий с наличием постоянно действующих динамических нагрузок (фундамент под прессовое оборудование и т. д.).

В качестве армирующей добавки в каутон использовали три вида фибр: стальную рубленую (40/0.8)  $l=40$  мм,  $d=0.8$  мм, стальную латунированную (15/0.3)  $l=15$  мм,  $d=0.3$  мм и полипропиленовую (ППФ)  $l=12$  мм,  $d=12$  мкм, табл. 1.

Таблица 1. Виды фибрового волокна и их характеристики

Виды фибр Характеристики фибр	Стальная рубленая фибра $l=40$ мм, $d=0.8$ мм (ТУ 1231—001— 97507711—2006)	Стальная латунированная фибра $l=15$ мм, $d=0.3$ мм (ТУ 1221—001— 71968828—2005)	Полипропиленовая фибра $l=12$ мм, $d=12$ мкм (ТУ 5743—001— 33181465—2006)
Прочность на растяжение	510—850 МПа	до 2900 МПа	170—260 МПа
Удлинение до разрыва	15—25 %	3—5 %	150—250 %

Целью проделанной работы являлось создание эффективных при эксплуатации в агрессивных средах дисперсно армированных строительных композиционных материалов с использованием местных ресурсов и крупнотоннажных технологических отходов, а также изучение их физико-механических, химических и технологических свойств.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Армирующие волокна и процент их добавления в материал.** В соответствии с поставленной целью решали следующие задачи:

- изучение влияние вида и количества волокон на деформационно-прочностные свойства композита, установление базового вида волокна для дисперсного армирования каутона;
- исследование влияние процента армирования на несущую способность образцов каутона;
- разработка эффективных составов дисперсно-армированного каутона;
- исследование напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированного каутона при длительном действии нагрузки.

Выбор видов фибр производили, исходя из доступности и широты применения ее в качестве армирующей добавки в бетоны [1], рис. 1.

Для определения оптимального процента армирования были изготовлены и испытаны серии образцов с различным содержанием фибровых волокон 1, 2, 3 об. %. Компонентный состав каутона представлен в табл. 2.

Таблица 2. Компонентный состав каутона

Наименование компонентов	Содержание компонентов, мас. %
Каучук марки СКДН-Н	9
Сера техническая	4.5
Тиурам-Д	0.45
Оксид цинка	1.62
Оксид кальция	0.45
Зола-унос ТЭЦ	8
Кварцевый песок	24
Гранитный щебень	Остальное (51.98)



Рис. 1. Фибра, используемая для армирования каутона: а — стальная рубленая  $l = 40$  мм,  $d = 0.8$  мм; б — стальная латунированная  $l = 15$  мм,  $d = 0,3$  мм; в — полипропиленовая фибра  $l = 12$  мм,  $d = 12$  мкм.

В указанный состав добавляли фибру путем замены соответствующего объема песка.

Приготовление фиброкаутоновой смеси включало в себя: промывку и сушку заполнителя и наполнителя, подготовку компонентов отверждающей группы, дозирование составляющих. Дозирование песка и щебня производили с точностью до 5 г, а каучука — с точностью до 0.5 г.

Перемешивание составляющих осуществляли в скоростном смесителе пропеллерного типа. Полимерное связующее приготавливали путем совмещения жидкого каучука марки СКДН-Н с серой, тиурамом-Д и дисперсным минеральным наполнителем золой-унос ТЭЦ. Затем в приготовленное связующее вводили мелкий и крупный заполнитель. После этого при непрерывном перемешивании композиции добавляли в требуемом количестве армирующие волокна. Здесь следует отметить, что полипропиленовую фибру необходимо добавлять в последнюю очередь, иначе происходит комкование смеси, тогда как последовательность введения металлической фибры в смесь почти никак не влияет на конечную композицию.

**Технология изготовления образцов и результаты испытаний на действие кратковременного нагружения.** Технологический процесс изготовления образцов из фиброкаутоновой композиции включал: подготовку форм — образцы изготавливали в стальных формах (4 × 4 × 16 см), рабочую поверхность которых очищали от остатков материала и клеивали лавсановой пленкой, затем производили укладку фиброкаутоновой смеси и формование изделий. Отформованные образцы уплотняли на стандартной лабораторной виброплощадке в течение 100 ± 30 с. Признаком достаточного уплотнения каутоновой смеси служило выделение связующего и прекращение интенсивного образования пузырьков воздуха. После выполнения всех этих операций форму со смесью помещали в камеру сухого прогрева, где и происходило отверждение каутона при температуре 120 ± 5 °С в течение 8 ч. Разопалубливание производили после полной вулканизации и охлаждения образцов.

Вышеописанная технология полностью подходит для каутона, армированного стальными волокнами. Композиция с полипропиленовым волокном получается пластичная, но она менее удобоукладываемая. Укладку и уплотнение смеси необходимо производить вручную, чтобы избежать пористости материала, поскольку вибрирование не обеспечивает однородности композиции.

Следует отметить разность плотностей каутона, фиброкаутона, армированного стальными волокнами и полипропиленовыми, она составляет: для каутона и фиброкаутона, армированного стальными волокнами, 2000 кг/м<sup>3</sup>—2200 кг/м<sup>3</sup>, а для каутона, армированного полипропиленовыми волокнами, около 1900 кг/м<sup>3</sup>—2000 кг/м<sup>3</sup> (при 2%-ом содержании волокна). При увеличении процента армирования полипропиленовым волокном плотность материала уменьшается.

Испытание образцов фиброкаутона в условиях кратковременного центрального нагружения проводили на гидравлическом прессе. Средняя скорость загрузки образцов составляла 60 МПа/мин. Фотографии разрушенных образцов представлены на рис. 2.



Рис. 2. Фотографии разрушенных образцов

Для определения продольных и поперечных деформаций и коэффициента Пуассона фиброкаутона при сжатии были использованы образцы размером 40 × 40 × 160 мм.

Испытания и обработку результатов проводили согласно ГОСТ 24452—80 [1]. В результате испытания были получены графики зависимости между напряжениями и деформациями фиброкаутона, а также график зависимости напряжений от процента армирования с уравнениями, адекватно описывающими результаты проведенных опытов, табл. 3.

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,

**Таблица 3.** Результаты испытаний на сжатие образцов каутона и фиброкаутона

Вид волокна	Содержание волокна, $\mu$ , %	Отношение $l/d$	Прочность, $\sigma$ , МПа	
			по факту	по регрессии
Стальная рубленая	0	40/0.8	80.31	
	1		88.26	88.96
	2		101.46	101.88
	3		96.56	95.52
Стальная латунированная	0	15/0.3	80.31	
	1		87.08	89.12
	2		94.38	92.18
	3		87.81	90.81
Полипропиленовая	0	12/0.12	80.31	
	1		76.15	77.45
	2		81.56	83.52
	3		78.69	75.21

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. Изменение прочности испытанных образцов в зависимости от вида и количества фибры графически представлено на рис. 3.

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

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  $\sigma_{сж}$  — прочность при сжатии, МПа,  $\mu$  — процент армирования, %.

Во время проведения эксперимента фиксировали изменение продольных и поперечных деформаций в образцах при разных уровнях загрузки.

С учетом ранее проведенных исследований фиброкаутона [2] и представленными выше данными испытания проводили на образцах с двухпроцентным армированием.

По результатам исследований деформационно-прочностных характеристик фиброкаутона при сжатии построен график зависимости продольных и поперечных деформаций от уровня напряжений (рис. 4, рис. 5, рис. 6).

Из анализа приведенных графических зависимостей можно сделать заключение о том, что изменения продольных и поперечных деформаций однотипны. До уровня напряжений, находящихся в пределах  $(0.7 \dots 0.8) \sigma_{пр}$ , эти изменения происходят практически по линейному закону, после чего линейная форма начинает искажаться, приобретая криволинейный характер.

Полученные данные позволяют проследить изменение коэффициента Пуассона в зависимости от напряжения, рис. 7.

Из анализа приведенных графических зависимостей следует, что изменения коэффициента Пуассона носят криволинейный характер с максимумом в области наибольших напряжений и минимумом в области наименьших напряжений. В связи с этим можно выделить два характерных участка на приведенных кривых:

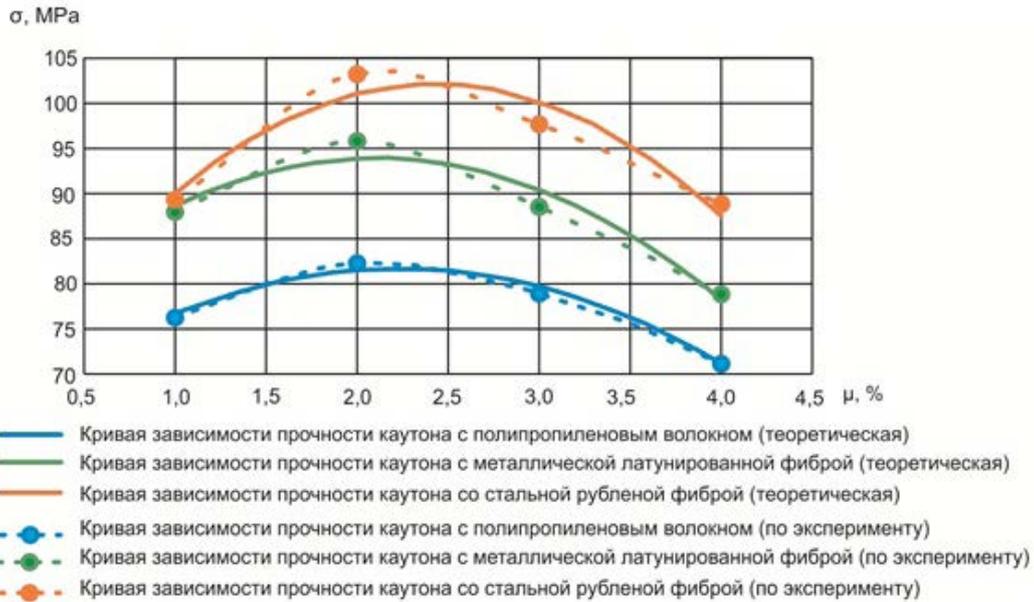


Рис. 3. Прочность фиброкаутон на сжатие в зависимости от процента дисперсного армирования

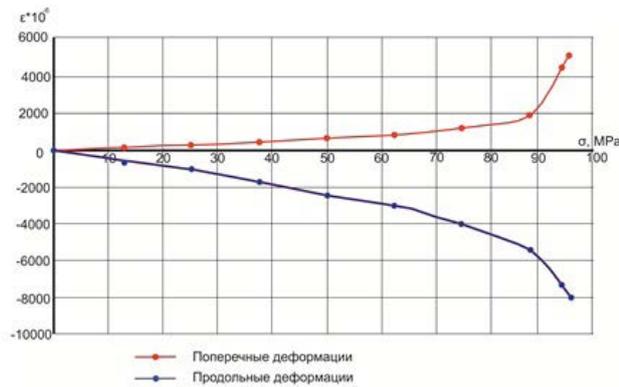


Рис. 4. Диаграммы зависимости между напряжениями и деформациями в фиброкаутоне при сжатии ( $l/d=40/0.8$ )

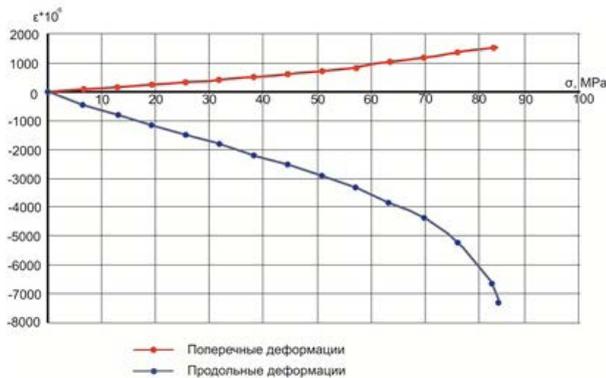


Рис. 5. Диаграммы зависимости между напряжениями и деформациями в фиброкаутоне при сжатии ( $l/d=15/0.3$ )

— первый участок лежит в интервале  $0.75 \sigma_{np}$ , на котором наблюдается незначительное увеличение коэффициента Пуассона;

— второй участок лежит в интервале больше  $0.75 \sigma_{np}$ , на котором наблюдается резкое увеличение коэффициента Пуассона.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что фиброкаутон по своим деформационно-прочностным показателям и трещиностойкости, определенными при действии кратковременных сжимающих нагрузок, соответствует техническим требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в агрессивных средах. Кроме того, следует отметить, что фиброкаутон сохраняет свои конструкционные свойства вплоть до напряжений  $0.85 \sigma_{np}$ .

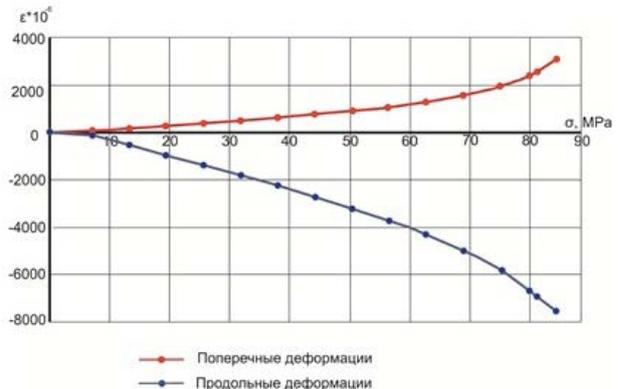


Рис. 6. Диаграммы зависимости между напряжениями и деформациями в фиброкаутоне при сжатии (полипропиленовое волокно)

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ФИБРОКАУТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ

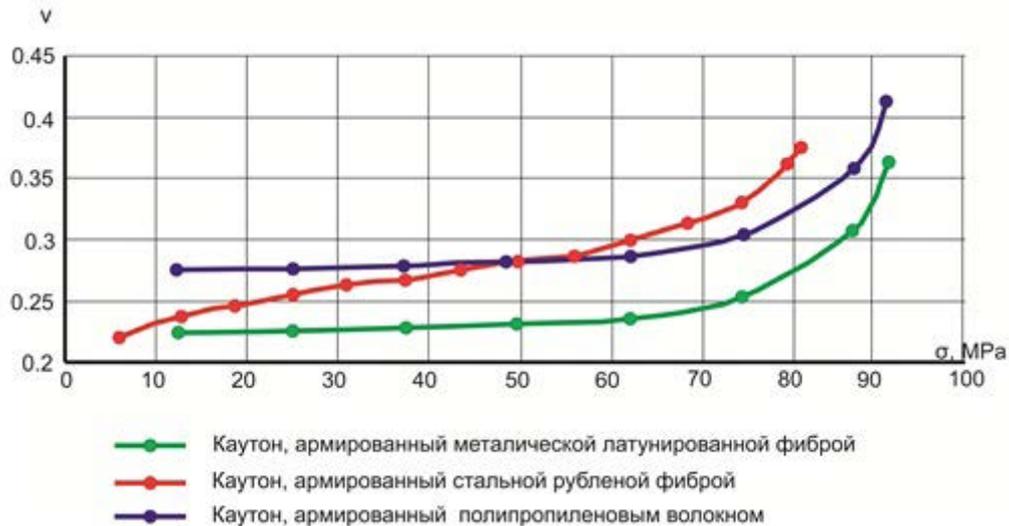


Рис. 7. Зависимости коэффициента Пуассона от напряжения

Для изучения особенностей ударной стойкости каутона дисперсно-армированного различными армирующими волокнами, было изготовлено пять серий образцов.

Серия образцов состояла из плит размером  $750 \times 500$  мм ( $t = 10, 15, 20, 25, 30$  мм), которые испытывали на ударную стойкость согласно ГОСТ 30353—95, рис. 8, рис. 9.

Перед испытанием поверхность опытного участка условно разделили на 6 равных частей (зон), в которых проводили испытания. В каждой зоне намечали 7—9 точек приложения ударов. Точки приложения ударов располагали на рассто-

янии 60—80 мм между ними и не менее 40 мм от краев участка.

По проведенным результатам были получены графики зависимости ударной стойкости от толщины плит и от используемого материала представленные на рис. 10, рис. 11.

Анализом полученных зависимостей установлено, что ударная стойкость практически не зависит от толщины плит, а зависит от вида применяемого материала. Дисперсное армирование каутона повышает порог его ударной стойкости в 1.5...5 раз, в зависимости от применяемых материалов.

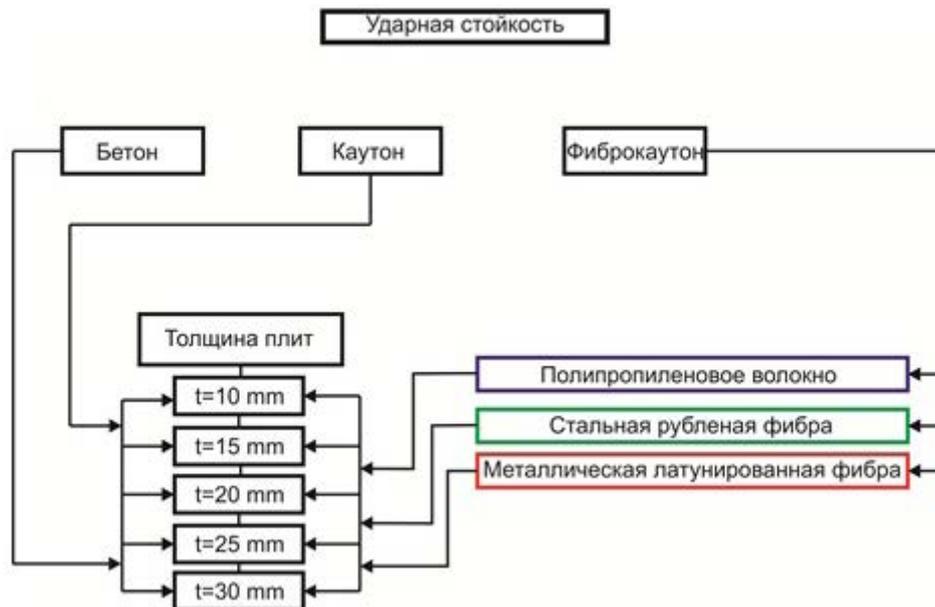


Рис. 8. План эксперимента: 1 — опытный участок; 2 — обрамляющий бортик; 3 — точки приложения ударов

**ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

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

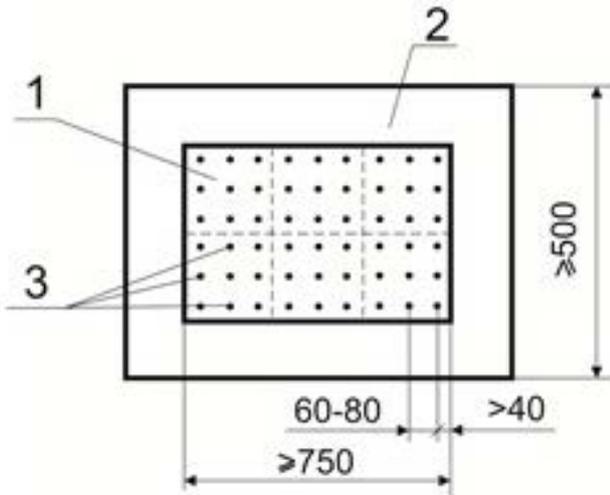


Рис. 9. Схема расположения точек ударов

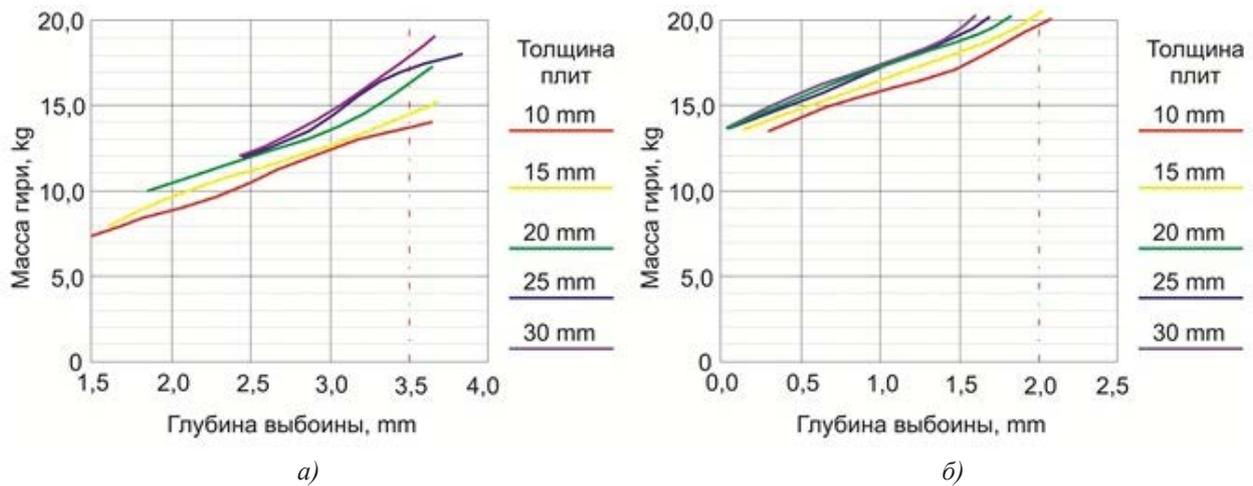


Рис. 10. Зависимость ударной стойкости плиты из каутона (а) и фиброкаутона (б) от её толщины

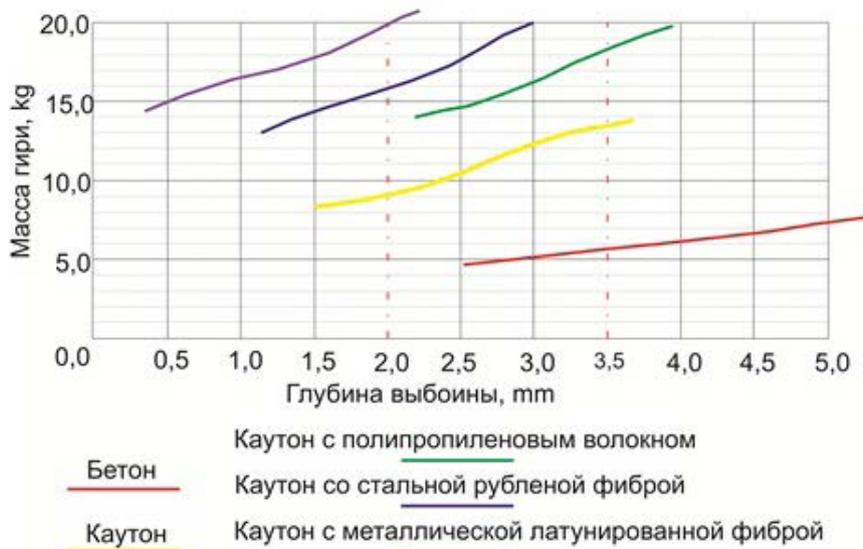


Рис. 11. Зависимость ударной стойкости плиты толщиной 10 мм от материала

каутон армированного полипропиленовым волокном было характерно пластическое разрушение.

Определена технология изготовления образцов в зависимости от вида фибры. Установлено, что очередность введения стальной фибры в смесь не влияет на конечную прочность образцов и не вызывает комкования смеси. Напротив, очередность введения полипропиленовой фибры строго определена и описана выше.

Определен оптимальный процент армирования для каждого вида фибры.

Показано, что ударная стойкость каутоновых плит практически не зависит от их толщины, а определяется видом вводимой фибры. Установлено, что введение в каутонодисперсного армирования повышает порог его ударной стойкости в 1.5...5 раз.

Доказано, что фиброкаутон по своим деформационно-прочностным показателям и трещиностойкости, определенным при действии кратковременных сжимающих нагрузок, соответствует техниче-

ским требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в агрессивных средах. Полученные результаты получили продолжение в других работах [6, 7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24452—80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
2. *Панфилов Д. В.* Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2004. 206 с.
3. *Борисов Ю. М.* Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1998. 230с.
4. *Рабинович Ф. Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2004. С. 560.
5. *Рабинович Ф. Н.* Дисперсно армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. С. 176.
6. *Борисов Ю. М., Поликутин А. Э., Фан Зуй Нгуен* // Научный вестник ВГАСУ. 2010. № 2. С. 6—13.
7. *Борисов Ю. М., Поликутин А. Э., Фан Зуй Нгуен и др.* // Научный вестник ВГАСУ. 2010. № 2. С. 77—85.

---

*Панфилов Д. В.* — к. т. н., доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

*Потанов Ю. Б.* — д. т. н., профессор кафедры строительных конструкций оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

*Каштанов С. В.* — ассистент кафедры строительных конструкций оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: +7 (473) 2715384, e-mail: kashtanov@vgasu.vrn.ru

*Константинов И. А.* — инженер кафедры строительных конструкций оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

*Panfilov D. V.* — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Building Structures, Bases and Foundations of Professor Yu. M. Borisov, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering

*Potapov Yu. B.* — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Building Structures, Bases and Foundations of Professor Yu. M. Borisov, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering

*Kashtanov S. V.* — Assistant of the Department of Building Structures, Bases and Foundations of Professor Yu. M. Borisov, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; tel.: +7 (473) 2715384, e-mail: kashtanov@vgasu.vrn.ru

*Konstantinov I. A.* — Engineer of the Department of Building Structures, Bases and Foundations of Professor Yu. M. Borisov, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering