

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Предпосылки учета фибрового армирования в расчете нормальных сечений фиброкаутонных балок

УДК 691.342

Поликутин Алексей Эдуардович

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции основания и фундаменты им. проф. Ю.М. Борисова» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж); e-mail: a.pl@mail.ru

Потапов Юрий Борисович

Д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции основания и фундаменты им. проф. Ю.М. Борисова» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж); e-mail: apl-sc@mail.ru

Левченко Артем Владимирович

Аспирант кафедры «Строительные конструкции основания и фундаменты им. проф. Ю.М. Борисова» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж); e-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru

Статья получена: 25.12.2018. Рассмотрена: 29.12.2018. Одобрена: 02.01.2019. Опубликовано онлайн: 26.03.2019. ©РИОР

Аннотация. Разработать рекомендации по применению полимербетонных изгибаемых конструкций невозможно без создания или оптимизации существующих методов расчета, особенно это актуально для изгибаемых элементов, в которых применяется равноуровневое армирование. Для применения (особенно в условиях воздействия агрессивных сред) в качестве материала изготовления изгибаемых

конструкций нами предлагается каучуковый бетон — полимербетон, которому свойственны высокие прочностные характеристики. Важно отметить, что в составе фиброкаутон применяются отходы промышленного производства, такие как зола-унос и волокна металлокорда. Балки из каутон и фиброкаутон были испытаны на чистый изгиб — наиболее характерный вид нагружения при изучении таких элементов.

PREREQUISITES FOR ACCOUNTING OF FIBER REINFORCEMENT WHEN CALCULATING NORMAL SECTIONS OF FIBRORUBCON BEAMS

Polikutin Aleksei Eduardovich

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu.M. Borisov, Voronezh State Technical University, Voronezh; e-mail: a.pl@mail.ru

Potapov Yuri Borisovich

Doctor of Engineering, Professor, Department of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu.M. Borisov, Voronezh State Technical University, Voronezh; e-mail: apl-sc@mail.ru

Levchenko Artem Vladimirovich

Postgraduate Student, Department of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu.M. Borisov, Voronezh State Technical University, Voronezh; e-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru

Manuscript received: 25.12.2018. Revised: 29.12.2018. Accepted: 02.01.2019. Published online: 26.03.2019. ©RIOR

Abstract. It is impossible to develop recommendations for the use of polymer-concrete bending structures without the creation or optimization of existing methods of calculation, this is especially true for bending elements that use multi-level reinforcement. For use as a material for the manufacture of bending structures (especially under the influence of aggressive environment), we offer rubber concrete — polymer-concrete, which is characterized by high strength characteristics. It is important to note that the composition of fibrorubcon used industrial waste such as fly ash and steel cord. Beams made from cauton and fibrocacahuton were tested for pure bending — the most characteristic form of loading in the study of such elements. As a result of the theoretical studies of polymer concrete beams, the prerequisites were established for the calculation of the first group of limit states of rubcon beams and the method for calculating fibrorubcon beams was optimized. It was determined that fiber reinforcement with a percentage of reinforcement by mass of the rubcon element equal to 2.5% corresponds to the work of rod longitudinal reinforcement with a value of $\mu = 0.34\%$.

Keywords: rubcon, fiber, fibrorubcon, beam, normal cross-sections, rectangular cross-section, bending element, strength.

В результате проведенных теоретических исследований полимербетонных балок были установлены предпосылки для расчета по первой группе предельных состояний каутоновых и оптимизирована методика расчета фиброкаутоновых балок. Определено, что фибровое армирование с процентом армирования по массе каутонового элемента, равное 2,5%, соответствует работе стержневого продольного армирования со значением $\mu = 0,34\%$.

Ключевые слова: каутон, фибра, фиброкаутон, балка, нормальные сечения, прямоугольное сечение, изгибаемый элемент, прочность.

Применение полимербетонов наиболее актуально в изделиях или элементах, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной среды различного типа. Каучуковый бетон или сокращенно каутон — полимербетон, обладающий практически универсальной химической стойкостью и высокой прочностью на основе жидких каучуков. Применение каутона в конструкциях на данный момент ограничено отсутствием рекомендации по их проектированию и расчета. Исходя из анализа работ [1–6], а также из анализа нормативной литературы, можно сказать, что на прочность нормальных сечений в большей степени влияет площадь стержневого армирования. В работах [7; 8] установлено, что фибра также вносит свой вклад в работу сечений изгибаемых элементов, а в работах [9; 10] была установлена степень влияние дисперсного армирования из различного вида волокон на прочностные характеристики каутона. Исследования, проведенные в работе [11], подтверждают положительное влияние стальной фибры, введенной в состав обычного бетона, на прочностные характеристики материала.

В результате экспериментальных исследований, изложенных в статье [8], и проведенного анализа нормативной литературы были определены предпосылки метода расчета прочности нормальных сечений каутоновых изгибаемых элементов без дисперсного армирования:

- 1) расчет производится в момент разрушения образца;
- 2) растягивающие усилия воспринимает арматурный стержень;
- 3) значения напряжений в материале сжатой зоны достигают предела прочности, неза-

висимо от того, по какой зоне разрушается материал.

Несущую способность определяем согласно уравнениям равновесия изгибающих моментов относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры:

$$M \leq R_k b x (h_0 - 0,5x), \quad (1)$$

где x — высота сжатой зоны;

R_k — предел прочности каутона на сжатие;
 b — ширина сечения.

Высота сжатой зоны определяется из суммы проекций внутренних усилий на продольную ось элемента.

Для каутоновых изгибаемых элементов без дисперсного армирования:

$$x = R_s A_s / R_k b, \quad (2)$$

где R_s — расчетное сопротивление арматуры. Стоит отметить, что в материалах статьи вместо R_s применялся σ_t — экспериментальный предел текучести для обеспечения сходимости расчетных значений с экспериментальными, так как за разрушающую нагрузку во время испытаний принималась та, при которой арматурной стальной достигается предел текучести;

A_s — площадь стержневой арматуры;

Результаты расчета по приведенной методике приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения прочности нормальных сечений каутоновых изгибаемых элементов

Шифр балок	$\mu, \%$	$M_u^{\text{exp}}, \text{кНм}$	$M_u^r, \text{кНм}$	$\Delta M_u, \%$
БПК-8	0,78	2,96	2,71	8,45
БПК-12	1,83	5,8	5,75	0,78
БПК-2x12	3,58	10,3	10,69	-3,84
БПК-2x14	4,93	14	13,61	2,77
БПК-2x16	6,38	15,32	16,35	-6,75

Примечание: M_u^{exp} — экспериментальный разрушающий изгибающий момент; M_u^r — расчетный разрушающий изгибающий момент.

Из табл. 1 видно, что «стандартная» методика расчета прочности нормальных сечений балок (согласно СП 63.13330.2012) обеспечивает достаточную сходимость результатов расчета с экспериментальными значениями.

Однако расчет по приведенной выше методике для фиброкаутонных элементов не обеспечивает должной сходимости, что говорит о необходимости учета работы фибровых волокон в трещине в процессе их развития. С целью определения степени влияния фибровых волокон на прочность нормальных сечений нами были изготовлены две серии балок без стержневого армирования, изготовленные из каутона и фиброкаутонна, результаты испытания которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные значения прочности нормальных сечений каутоновых изгибаемых элементов без стержневого армирования

Шифр балок	μ %,	M_u^{exp} , кНм
БПК — 0 — 1	0	1,93
БПК — 0 — 2	0	1,91
БПК — 0 — 3	0	1,87
БПФ — 0 — 1	0	2,4
БПФ — 0 — 2	0	2,5
БПФ — 0 — 3	0	2,6

На основании данных, полученных в табл. 1 и 2, были построены графики (рис. 1) зависимости изгибающего разрушающего момента от процента продольного армирования для балок без стержневого армирования и для балок, армированных одним стержнем диаметром 8 мм.

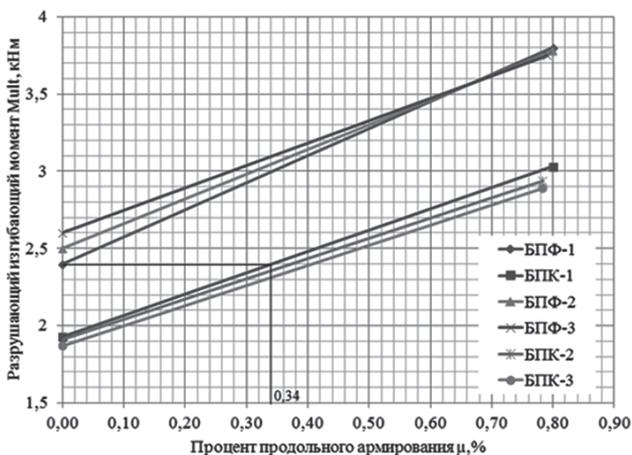


Рис. 1. Графики зависимости изгибающего момента от процента продольного армирования

Как можно увидеть, эквивалентный процент продольного стержневого армирования, учитывающий работу волокон металлокорда в нор-

мальных сечениях, равен $\sim 0,34\%$. Данное значение μ соответствует $2,5\%$ дисперсного армирования от массы элемента. Следовательно, для фиброкаутонных изгибаемых элементов можно учесть влияние дисперсного армирования при расчете по первой группе предельных состояний путем добавления эквивалентной дисперсному стержневой площади армирования к площади продольного армирования:

$$x = R_s(A_s + A_p)/R_{fk}b, \quad (3)$$

где R_{fk} — предел прочности фиброкаутонна на сжатие.

Результаты расчета прочности фиброкаутонных элементов по оптимизированной методике в сравнении с экспериментальными результатами приведены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения прочности нормальных сечений фиброкаутонных изгибаемых элементов

Шифр балок	μ , %	M_u^{exp} , кНм	M_u^i , кНм
БПФ — 8	0,80	3,78	3,77
БПФ — 12	1,80	6,77	6,75
БПФ — 2x12	3,55	11,28	11,70
БПФ — 2x14	4,94	15,10	14,85
БПФ — 2x16	6,26	17,52	17,99

Очевидно, что подобный способ учета фибрового армирования при расчете обеспечил достаточную сходимость расчетных значений разрушающего изгибающего момента с экспериментальными значениями.

Выводы и рекомендации

Установлены предпосылки для расчета фиброкаутонных изгибаемых элементов. Определено, что фибровое армирование с процентом армирования по массе каутонового элемента, равное $2,5\%$, соответствует работе стержневого продольного армирования со значением $\mu = 0,34\%$. Оптимизирована методика расчета по первой группе предельных состояний, изложенная в СП, для обеспечения необходимой сходимости результатов расчета с экспериментальными значениями.

Литература

1. *Нгуен Фан Зуй*. Двухслойные каутоно-бетонные изгибаемые элементы строительных конструкций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Нгуен Фан Зуй. — Воронеж, 2010. — 185 с.
2. *Борисов Ю.М.* Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений двухслойных каутоно-бетонных изгибаемых элементов строительных конструкций [Текст] / Ю.М. Борисов, А.Э. Поликутин, Нгуен Фан Зуй // Научный вестник ВГАСУ «Архитектура и строительство». — 2010. — № 2. — С. 18–24.
3. *Пинаев С.А.* Влияние полимерцементной защиты на трещиностойкость железобетонных изгибаемых элементов [Текст] / С.А. Пинаев, Франсиско Савити Матиас да Фонсека / Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии» // Научный вестник ВГАСУ. — 2011. — № 9. — С. 85–88.
4. *Пинаев С.А.* Короткие сжатые элементы строительных конструкций из эффективного композита на основе бутадиенового полимера [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.А. Пинаев. — Воронеж, 2001. — 191 с.
5. *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.
6. *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, caouton reinforcement and concrete // MATEC Web of Conferences. 2016. № 73. — URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167304018/>
7. *Корнеев А.М.* Детерминированная математическая модель и алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с дискретными волокнами [Текст] / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 9. — С. 57–62.
8. *Поликутин А.Э.* Экспериментальные исследования влияния дисперсного армирования на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из каутона [Текст] / А.Э. Поликутин, Ю.Б. Потопов, А.В. Левченко // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2018. — № 8. — С. 28–35.
9. *Борисов Ю.М.* Дисперсно-армированные строительные композиты [Текст] / Ю.М. Борисов, Д.В. Панфилов, С.В. Каштанов, Е.М. Юдин // Строительная механика и конструкции. — 2010. — № 2. — С. 32–37.
10. *Панфилов Д.В.* Дисперсно армированные строительные композиты на основе полибутадиенового олигомера [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Панфилов. — Воронеж, 2004. — 188 с.
11. *Song P.S.* Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete // P.S. Song, S.H. Wang // Construction and Building Materials. 2004. Vol. 18. Issue 9. P. 669–673.

References

1. *Nguen Fan Zuy. Dvukhsloynnye kautono-betonnye izgibaemye elementy stroitel'nykh konstruksiy. Kand. Diss.* [Double-layer caouton-concrete bent elements of building structures. Cand. Diss.]. Voronezh, 2010. 185 p.
2. *Borisov Yu.M., Polikutin A. E., Nguen Fan Zuy Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniya normal'nykh secheniy dvukhsloynnykh kautono-betonnykh izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstruksiy* [The stress-strain state of normal sections of two-layer caouton-concrete bent elements of building structures]. *Nauchnyy vestnik VGAS «Arkhitektura i stroitel'stvo»* [Scientific Journal VGAS "Architecture and Construction"]. Voronezh, 2010, I. 2, pp. 18–24.
3. *Pinaev S.A., Fransisko Saviti Matias Da Fonseka, Vliyanie polimertsementnoy zashchity na treshchinostoykost' zhelezobetonnnykh izgibaemykh elementov* [Effect of polymer-cement protection on the crack resistance of reinforced concrete bending elements]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Materialy mezhhregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Vysokie tekhnologii v ekologii"* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering // Proceedings of the Interregional Scientific and Practical Conference "High Technologies in Ecology"]. 2011, I. 9, pp. 85–88.
4. *Pinaev S.A. Korotkie szhatye elementy stroitel'nykh konstruksiy iz effektivnogo kompozita na osnove butadienovogo polimera. Kand. Diss.* [Short squeezed elements of building structures from an effective composite based on a butadiene polymer. Cand. Diss.]. Voronezh, 2001. 191 p.
5. *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.
6. *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, caouton reinforcement and concrete // MATEC Web of Conferences. 2016. № 73. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167304018/>
7. *Korneev A.M., Buzina O.P., Sukhanov A.V.* Determinirovannaya matematicheskaya model' i algoritm analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh elementov s diskretnymi voloknami [Deterministic mathematical model and algorithm for analyzing the stress-strain state of bent elements with discrete fibers]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2016, I. 9, pp. 57–62.
8. *Polikutin A.E., Potapov Yu.B., Levchenko A.V.* Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya dispersnogo armirovaniya na prochnost' normal'nykh secheniy izgibaemykh elementov iz kautona [xperimental studies of the effect of disperse reinforcement on the strength of normal sections of bendable elements from caoutote]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building]. Novosibirsk, 2018, I. 8, pp. 28–35.
9. *Borisov Yu.M., Panfilov D.V., Kashtanov S.V., Yudin E.M.* Dispersno-armirovannyye stroitel'nye kompozity [Dispersion-reinforced building composites]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii* [Structural Mechanics and Structures]. 2010, I. 2, pp. 32–37.
10. *Panfilov D.V. Dispersno-armirovannyye stroitel'nye kompozity na osnove polibutadienovogo oligomera. Kand. Diss.* [Dispersion-reinforced construction composites based on polybutadiene oligomer. Cand. Diss.]. Voronezh, 2004. 188 p.
11. *Song P.S., Wang S.H.* Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2004. Vol. 18. Issue 9. P. 669–673.