

12. Tur, E.A. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ruin usad'by «Nadnyoman» v d. Nadnyoman Uzdenskogo rajona Minskoj oblasti kak ob'ekta istoriko-kul'turnogo naslediya / E.A. Tur, S.V. Basov, E.V. Schasnaya, V.V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1: Tekhnicheskie nauki (stroitel'stvo, mashinostroenie, geoeкологиya), ekonomicheskie nauki. – S. 33-38.

13. Tur, E.A. Fiziko-himicheskie issledovaniya autentichnyh stroitel'nyh rastvorov i okrasochnykh sostavov zdaniya Tyur'my №1 v g. Grodno / E.A. Tur, E.V. Schasnaya, S.V. Basov, V.V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2: Tekhnicheskie nauki (stroitel'stvo, mashinostroenie, geoeкологиya), ekonomicheskie nauki. – S. 68-74.

УДК 624.012.35

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКОК ПРИ СОПРОТИВЛЕНИИ СРЕЗА

А.А. Невдах¹, П.В. Кривицкий²

¹ Лаборант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

² К.т.н., доцент, заведующий отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: krivitskiyp@mail.ru

Реферат

В статье анализируется влияние сжатой зоны бетона на сопротивление срезу железобетонных балочных элементов. Произведено численное моделирование железобетонных балок. Составлена база образцов, отмечены варьируемые параметры и выполнен анализ.

Ключевые слова: поперечное усилие, сжатая зона, прочность бетона на сжатие, коэффициент армирования, отношение пролёта среза.

FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE COMPRESSED CONCRETE ZONE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SHEAR RESISTANCE

A. A. Nevdakh, P. V. Krivitskiy

Abstract

The article analyzes the effect of the compressed concrete zone on the shear resistance of reinforced concrete beam elements. Numerical modeling of reinforced concrete beams has been performed. A database of samples was compiled, variable parameters were noted and an analysis was performed.

Keywords: shear force, compressed zone, concrete compressive strength, reinforcement factor, shear span ratio.

Введение. Проблема сопротивления срезу железобетонных балочных элементов без поперечного армирования, по-прежнему, является одной из наиболее дискуссионных в теории конструкций. Сложность проблемы заключается в многочисленности взаимосвязанных факторов, оказывающих влияние на формирование и развитие плоского напряженно-деформированного состояния, трещинообразование и форму разрушения изгибаемого элемента в зоне среза. Для изучения характера поведения и причин разрушения железобетонных балок при срезе было выполнено большое число экспериментальных отечественных и зарубежных исследований. В настоящее время существуют различные по своему уровню аналитические модели сопротивления срезу железобетонных балочных элементов.

Из-за совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил в железобетонных балочных конструкциях возникает система наклонных трещин, разделяющих элемент на отдельные блоки, соединенные продольным армированием в растянутой зоне и не цельной части бетона над вершиной наклонной трещины. При этом в наклонном сечении возникает ряд внутренних усилий, воспринимающих перерезывающие силы. Для балок без поперечного армирования в расчетном наклонном сечении возникают усилия, вклад которых в сопротивление срезу железобетонных балок в полной мере не изучен [3].

Для изучения характера поведения и причин разрушения железобетонных балок при срезе было выполнено большое число экспериментальных отечественных и зарубежных исследований. Согласно полученным экспериментальным данным, прочность на срез зависит от множества параметров, каждый из которых влияет на прочность в той или иной степени. Для конструкций с различным типом армирования и выполненных из любых видов бетона, величина данных составляющих и их вклад в сопротивление срезу может изменяться.

При этом вклад сжатой зоны бетона в сопротивлении срезу изучен недостаточно. В работе [1] рассматривается влияние прочности бетона на сжатие, коэффициента армирования и геометрических размеров на величину поперечного в сжатой зоне бетона на основе экспериментальных исследований. Для получения объективной картины напряженно-деформированного состояния и уточнения характера трещинообразования выполнены численные исследования с разработкой конечно-элементной модели железобетонных балок, где варьировались прочность бетона на сжатие и пролет среза.

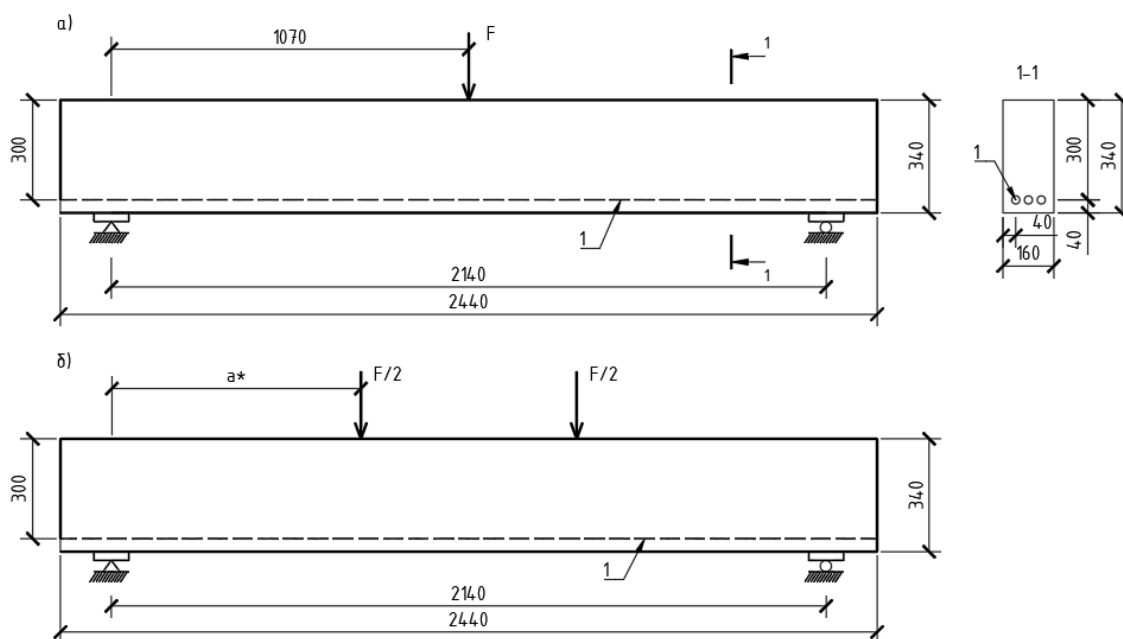
Численное моделирование железобетонных балок. Для проведения численных исследований с применением конечно-элементного моделирования сформирована база образцов, основанная на экспериментальных исследованиях А. G. Mphonde [2], в котором варьировалась прочность бетона на сжатие. При моделировании учитывались геометрические характеристики балки и вид армирования. В качестве образцов применялись железобетонные балочные элементы прямоугольного поперечного сечения с размерами $b \times h = 160 \times 340$ мм длиной 2440 мм (расчетный пролет 2140 мм), выполненные из бетона с прочностью на

сжатие, варьирующейся в пределах $45,24 \div 101,83$ МПа. Армировались балки в растянутой зоне тремя стержнями диаметром 25 мм ($A_{st} = 14,73 \text{ см}^2$), расположенными в одной горизонтальной плоскости. Коэффициент армирования сечения составляет 3,36 %. В балках применялась стержневая арматура со значением физического предела текучести $f_{yk} = 415$ МПа. Конструктивные особенности смоделированных балок отражены в таблице 1. Поперечное сечение и схема нагружения образцов представлены на рисунке 1.

Таблица 1 – Основные конструктивные характеристики балок

Серия	Марка балки	Размеры, мм			a/d	\varnothing , мм	ρ , %	f_c , МПа
		b	h	d				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б-С1	Б-С1-Пр1	160	340	300	3,6	25	3,36	101,83
	Б-С1-Пр2	160	340	300	3,0	25	3,36	101,83
	Б-С1-Пр3	160	340	300	2,5	25	3,36	101,83
	Б-С1-Пр4	160	340	300	2,0	25	3,36	101,83
Б-С2	Б-С2-Пр1	160	340	300	3,6	25	3,36	45,24
	Б-С2-Пр2	160	340	300	3,0	25	3,36	45,24
	Б-С2-Пр3	160	340	300	2,5	25	3,36	45,24
	Б-С2-Пр4	160	340	300	2,0	25	3,36	45,24
Б-С3	Б-С3-Пр1	160	340	300	3,6	25	3,36	81,13
	Б-С3-Пр2	160	340	300	3,0	25	3,36	81,13
	Б-С3-Пр3	160	340	300	2,5	25	3,36	81,13
	Б-С3-Пр4	160	340	300	2,0	25	3,36	81,13

Примечание – в таблице использованы следующие обозначения: С1 – образцы с прочностью бетона на сжатие 101,83 МПа; С2 – образцы с прочностью бетона на сжатие 45,24 МПа; С3 – образцы с прочностью бетона на сжатие 81,13 МПа; Пр1 – образцы с пролетом среза 3,6; Пр2 – образцы с пролетом среза 3,0; Пр3 – образцы с пролетом среза 2,5; Пр4 – образцы с пролетом среза 2,0



- а) – схема железобетонной балки с пролетом среза $a/d = 3,6$;
 б) – схема железобетонной балки с параметром a^* равным 900 мм, 750 мм и 600 мм и пролетом среза a/d равным 3,0; 2,5 и 2,0 соответственно

Рисунок 1 – Схема армирования железобетонных балок

Результаты численного моделирования. Испытывались образцы по схеме: балка на двух опорах, загруженная одной или двумя сосредоточенными силами в зависимости от пролета среза. Нагрузка прикладывалась постепенно.

Для назначения характеристик бетона были построены диаграммы деформирования бетона при различной прочности на сжатие. Прочность бетона на растяжение определялась по выражению $f_{ctm} = 0,3 f_{cm}^{2/3}$. Физико-механические характеристики бетона сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики бетона

Серия	f_{cm} , МПа	f_{ctm} , МПа	E_{cm} , ГПа
1	2	3	4
Б-С1	101,83	6,54	44,36
Б-С2	45,24	3,81	33,85
Б-С3	81,13	5,62	41,13

В балках серии Б-С1 использовались образцы с прочностью бетона на сжатие 101,83 МПа. Численное моделирование балок происходило при различных пролетах среза балки: при отношении a/d равном 3,6; 3,0; 2,5 и 2,0. Результаты численного моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Схемы развития трещин и распределение напряжений в продольной арматуре для балок серии Б-С1

Образец	Результат
1	2
Б-С1-Пр1	
Б-С1-Пр2	
Б-С1-Пр3	
Б-С1-Пр4	

Для железобетонных балок серии Б-С2 использовался бетон с прочностью на сжатие 45,24 МПа. Пролета среза: 3,6; 3,0; 2,5 и 2,0. В таблице 4 представлены результаты численного моделирования.

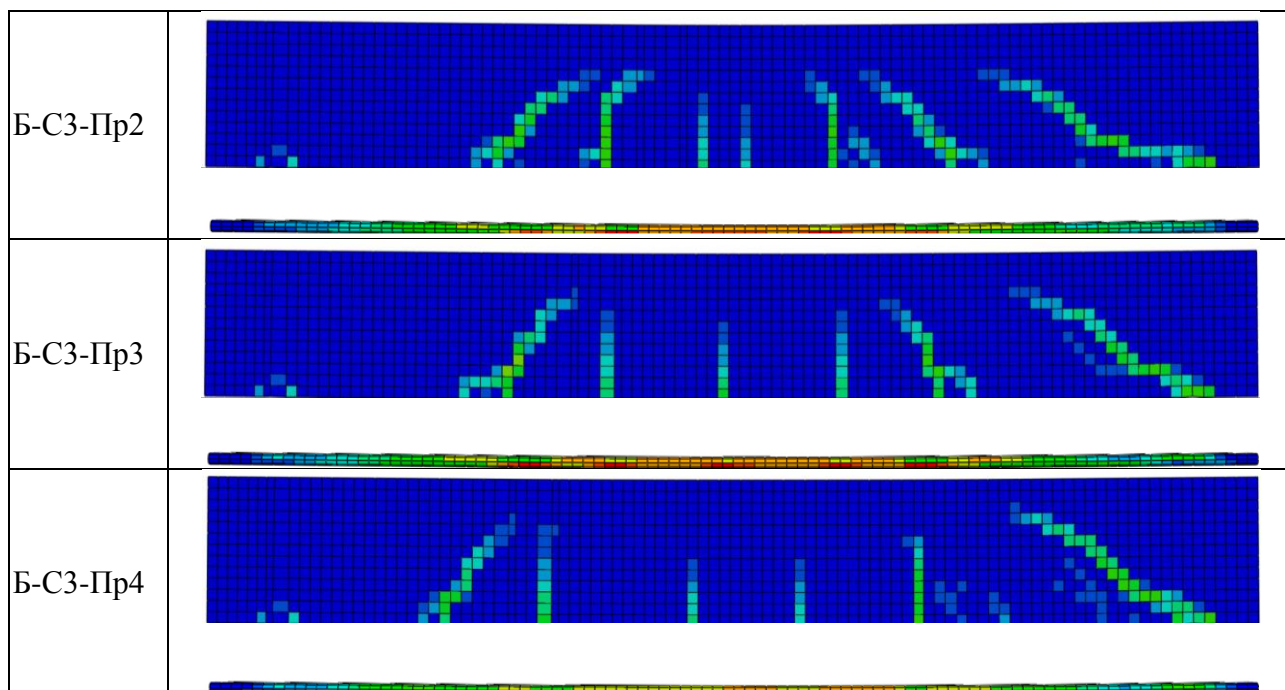
Таблица 4 – Схемы развития трещин и распределение напряжений в продольной арматуре для балок серии Б-С2

Образец	Результат
1	2
Б-С2-Пр1	
Б-С2-Пр2	
Б-С2-Пр3	
Б-С2-Пр4	

В серии Б-С3 применялся бетон с $f_c = 81,13$ МПа. Отношение a/d также варьировалось от 2,0 до 3,6, как и в предыдущей серии. В таблице 5 представлены результаты численного моделирования.

Таблица 4 – Схемы развития трещин и распределение напряжений в продольной арматуре для балок серии Б-С3

Образец	Результат
1	2
Б-С3-Пр1	



В результате численного моделирования было выявлено, что в балках серии Б-С1 арматура достигает предела текучести раньше, чем бетон достигает предельных деформаций в сжатой зоне бетона. В балках серий Б-С2 и Б-С3 бетон и арматура достигают своих предельных значений деформаций одновременно.

Заключение. По результатам выполненных исследований получено, что основной вклад в сопротивление срезу железобетонных балочных элементов оказывают перерезывающее усилие, возникающее в сжатой зоне бетона. При этом в полной мере оценить количественное значение данного усилия затруднительно, так как оно зависит от других усилий, возникающих в расчетном наклонном сечении, перераспределение которых происходит в процессе развития диагональных трещин.

Список цитированных источников

1. Невдах, А. А. Влияние сжатой зоны бетона на сопротивление срезу железобетонных балок / А. А. Невдах, П. В. Кривицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2022. – №14 : Серия F. – С. 51-57.
2. Mphonde, A. G. Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams / Mphonde, A. G. // ACI Structural Journal - Sept.-Oct., 1989. - V. 86, No. 5. – P. 541-545.
3. Кривицкий П. В. Сопротивление срезу предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутыми канатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / П. В. Кривицкий – Брест, 2016. – 167 л.

References

1. Nevdah, A. A. Vliyazanie szhatoj zony betona na soprotivlenie srezu zhelezobetonnyh balok. / A. A. Nevdah, P. V. Krivickij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta.. – 2022. – №14 : Seriya F. – S. 51–57.
2. Mphonde, A. G. (1989). Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 86 (5), 541-545.
3. Krivitskiy P. Soprotivlenie srezu predvaritel'no naprjzhennyh zhelezobetonnyh balok s pologo otognutymi kanatami [Shear resistance of prestressed concrete beams with flat bent-up seven-wire strands] dis. ... kand. tehn. nauk. Brest, 2016, 167 p.