

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ЗОНЫ ФИБРОВОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ КАУТОНОВЫХ БАЛОК

INFLUENCE OF HIGH OF FIBER REINFORCEMENT ZONE ON THE STRENGTH OF NORMAL SECTIONS OF RUBCON BEAMS

А. В. ЛЕВЧЕНКО

Для изучения степени влияния на прочность нормальных сечений автор изготовил и испытал полимербетонные (каутонные) балки прямоугольного сечения с различной высотой зоны фибрового армирования. В результате проведенных исследований установлено, что высота зоны фибрового армирования влияет на прочность нормальных сечений, но в меньшей степени, чем процент продольного армирования. Ввиду того что слоистые фиброкаутонные изгибаемые элементы по своим прочностным показателям не превосходят фиброкаутонные изгибаемые элементы с фибровым армированием по всей высоте сечения и позволяют лишь уменьшить расход фибры на изделие, но при этом процесс их изготовления значительно сложнее, к применению в производстве они не рекомендуются.

Ключевые слова:

Балка, каутон; нормальные сечения, прочность, прямоугольное сечение, фибра, фиброкаутон

To study the effect of fiber on the strength of normal sections, we produced and tested polymer concrete (rubcon) beams of rectangular section with different heights of the dispersed reinforcement zone. As a result of the research, it was found that the height of the zone of dispersed reinforcement affects the strength of normal sections, but this effect is less than the percentage of longitudinal reinforcement. Also, due to the fact that the layered fibrorubcon bending elements do not exceed the fibrorubcon bending elements with dispersed reinforcement over the all height of the section, and only allow reducing the consumption of fibers for the product, at the same time the process of their manufacture is much more complicated, they are not recommended for use in production.

Keywords:

Beam, fiber, fibrorubcon, normal section, rectangular section, rubcon, strength

Введение

Применение полимербетонных строительных конструкций как альтернатива железобетонным элементам имеет ряд преимуществ, таких как повышенная прочность, трещиностойкость полученных конструкций ввиду более высоких физико-механических характеристик полимербетонов. Каутон – полимербетон на основе жидких каучуков, или, другими словами, каучуковый бетон, обладающий высокими прочностными характеристиками. На основании исследований свойств каучукового бетона [1], а также каучукового бетона с фибровым армированием (фиброкаутон) [2-4] были получены оптимальные составы смеси с добавлением фибры и без нее, которые представлены в далее.

Состав фиброкаутонa

<i>Наименование компонентов</i>	<i>Содержание компонентов, мас. %</i>
Низкомолекулярный каучук СКДН-Н	8,2
Сера техническая	4,0
Тиурам-Д	0,4
Оксид цинка	1,2
Оксид кальция	0,4
Зола-унос ТЭЦ	7,8
Кварцевый песок	24,2
Щебень	52,8
Волокна из отхода металлокорда (фибра)	2,5

Состав каутонa

<i>Наименование компонентов</i>	<i>Содержание компонентов, мас. %</i>
Низкомолекулярный каучук СКДН-Н	8,2
Сера техническая	4,0
Тиурам-Д	0,4
Оксид цинка	1,2
Оксид кальция	0,4
Зола-унос ТЭЦ	7,8
Кварцевый песок	24,2
Щебень	55,3

В работе [3] установлено оптимальное значение отношения длины фибр из волокон металлокорда, соответствующего ГОСТ 14311-85, к его диаметру ($l/d = 100$) для обеспечения наилучших прочностных характеристик и удобоукладываемости смеси. В рассматриваемом случае диаметр волокна составляет 0,3 мм.

Важно отметить, что в составе фиброкаутонa применяются отходы промышленного производства, такие как зола уноса и волокна металлокорда, а также техническая сера,

что свидетельствует о перспективности применения такого полимербетона как материала, способствующего решению проблемы утилизации крупнотоннажных отходов различных отраслей промышленности.

Необходимо также отметить, что уже существует ряд нормативных документов, часть которых базируется на зарубежной литературе (например, ГОСТ Р 57345-2016, основанный на европейском стандарте EN 206), устанавливающих требования к цементным фибробетонам. Европейская ассоциация по готовым бетонным смесям (ERMCO) в 2012 г. подготовила руководство по изготовлению фибробетона «Guidance to fibre concrete – Properties, Specification and Practice in Europe». В СП 52-104-2006* «Сталефибробетонные конструкции» и в СП 297.1325800.2017 «Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования» также содержатся рекомендации по учету работы фибрового армирования при расчете строительных конструкций из цементных бетонов. Указанное свидетельствует о перспективности исследований влияния фибрового армирования на прочностные характеристики полимербетонов, так как такой способ армирования позволяет увеличить прочность материала на растяжение, а также жесткость конструкции в целом.

Экспериментально установлено, что прочность фиброкаутона соответствует классу высокопрочных бетонов, однако модуль упругости каутонa отвечает модулю упругости обычных бетонов, что видно из табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики бетонов

<i>Свойства</i>	<i>Фиброкаутон</i>	<i>Каутон</i>
Прочность при сжатии, МПа	90	80
Прочность при растяжении, МПа	12-13	9-11
Модуль упругости, МПа	29000-30000	26000-27000
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3

При этом нужно отметить, что модуль упругости существенно влияет на жесткость изгибаемых элементов, выполненных из рассматриваемого полимербетона, что также отражено в работах [5-9]. В работе [10] определены оптимальные области применения сжатых элементов из каучукового бетона. Предпосылки для изучения фиброкаутонных изгибаемых конструкций представлены в работах [11,12].

Отличительным свойством каучукового бетона является его практически универсальная химическая стойкость. Из анализа исследований, проведенных В.А. Чмыховым [13], вытекает, что значение коэффициента химической стойкости каутонa в водной среде практически равно единице. Более подробные значения коэффициентов химической стойкости к средам различного типа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты химической стойкости каутона [13]

Вид агрессивной среды	Коэффициент химической стойкости	
	после 1 года экспонирования	прогнозируемый через 10 лет
20%-ный раствор серной кислоты	0,95	0,95
3%-ный раствор азотной кислоты	0,8	0,7
10%-ный раствор лимонной кислоты	0,9	0,8
20%-ный раствор едкого натрия	0,95	0,95
10%-ный раствор едкого калия	0,8	0,65
Насыщенный раствор хлористого натрия	0,9	0,8
Дизельное топливо	0,95	0,95
Вода	1,0	0,99

Из анализа табл. 2 следует, что конструкции, изготовленные из рассматриваемого полимербетона, можно эксплуатировать в большинстве агрессивных сред действующих на предприятиях, значительно увеличивая при этом межремонтные сроки по сравнению с традиционными материалами, такими как сталь и бетон.

Экспериментальная часть

Для изучения влияния высоты зоны фибрового армирования на прочность каутоновых изгибаемых элементов смешанного армирования были изготовлены и испытаны балки прямоугольного сечения с геометрическими параметрами 60×120 мм, расчетная длина 120 см. В качестве одного из варьируемых параметров была выбрана высота зоны фибрового армирования $h_f = 0; 90; 120$ мм., т.е. без фибрового армирования, с фибровым армированием только растянутой зоны и с фибровым армированием по всей высоте сечения. Геометрические параметры балок были назначены на основании анализа литературных источников [5-9]. Следует отметить, что фибра располагается хаотично. Это обусловлено тем, что микротрещины могут образовываться не только в плоскости действия изгибающего момента. Балки были испытаны на чистый изгиб, и такая схема испытания также соответствует работам, посвященным исследованию работы изгибаемых элементов под нагрузкой [5-9]. Схема испытания экспериментальных балок приведена на рис. 1. В работах [14-18] изгибаемые элементы также испытывают по данной схеме.

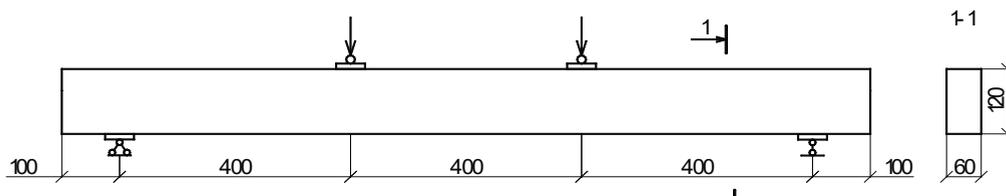
**Рис. 1.** Схема испытания

Схема расположения фибрового армирования и продольного армирования каутоновых балок приведены на рис. 2-4.



Рис. 2. Схема армирования каутоновых балок без фибрового армирования



Рис. 3. Схема армирования каутоновых балок с фибровым армированием на $\frac{3}{4}$ высоты сечения



Рис. 4. Схема армирования каутоновых балок с фибровым армированием по всей высоте сечения

За разрушающую была принята нагрузка, при которой арматурным стержнем достигается предел текучести. Испытания проводились на аттестованном оборудовании в центре коллективного пользования (ЦКП), расположенном в ВГТУ.

В результате проведенного эксперимента были получены значения предельных изгибающих моментов в зависимости от высоты зоны фибрового армирования, которые сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения предельных изгибающих моментов

Шифр	h_f , мм	A_s , см ²	M_{ult} , кНм
БПК-0	0	0,0	1,9
БПК-8	0	0,503	2,96
БПК-12	0	1,131	5,8
БПК 2×12	0	2,26	10,3
БПК-2×14	0	3,08	14
БПК-2×16	0	4,02	15,32
БПКФ-0	90	0,0	2,3
БПКФ-8	90	0,503	3,67
БПКФ-12	90	1,57	6,3
БПКФ-2×12	90	2,26	10,87
БПКФ-2×14	90	3,08	14,80
БПКФ-2×16	90	4,02	16,40
БПФ-0	120	0,0	2,5
БПФ-8	120	0,503	3,78

Шифр	h_f , мм	A_s , см ²	M_{ult} , кНм
БПФ-12	120	1,131	6,77
БПФ-2×12	120	2,26	11,28
БПФ-2×14	120	3,08	15,10
БПФ-2×16	120	4,02	17,52

Примечание: A_s — площадь стержневого армирования; h_f — высота зоны фибрового армирования; M_{ult} — разрушающий изгибающий момент

На рис. 5 приведены графики зависимости изгибающего момента, возникающего в балках с одинаковым содержанием арматуры, при разрушении, от высоты слоя фибрового армирования.

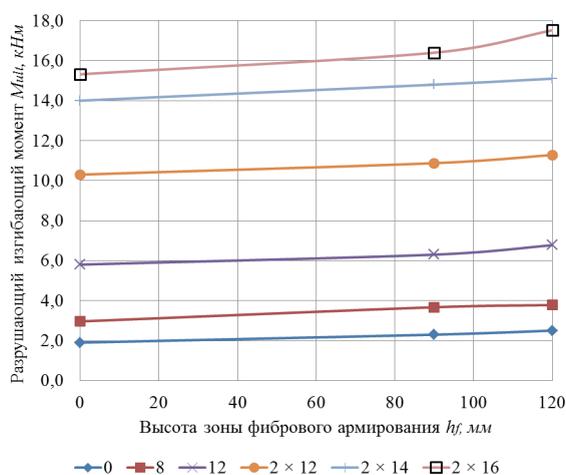


Рис. 5. График зависимости величины разрушающих изгибающих моментов от высоты слоя фибрового армирования

Как показали исследования, изложенные в статье [12], основным фактором, влияющим на прочность нормальных сечений каутоновых изгибаемых элементов, является процент продольного армирования. Однако из анализа рис. 5, где изображены графики зависимости прочности нормальных сечений каутоновых балок смешанного армирования от высоты слоя фибрового армирования, видно, что высота зоны фибрового армирования также оказывает влияние на несущую способность, что соответствует выводам, сделанным в статье [19], но это влияние меньше, чем у процента продольного армирования.

Анализ результатов испытания

Разрушение фиброкаутоновых изгибаемых элементов с расположением фибры только в растянутой зоне происходило аналогично фиброкаутоновым балкам с расположением фибры по всей высоте сечения. В диапазоне значений площади стержневого армирования от 0,503 до 4,02 см² разрушение происходило по растянутой зоне при достижении арматурой предела текучести, а балки с площадью стержневого армиро-

вания $4,02 \text{ см}^2$ работали как перearмированные элементы, и разрушение произошло в результате достижения полимербетоном сжатой зоны предела прочности на сжатие. Для дальнейшего увеличения несущей способности фиброкаутонных изгибаемых элементов с расположением фибры только в растянутой зоне при значении площади стержневого армирования больше $3,08 \text{ см}^2$ необходимо армировать сжатую зону. Разрушение фиброкаутонных элементов с расположением фибры на $\frac{3}{4}$ высоты сечения и площадью стержневого армирования $4,02 \text{ см}^2$ по сжатой зоне, в отличие от балок без фибрового армирования и балок с расположением фибры по всей высоте сечения с аналогичным содержанием арматуры, обусловлено тем, что волокна металлокорда выступают в качестве дополнительного армирования, тем самым повышая прочность растянутой зоны элемента, при этом прочность материала сжатой зоны ниже прочности фиброкаутона в аналогичных балках с фибровым армированием по всей высоте сечения.

Заключение

Из графиков зависимости прочности нормальных сечений каутонных балок от высоты зоны фибрового армирования видно, что увеличение толщины слоя дисперсного армирования повышает прочность нормальных сечений. Очевидно, что этот фактор оказывает незначительное влияние на прочность нормальных сечений рассматриваемых балок по сравнению с процентом продольного армирования. С увеличением высоты зоны фибрового армирования каутона с 0 до 12 см для балок с процентом армирования 0,8% ($A_s = 0,503 \text{ см}^2$) показатель прочности нормальных сечений увеличивается на 28%, для балок с $\mu = 6,26\%$ ($A_s = 4,02 \text{ см}^2$) показатель прочности нормальных сечений — на 14%. Несущая способность изгибаемых элементов с фибровым армированием только растянутой зоны выше подобных каутонных балок. Это объясняется тем, что растягивающие усилия с момента образования трещины воспринимаются не только арматурным стержнем, но и волокнами металлокорда. Фибровое армирование также повышает момент трещинообразования, тем самым увеличивая продолжительность совместной работы арматурного стержня с материалом растянутой зоны, т.е. растягивающие напряжения, возникающие в нормальном сечении, перераспределяются на арматурный стержень позже, чем в балках без фибрового армирования. Однако ввиду того что слоистые фиброкаутонные изгибаемые элементы по своим прочностным показателям не превосходят фиброкаутонные изгибаемые элементы с фибровым армированием по всей высоте сечения и позволяют лишь уменьшить расход фибры на изделие, при этом процесс их изготовления значительно сложнее, к применению в производстве они не рекомендуются.

Библиографический список

1. *Figovsky O., Beilin D., Blank N., et al.* Development of polymer concrete with polybutadiene matrix // *Cement and Concrete Composites*. — Vol. 6. — №18. — 1996. — P. 437-444.
2. *Figovsky O.* New polymeric matrix for durable concrete / *Proceedings of the Interna-*

tional Conference on Cement Combinations for Durable Concrete, 2005. — P. 269-276.

3. *Панфилов Д.В.* Дисперсно-армированные строительные композиты на основе полибутадиенового олигомера: дис. ... канд. техн. наук Дмитрий Вячеславович Панфилов. Воронеж, 2004.

4. *Борисов Ю.М., Панфилов Д.В., Капитанов С.В., Юдин Е.М.* Дисперсно-армированные строительные композиты // Строительная механика и конструкции. — 2010.— № 2 (5). — С. 32-37.

5. *Нгуен Фан Зуй.* Двухслойные каутоно-бетонные изгибаемые элементы строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010.

6. *Борисов Ю.М., Поликутин А. Э., Нгуен Фан Зуй.* Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений двухслойных каутоно-бетонных изгибаемых элементов строительных конструкций // Научный вестник ВГАС «Архитектура и строительство». — Воронеж. — 2010. я № 2. — С. 18-24.

7. *Pinaev S. A. et al.* Application of Polymer-cement Corrosion Protection for Different Strength Concrete of Reinforced Concrete Elements / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 463, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032012> (2018).

8. *Potapov Y. B., Pinaev S. A., Arakelyan A. A., Barabash A. D.* Polymer-cement material for corrosion protection of reinforced concrete elements, Solid state phenomena. 2016. №871. P. 104 - 109.

9. *Potapov Y., Polikutin A., Panfilov D., Okunev M.* Comparative analysis of strength and crack resistance of normal sections of bent elements of T-sections, made of rubber concrete, cauton reinforcement and concrete / MATEC Web of Conferences. 2016. №73. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167304018>

10. *Пинаев С.А.* Короткие сжатые элементы строительных конструкций из эффективного композита на основе бутадиенового полимера: дис. ... канд. техн. наук. Сергей Александрович Пинаев. Воронеж, 2001.

11. *Polikutin A. E. et al.* Experimental Research of the Durability, Crack Resistance of the Normal Sections of Bending Elements Produced of Rubber Concrete with Fiber and their Deformability / Materials Science Forum. — 2018. — № 931. — P. 232-237.

12. *Поликутин А.Э., Потанов Ю.Б., Левченко А.В.* Экспериментальные исследования влияния дисперсного армирования на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из каутона // Известия высших учебных заведений. Строительство. — Новосибирск. — 2018. — №8. — С. 28-35

13. *Чмыхов В. А.* Соппротивление каучукового бетона действию агрессивных сред: дис. ... канд. техн. наук. Виталий Александрович Чмыхов. Воронеж, 2002.

14. *Fangping Liu, Jianting Zhou.* Experimental Research on Fatigue Damage of Reinforced Concrete Rectangular Beam // KSCE Journal of Civil Engineering, 2018. — №9. — С. 3512-3523

15. *Yang I.-H. Joh C., Kim K.-C.* A Comparative Experimental Study on the Flexural Behavior of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete and High-Strength Concrete Beams // Advances in Materials Science and Engineering. — 2018. — №7390798.

16. *Lili Sui, Qianli Zhong, Kequan Yu, Feng Xing, Pengda Li, Yingwu Zhou.* Flexural

Fatigue Properties of Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composites (UHP-ECC) Reinforced by Polymer Fibers // *Polymers*. — 2018. — №8. — P. 892.

17. *Chen S., Zhang R., Jia L.-J., Wang J.-Y.* Flexural behavior of rebar-reinforced ultra-high-performance concrete beams // *Magazine of Concrete Research*. — 2018. — №19. — P. 997-1015.

18. *Travush V.I. Konin D.V., Krylov A.S.* Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // *Magazine of Civil Engineering*. — 2018. — №1. — P. 90-100.

19. *Корнеев А.М., Бузина О.П., Суханов А.В.* Детерминированная математическая модель и алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с дискретными волокнами // *Современные наукоемкие технологии*. — 2016. — № 9. — С. 57-62.

Автор

Артём Владимирович ЛЕВЧЕНКО, аспирант кафедры «Строительные конструкции, основания и фундаменты им. проф. Ю.М. Борисова» Воронежского государственного технического университета, Воронеж

Artem LEVCHENKO, Postgraduate student of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu.M. Borisov of Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh

e-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru