

## Трещиностойкость балок из свехвысокопрочного сталефибробетона

*М.М. Тамов, Ю.К.И. Абуизеих, Никора Н.И.*

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар*

**Аннотация:** Рассмотрены особенности образования и раскрытия нормальных трещин в балках из свехвысокопрочного сталефибробетона. Проведена серия лабораторных испытаний, включавшая семнадцать балок прямоугольного и таврового сечений с различными коэффициентами продольного армирования, объемным содержанием и формой стальных фибр (прямая, волновая). Установлено, что добавление стальных фибр повышает трещиностойкость балок, способствует равномерному распределению трещин и увеличивает их несущую способность. Разрушение непереармированных балок происходит в результате интенсивного выдергивания фибр в одной или нескольких нормальных трещинах. До начала этой локализации деформаций растянутой зоны, происходящей одновременно с наступлением текучести арматуры, ширина раскрытия трещин в балках с фибрами не превышает 0,25 мм. Полученные данные могут послужить основой для совершенствования расчетных моделей и оптимизации проектных решений изгибаемых конструкций из свехвысокопрочного сталефибробетона.

**Ключевые слова:** свехвысокопрочный бетон, балки, изгибающий момент, стальные фибры, нормальные трещины.

Свехвысокопрочный бетон (СВПБ) – это новый композитный материал на цементной основе, обладающий повышенной прочностью и долговечностью [1]. Добавление стальных фибр в матрицу СВПБ дополнительно повышает его прочность на растяжение и обеспечивает пластичное поведение материала [2]. Областью рационального применения СВПБ являются конструкции объектов инфраструктуры, морских и промышленных сооружений [3]. Для широкого внедрения СВПБ в проектирование и строительство необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление особенностей работы СВПБ-конструкций при различных видах напряженно-деформированного состояния.

Ранее выполненными исследованиями вскрыты некоторые отличия характера образования и раскрытия трещин в СВПБ-балках. Фибры сдерживают раскрытие трещин, в результате чего характерной для СВПБ-балок на второй стадии напряженно-деформированного состояния является

картина с часто расположенными мелкими трещинами [4, 5]. Это способствует перераспределению напряжений по длине балке, повышает ее пластичность, а также увеличивает долговечность балок за счет сдерживания проникновения агрессивных сред. По мере приближения к разрушению, одна или несколько трещин начинают раскрываться интенсивнее остальных – происходит так называемая «локализации» трещин [6, 7] из-за интенсивного выдергивания фибр из бетонной матрицы в этих сечениях. На этой стадии наступает текучесть продольной арматуры в местах пересечения с локализованными трещинами [5, 8]. Таким образом, параметры армирования играют ключевую роль в определении поведения СВПБ-балок под нагрузкой.

Для исследования влияния величин коэффициентов стержневого и фибрового армирования СВПБ-балок на их работу при действии изгибающих моментов в лаборатории строительных конструкций КубГТУ проведена серия экспериментальных исследований. Балки испытывали в замкнутой стальной силовой раме в перевернутом положении. Нагружение балок осуществляли двумя сосредоточенными силами, расположенными на расстоянии 500 мм друг от друга симметрично относительно середины (рис. 1, а). Прикладываемую нагрузку контролировали датчиком силы, установленным под одним из концов балок.

Согласно плану (таблица 1) были испытаны 17 моделей СВПБ-балок: 15 балок прямоугольного сечения (№1–№15 в таблице 1, рис. 1, б) и 2 балки таврового сечения с полкой в растянутой зоне (№16 и №17 в таблице 1, рис. 1, в). Необходимость в устройстве полки была продиктована сложностью размещения в растянутой зоне балок №16 и №17 большого количества арматуры, соответствующего принятому для этих балок коэффициенту продольного армирования  $\mu_s$ . Балки имели высоту сечения 200 мм и длину 2340 мм.

---

Таблица № 1

План экспериментальных исследований СВПБ-балок на изгибе

№ п/п	Группа балок	Шифр	$d, \text{ мм}$	$n, \text{ шт}$	$\mu_s, \%$	$\mu_f, \%$	Тип фибры
1	Группа 1 $\mu_s=0,31\%$	Ф0-030	6	2	0,31	0	-
2		ПФ1-030				1	прямая
3		ПФ2-030				2	прямая
4		ВФ1-030				1	волновая
5		ВФ2-030				2	волновая
6	Группа 2 $\mu_s=0,87\%$	Ф0-085	10	2	0,87	0	-
7		ПФ1-085				1	прямая
8		ПФ2-085				2	прямая
9		ВФ1-085				1	волновая
10		ВФ2-085				2	волновая
11	Группа 3 $\mu_s=2,56\%$	Ф0-250	14	3	2,56	0	-
12		ПФ1-250				1	прямая
13		ПФ2-250				2	прямая
14		ВФ1-250				1	волновая
15		ВФ2-250				2	волновая
16	Гр. 4 $\mu_s=5,1\%$	Ф0-500	14	6	5,13	0	-
17		ВФ1,5-500				1,5	волновая

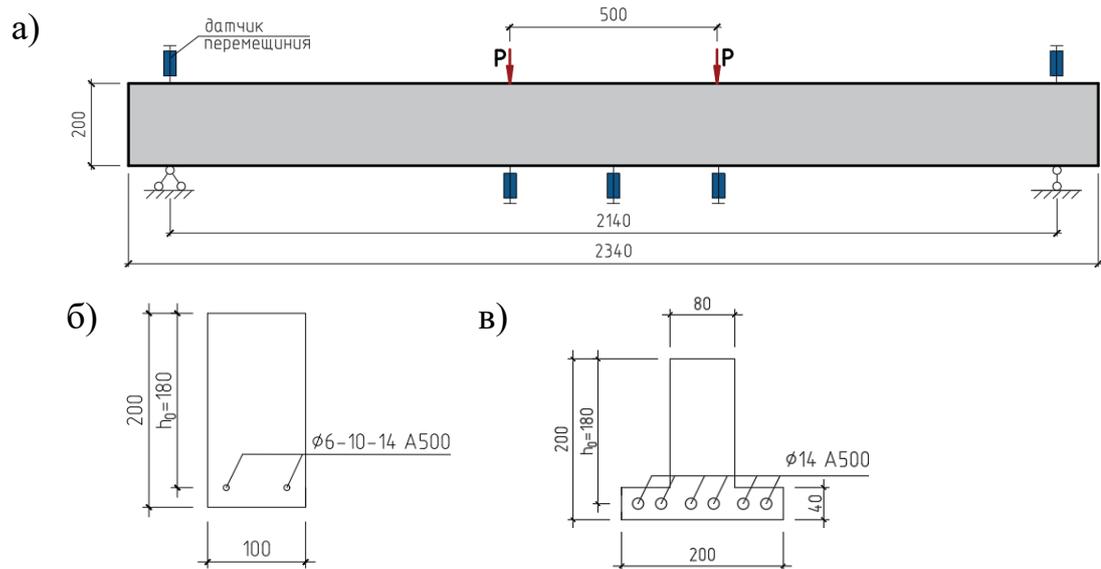


Рис. 1. – Продольный профиль балок и схема их нагружения (а), сечения прямоугольной (б) и двутавровой (в) балок

В рамках эксперимента оценивали влияние на напряженно-деформированное состояние СВПБ-балок коэффициента продольного армирования  $\mu_s$ , объемного содержания  $\mu_{fv}$  и типа фибр (волновая и прямая). В таблице 1 опытные образцы разделены на четыре серии по значению  $\mu_s$ . Внутри серий варьировали  $\mu_{fv}$  и тип фибр. В каждую из серий были включены эталонные образцы, не имеющие фибрового армирования (образцы Ф0-...).

Дисперсное армирование опытных образцов СВПБ-балок в подавляющем большинстве ранее выполненных исследований было выполнено прямой фиброй [9, 10], в редких случаях – анкерной и скрученной фиброй [11]. Вместе с тем представляет интерес дисперсное армирование СВПБ-балок волновой фиброй, получившей широкое распространение в России и Белоруссии [12]. Поэтому в план эксперимента были включены образцы с волновой фиброй производства ОАО «БМЗ» (Жлобин, Белоруссия).

Балки группы 4 с высоким содержанием арматуры были испытаны с целью исследования характера работы под нагрузкой и разрушения СВПБ-балок при значениях  $\mu_s$ , близких к предельным ( $\xi \geq \xi_R$ ).

В ходе испытаний балок регистрировали нагрузки образования нормальных трещин. В перерывах между этапами нагружений отмечали концы трещин, измеряли ширину их наибольшего раскрытия. В таблице 2 приведены моменты при образовании трещин и предельные измеренные значения ширины их раскрытия. На рис. 2 представлены примеры построенных картин трещин на этапах, предшествующих разрушению балок, а также графиков раскрытия трещин с ростом момента.

Внутри групп 1 ( $\mu_s = 0,31 \%$ ), 2 ( $\mu_s = 0,87 \%$ ) и 4 ( $\mu_s = 5,1 \%$ ) момент образования первых трещин  $M_{crc}$  увеличивался с ростом концентрации фибр  $\mu_{fv}$ . В группе 3 по полученным значениям  $M_{crc}$  такой закономерности не

прослеживается. Здесь необходимо иметь в виду, что осмотр балок производился лишь в период выдержки их под нагрузкой, и момент

Таблица № 2

Данные по образованию и раскрытию трещин

Группа балок	Шифр балки	$M_{crc}$ , кНм	$\bar{a}_{crc}$ , мм	$a_{crc}^{max}$ , мм	$\bar{l}_s$ , мм
1 $\mu_s=0,31\%$	Ф0-030	1,7	0,11	0,18	51
	ПФ1-030	4,2	0,04	0,06	41
	ПФ2-030	5,0	0,08	0,14	83
	ВФ1-030	5,0	0,04	0,12	43
	ВФ2-030	6,6	0,03 / 0,04*	0,06 / 0,2*	32
2 $\mu_s=0,87\%$	Ф0-085	4,2	0,068	0,16	55
	ПФ1-085	4,2	0,04	0,07	45
	ПФ2-085	8,3	0,06	0,15	50
	ВФ1-085	4,15	0,04	0,1	39
	ВФ2-085	8,3	0,04	0,07	36
3 $\mu_s=2,56\%$	Ф0-250	4,15	0,07	0,12	53
	ПФ1-250	4,15	0,06	0,11	40
	ПФ2-250	8,3	0,05 / 0,18*	0,07 / 0,75*	33
	ВФ1-250	4,15	0,04 / 0,17*	0,03 / 0,7*	38
	ВФ2-250	4,2	0,06	0,16	54
4 $\mu_s=5,1\%$	Ф0-500	4,15	0,06	0,18	62
	ВФ1,5-500	16,6	0,08	0,23	49

Примечания:

1.  $M_{crc}$  – изгибающий момент при образовании трещин;  $\bar{a}_{crc}$  и  $a_{crc}^{max}$  – соответственно среднее и максимальное раскрытие трещин при нагрузках, близких к разрушающим;  $\bar{l}_s$  – среднее расстояние между трещинами.

2. Фибробетонные балки из групп 1–3 разрушились по «локализованным» трещинам. На стадии «локализации» критической трещины измерения ширины ее раскрытия не проводили, т.к. это представляло опасность. Исключение сделали для балок ВФ2-030, ПФ2-250 и ВФ1-250, где несмотря на имевшиеся риски эти измерения были выполнены. Полученные значения  $a_{crc}$  в таблице отмечены «звездочкой».

образования некоторых трещин мог быть определен неточно. Наибольшим влияние фибр на нагрузку образования первых трещин было в группе 4 (переармированные балки), где разница в значениях  $M_{crc}$ ,

полученных при испытаниях в балок с фибрами и без таковых, оказалась четырехкратной.

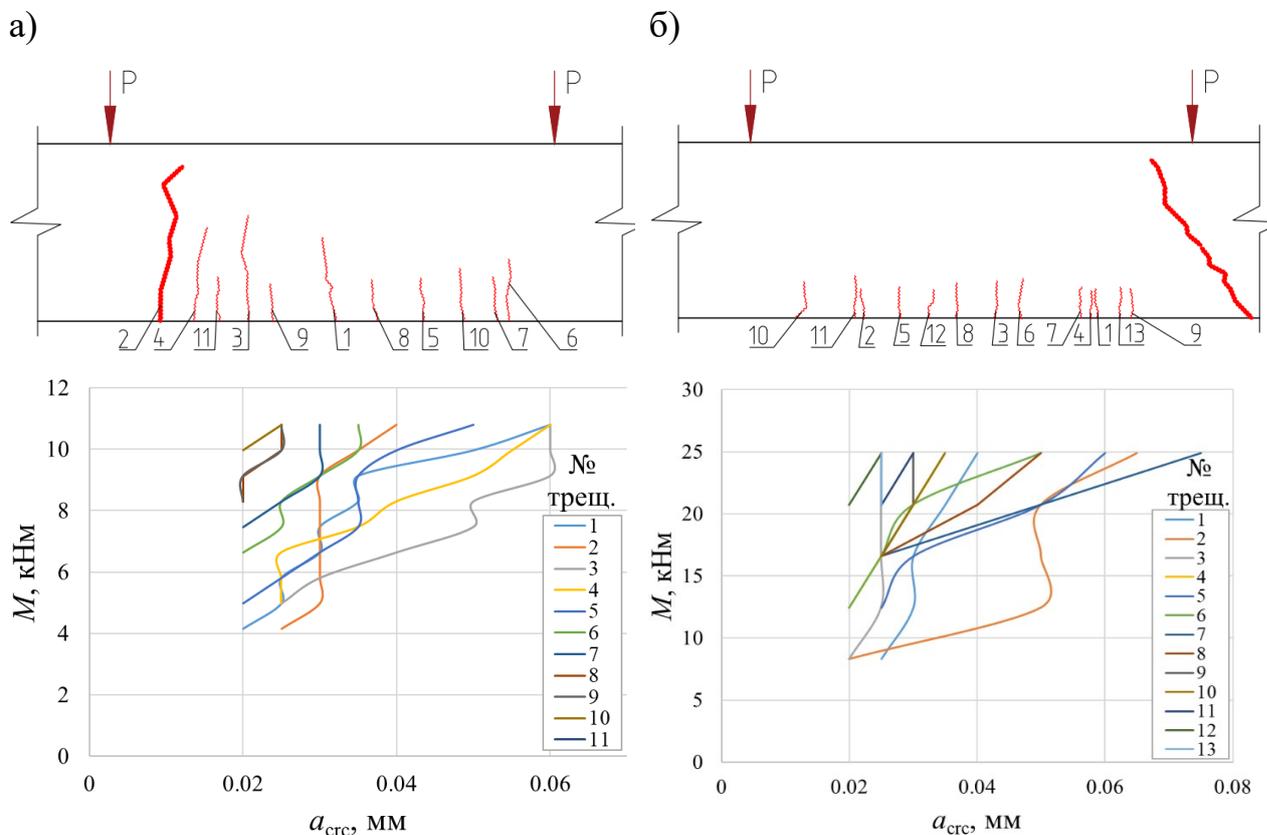


Рис. 2. – Картины трещин и графики их раскрытия в балках ПФ1-030 (а) и ВФ2-085 (б)

На схемах на рис. 2 утолщенными линиями показаны критические (локализованные) трещины, быстрое раскрытие которых на последних этапах испытаний приводило к разрушению балок. Из соображений безопасности ширину раскрытия трещин на этих этапах чаще всего не фиксировали. Исключение составляют испытания балок ВФ2-030 и ПФ2–250 и ВФ1-250, в которых измерения производили практически вплоть до разрушения. На графиках видно, что раскрытие критических трещин до начала их быстрого роста происходит с той же скоростью, что и у остальных трещин. То есть критические трещины до приближения к предельной стадии из общей массы

не выделяются. Зачастую образование критической трещины происходило на завершающих этапах нагружения.

Какой-либо зависимости значений среднего шага трещин  $\bar{l}_s$ , средней  $\bar{a}_{crc}$  и максимальной  $a_{crc}^{max}$  ширины раскрытия трещин (таблица 2) от количества стержневого и фибрового армирования и типа фибр не прослеживается. Вместе с тем следует заметить, что во всех группах вплоть до «локализации» критических трещин, т.е. практически до исчерпания несущей способности, раскрытие трещин оставалось небольшим – не более 0,25 мм. Таким образом, результаты наших испытаний указывают на то, что при действии эксплуатационных нагрузок, составляющих около 65–70 % от разрушающих, ширина раскрытия трещин в СВПБ-балках не будет превышать предельно допустимых значений  $a_{crc,ult} = 0,3–0,4$  мм, установленных нормами проектирования.

### Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования установлены основные закономерности трещинообразования и работы балок из сверхвысокопрочного сталефибробетона при изгибе. Показано, что добавление стальных фибр (как прямой, так и волновой формы) значительно повышает трещиностойкость конструкций, способствует равномерному распределению трещин, уменьшает их раскрытие и задерживает развитие критических локализованных повреждений. На всех стадиях нагружения, вплоть до разрушения, фибры эффективно сдерживают раскрытие трещин, не допуская превышения предельных значений ширины их раскрытия, установленных нормами проектирования. Локализация трещин и разрушение СВПБ-балок происходит после достижения текучести продольной арматуры, что указывает на высокую эффективность совместной работы дисперсного и стержневого армирования. Полученные результаты могут быть использованы

---

при уточнении расчетных моделей трещиностойкости и оптимизации проектных решений для изгибаемых элементов из СВПБ.

### Литература

1. Явруян Х.С., Филонов И.А., Фесенко Д.А. К вопросу о применении нанотехнологий в производстве строительных материалов // Инженерный вестник Дона, 2012, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1021](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1021)
  2. Салиб М.И.Ф. Тамов М.М., Прочность наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона// Инженерный вестник Дона, 2024. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952)
  3. Ahmed A.E. Production, behaviour and mechanical properties of ultra-high-performance fiber concrete – A comprehensive review // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol.17. e01637 P. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522007690](https://sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522007690)
  4. Cai Z., Duan X., Liu L., Lu Z., Ye J. Reinforced ultra-high performance concrete beam under flexure and shear: Experiment and theoretical model // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. Article no. e02647. DOI: [10.1016/j.cscm.2023.e02647](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02647)
  5. Zhu Y., Zhang Y., Yuan X., Hou C. An Adaptive Crack Width Prediction for Flexural Steel Reinforced UHPC Beams // I International Journal of Concrete Structures and Materials. 2023. Vol. 17 No. 73. pp.1–16. DOI: [10.1186/s40069-023-00628-x](https://doi.org/10.1186/s40069-023-00628-x)
  6. Shao Y., Billington S. L. Utilizing full UHPC compressive strength in steel reinforced UHPC beams // Second International Interactive Symposium on UHPC. 2019. DOI: [10.21838/uhpc.9699](https://doi.org/10.21838/uhpc.9699)
  7. Helou R., Graybeal B. Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams // Journal of Structural Engineering. 2022. Vol.148 No.4, pp. 1-20. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003246).
-

8. Тамов М.М., Абуизеих Ю.К.И. Влияние коэффициента продольного армирования на характер работы балок из сверхвысокопрочного фибробетона. // Научные труды КубГТУ, 2025, №2. С. 56–71. DOI: 10.26297/2312-9409.2025.2.6

9. Yang I.H., Park J., Bui T.Q., Kim K.C., Joh C., Lee H. An Experimental Study on the Ductility and Flexural Toughness of Ultrahigh-Performance Concrete Beams Subjected to Bending // Materials. 2020. Vol. 13 No.10. 2225p. DOI: 10.3390/ma13102225

10. Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S. Experimental and numerical study on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios // Canadian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol 44 No.1. pp 18–28. DOI: 10.1139/cjce-2015-0384

11. Turker K., Hasgul U., Birol T., Yavas A., Yazici H. Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams // Composite Structures. 2019. Vol. 229. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019. 111400

12. Тамов М.М., Салиб М.И.Ф., Абуизеих Ю.К.И., Софьяников О. Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. Vol. 4 No. 760. С. 25–39. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=49812850](http://elibrary.ru/item.asp?id=49812850)

### References

1. Yavruyan Kh.S., Filonov I.A., Fesenko D.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. No. 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1021](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1021)

2. Salib M.I.F. Tamov M.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. No. 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952)

3. Ahmed A.E. Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol.17. e01637 P. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522007690](http://sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522007690)



4. Cai Z., Duan X., Liu L., Lu Z., Ye J. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. Article no. e02647. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02647
5. Zhu Y., Zhang Y., Yuan X., Hou C. I International Journal of Concrete Structures and Materials. 2023. Vol. 17 No. 73. pp.1–16. DOI: 10.1186/s40069-023-00628-x
6. Shao Y., Billington S. L. Second International Interactive Symposium on UHPC. 2019. DOI: 10.21838/uhpc.9699
7. Helou R., Graybeal B. Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148 No.4, pp. 1-20. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003246.
8. Tamov M.M., Abuizeikh Y.Q.Y. Nauchnye trudy KubGTU. 2025. NO. 2. pp. 56–71. DOI: 10.26297/2312-9409.2025.2.6
9. Yang I.H., Park J., Bui T.Q., Kim K.C., Joh C., Lee H. Materials. 2020. Vol. 13 No.10. 2225 P. DOI: 10.3390/ma13102225
10. Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S. Canadian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol 44 No.1. pp 18–28. DOI: 10.1139/cjce-2015-0384
11. Turker K., Hasgul U., Birol T., Yavas A., Yazici H. Composite Structures. 2019. Vol. 229. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019. 111400
12. Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuizeikh Y.Q.Y., Sofyanikov O. D. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo. 2022. Vol. 4. No. 760. pp. 25–39. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=49812850](http://elibrary.ru/item.asp?id=49812850)

**Дата поступления: 3.07.2025**

**Дата публикации: 25.08.2025**