

3. ТКП 376-2019. Мосты и трубы. Правила эксплуатации. – Минск : РУП БелдорНИИ, 2019. – 74 с.

4. ТКП 227-2018. Мосты автодорожные. Правила выполнения диагностики. – Минск : Минстройархитектуры, 2017. – 118 с.

5. СТБ 1994-2009. Конструкции железобетонные эксплуатируемые. Потенциометрический метод определения состояния арматуры. – Минск : Госстандарт, 2010. – 13 с.

6. ТКП 479-2019. Правила определения грузоподъемности железобетонных и сталежелезобетонных балочных пролетных строений автодорожных / Минтранспорта и коммуникаций РБ. – Минск, 2019. – 248 с.

7. Шестериков, В. И. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / В. И. Шестериков, Л. И. Иосилевский, Е. А. Андропова. – М. : Росавтодор, 2002. – 140 с.

УДК 624.012.35

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ СОПРОТИВЛЕНИИ СРЕЗУ

А. А. Невдах¹, П. В. Кривицкий²

¹ *М. т. н., мл. науч. сотр. отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» БрГТУ, Брест, Беларусь, alina.nevdah@mail.ru*

² *К. т. н., доцент, зав. отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» БрГТУ, Брест, Беларусь, 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 пролета среза.

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

A. A. Nevдах, P. V. Krivitskiy

Abstract

The article analyzes the effect of the compressed concrete zone on the shear resistance of reinforced concrete beam elements. A numerical study of the shear resistance of reinforced concrete beams under various variation factors has been performed. A sample database has been compiled, variable parameters have been noted and an analysis has been performed.

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

Введение

В практике расчета и конструирования сопротивление срезу железобетонных балок продолжает оставаться одной из наиболее обсуждаемых проблем. Данный вопрос требует уточнения, поскольку обеспечение необходимой несущей способности железобетонных балок имеет первостепенное значение для обеспечения безопасности и эффективности инфраструктурных объектов.

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. 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.

На сопротивление срезу изгибаемых железобетонных балочных элементов оказывает влияние множество факторов, таких как вид бетона и его прочностные характеристики, геометрические параметры поперечного сечения балки, процент продольного и поперечного армирования, наличие продольного усилия в элементе и т. д. Значительное число работ посвящено исследованию вклада составляющих на сопротивление срезу, однако в них не определяется изменение вклада сжатой зоны в сопротивление срезу при различных параметрах (пролет среза, коэффициент армирования и т. д.).

В данной статье представлен анализ результатов численных исследований, направленных на изучение напряженно-деформированного состояния железобетонных балок при сопротивлении срезу. Цель его заключается не только в исследовании численных моделей в анализе сопротивления срезу железобетонных балок, но и в выдвигании новых перспектив для будущих исследований, направленных на повышение эффективности и безопасности строительных конструкций.

Численное моделирование железобетонных балок

Численное моделирование с применением конечно-элементной модели представляет собой метод анализа поведения объекта или системы с использованием математического инструмента, называемого методом конечных элементов. Численное моделирование подразумевает замену физических экспериментов виртуальными, проведенными на компьютере. Вместо фактических тестов используются численные методы для имитации различных условий и воздействий на объект или систему.

Моделирование позволяет визуализировать и анализировать развитие трещин в материале. Это особенно важно для предотвращения разрушения конструкции из-за среза. Полученные схемы трещин помогут понять, как трещины формируются и распространяются внутри балки. Анализ напряжений в продольной арматуре дает представление о том, как обеспечивается равномерное распределение нагрузок, и какие участки балки подвергаются наибольшему напряжению.

В работе [1] подробно рассматривается воздействие прочности бетона на сжатие, коэффициента армирования и геометрических размеров на поперечное воздействие в сжатой зоне бетона на основе экспериментальных исследований. Для получения объективной картины напряженно-деформированного состояния и детализации характера трещинообразования проведены численные исследования с разработкой конечно-элементной модели железобетонных балок, в рамках которых варьировались параметры, такие, как прочность бетона на сжатие и пролет среза.

Для проведения численных исследований с применением конечно-элементного моделирования сформирована база образцов, основанная на экспериментальных исследованиях *A. G. Mphonde* [2], в котором варьировалась прочность бетона на сжатие. Полученная база основана на трех натуральных образцах, основные конструктивные характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные конструктивные характеристики образцов из экспериментального исследования *A. G. Mphonde* [2]

Образцы	b_w , мм	d , мм	a/d	ρ , %	c , мм	f_c , МПа
1	2	3	4	5	6	7
A0-7-3b	152	298	3,6	3,36	127	45,24
A0-11-3b	152	298	3,6	3,36	102	81,13
A0-15-3b	152	298	3,6	3,36	92,9	101,83

Для выполнения численного моделирования 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 ($A_{st} = 14,73 \text{ см}^2$), расположенными в одной горизонтальной плоскости. Коэффициент армирования сечения составляет 3,36 %. В балках применялась стержневая арматура со значением предела текучести $f_{yk} = 415$ МПа. В статье [3] подробно описываются конструктивные характеристики балок сформированной базы образцов, а также результаты численного моделирования.

При создании конечно-элементной модели для образцов заданы свойства, характеризующие закон сцепления арматуры с бетоном, моделирующий изменение напряжения по длине зоны анкеровки. При этом задается минимальное проскальзывание арматуры в бетоне. Для разбиения образца создается конечно-элементная сетка, состоящая из параллелепипедов с соотношением сторон 3:4.

Анализ результатов численного моделирования

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

В ходе проведения численного моделирования были созданы детальные модели железобетонных балок. Эти модели позволили визуализировать и анализировать распределение трещин под воздействием поперечных сил. Полученные схемы развития трещин детально показывают поведение балок в условиях среза. Для дальнейшего анализа отобрано три образца, которые по своим характеристикам (пролет среза и прочность бетона на сжатие) схожи с образцами, представленными в экспериментальных исследованиях.

Отобранные образцы имеют следующие характеристики:

- пролет среза (отношение a/d) у всех образцов составляет 3,6;
- прочность бетона на сжатие у образца Б-С1-Пр1 (рисунок 1) составляет 101,83 МПа;
- для образца Б-С2-Пр1 (рисунок 2) f_c составляет 45,24 МПа;
- для образца Б-С3-Пр1 (рисунок 3) f_c составляет 81,13 МПа.

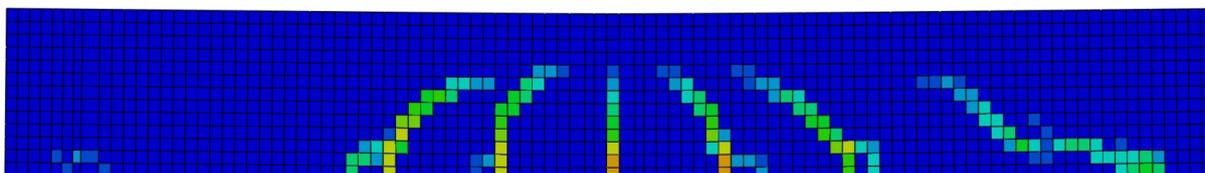


Рисунок 1 – Схема развития трещин образца Б-С1-Пр1

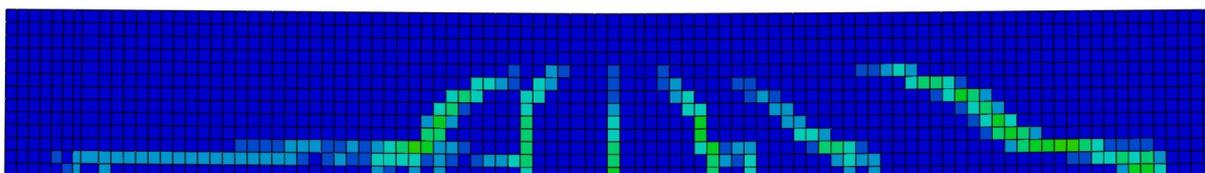


Рисунок 2 – Схема развития трещин образца Б-С2-Пр1

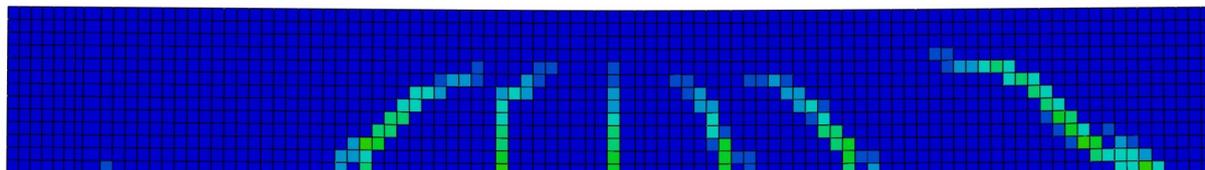
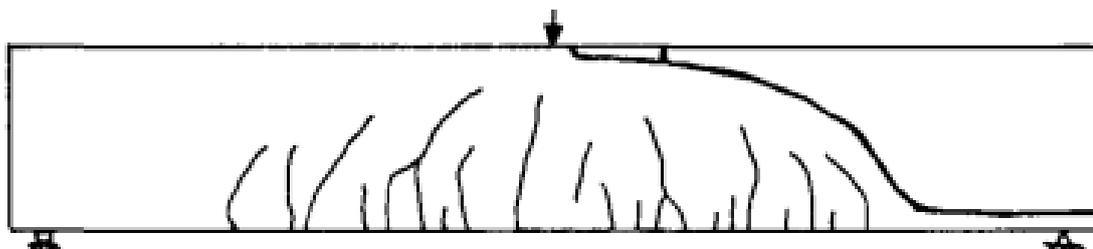


Рисунок 3 – Схема развития трещин образца Б-С3-Пр1

Для верификации численных результатов были использованы реальные экспериментальные данные, представленные на типовой схеме распределения трещин железобетонных балок (рисунок 4).



*Рисунок 4 – Типовая схема развития трещин в экспериментальных исследованиях
А. Г. Мфонде [2]*

В ходе анализа были выделены общие характеристики трещин, такие как их направление и длина. Сравнение численного моделирования с реальными экспериментальными данными позволяет выявить сходства и различия между предсказанным и фактическим поведением балок. В случае соответствия распределения трещин в численном моделировании реальным данным, можно сделать вывод о точности модели и её способности воспроизводить реальное поведение конструкции при срезе. Однако, необходимо учесть, что реальные эксперименты могут подвергаться воздействию различных факторов, влияющих на результаты. Также на рисунке показана укрупненная схема развития трещин, отражающая совокупность полученных различных экспериментальных данных.

Для анализа совместного влияния прочности бетона на сжатие и пролета среза указанная ранее база образцов была рассчитана по различным моделям сопротивления среза: модели *К. Н. Reineck* [4], диско-связевой модели *А. С. Залесова* [5], методу предельных усилий в расчетном наклонном сечении [6], модели *Н. Park, К. Choi* и *Ж. К. Wight* [7]. Подробнее об этих моделях описано в статье [1]. В таблице 2 представлены характеристики образцов, экспериментальные значения воспринимаемой поперечной силы для образцов с идентичными характеристиками и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона. На рисунке 5 представлены полные и расчетные значения поперечных усилий.

Таблица 2 – Размеры и характеристики образцов, расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона

Серия	Марка образца	b_w , мм	d , мм	a/d	ρ , %	c , мм	f_c , МПа	V_{exp} , кН	$V_{cd2.1}$, кН	$V_{cd2.2}$, кН	$V_{cd2.3}$, кН	$V_{cd2.4}$, кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Б-С1	Б-С1-Пр1	160	300	3,6	3,36	95	101,83	100,10	23,70	34,80	87,92	97,63
	Б-С1-Пр2	160	300	3,0	3,36	102	101,83	–	25,67	37,37	87,92	98,89
	Б-С1-Пр3	160	300	2,5	3,36	82	101,83	–	20,13	30,04	87,92	96,69
	Б-С1-Пр4	160	300	2,0	3,36	75	101,83	–	18,26	27,48	87,92	113,81
Б-С2	Б-С2-Пр1	160	300	3,6	3,36	108	45,24	82,89	16,56	23,04	51,19	61,84
	Б-С2-Пр2	160	300	3,0	3,36	125	45,24	–	19,59	26,66	51,19	72,25
	Б-С2-Пр3	160	300	2,5	3,36	95	45,24	–	14,33	20,26	51,19	67,87
	Б-С2-Пр4	160	300	2,0	3,36	80	45,24	–	11,85	17,06	51,19	76,39
Б-С3	Б-С3-Пр1	160	300	3,6	3,36	95	81,23	89,23	20,57	29,91	75,56	78,23
	Б-С3-Пр2	160	300	3,0	3,36	105	81,23	–	23,02	33,06	75,56	88,93
	Б-С3-Пр3	160	300	2,5	3,36	85	81,23	–	18,18	26,79	75,56	87,21
	Б-С3-Пр4	160	300	2,0	3,36	75	81,23	–	15,85	23,61	75,56	101,23

Примечание – В таблице использованы следующие обозначения: $V_{cd2.1}$ – поперечное усилие, воспринимаемое сжатым бетоном по *К. Н. Reineck* [4], $V_{cd2.2}$ – то же по *А. С. Залесову* [5], $V_{cd2.3}$ – поперечное усилие для элементов без поперечного армирования по модели [6], $V_{cd2.4}$ – то же по *Н. Park* [7].

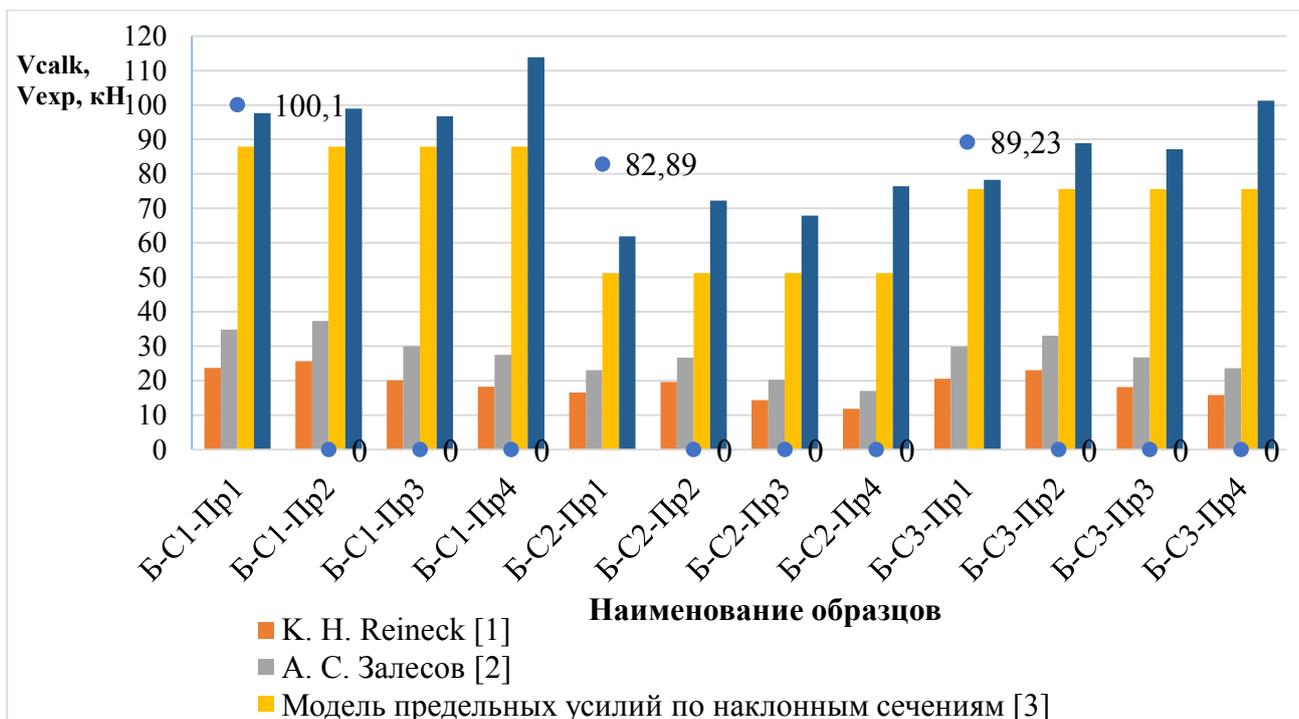


Рисунок 5 – Экспериментальные значения полной поперечной силы сечения и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона

По результатам проведенного анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В модели *К. Н. Reineck* [4] в общем случае значение поперечного усилия, воспринимаемого сжатой зоной, составляет от 21,8 % до 26,1 % от полного значения. Автор подчеркивает, что максимальный вклад поперечного усилия сжатой зоны бетона может быть не более 30 %. Данное положение подтверждается результатами расчета сопротивления срезу образцов сформированной базы. Отклонение в расчетных значениях составляет 4,3 %. При совместном влиянии прочности бетона на сжатие и пролета среза модель чувствительна к изменению каждого из факторов.

2. Модель, разработанная авторами [5], оценивает вклад сжатой зоны бетона от 30,5 % до 34,2 % от полного значения сопротивления срезу. Отклонение в расчетных значениях составляет 3,7 %. При оценке совместного влияния нескольких факторов, полученный результат зависит от каждого из них.

3. Модель [6] имеет большой разброс значений: от 46,9 % до 83,7 %. При этом проценты отклонения составляют: 36,8 %. Модель рассчитывает полную поперечную силу, воспринимаемую сжатой зоной бетона. Но из-за недостаточного учета влияния на сопротивление срезу других составляющих (нагельный эффект, зацепление по берегам наклонной трещины), значения имеют значительное расхождение с экспериментальными данными. При оценке влияния многофакторности на модель не влияет изменение пролета среза, что не соответствует общим представлениям о работе изгибаемых железобетонных элементов.

4. Расчетные значения, полученные по модели *H. Park* [7] находятся в пределах 87,8 % – 98,6 % от экспериментальных значений. Модель также рассчитывает полную поперечную силу, воспринимаемую сжатой зоной бетона. Отклонение расчетных значений в пределах одного эксперимента составляет 10,8 %. При совместном влиянии прочности бетона на сжатие и пролета среза модель зависит от каждого из факторов.

Результаты сопоставления теоретических и натуральных данных по трем из четырех примененных методик расчета сопротивления срезу железобетонных балок показали значения, близкие к экспериментальным. Это свидетельствует о том, что данные методики обладают определенной точностью и хорошо описывают поведение балок при срезе, учитывая реальные условия эксплуатации.

Однако, в случае модели [6], обнаружены существенные различия между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными. Это обусловлено тем, что данная методика не учитывает все важные варьирующиеся характеристики, оказывающие влияние на сопротивление железобетонных балок срезу.

Таким образом, анализ различий в результатах подчеркивает важность дальнейших исследований, чтобы обеспечить более точные и надежные модели сопротивления срезу железобетонных балок.

Литература

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 / A. G. Mphonde // ACI Structural Journal – Sept.–Oct., 1989. – V. 86, No. 5. – P. 541–545.

3. Невдах, А. А. Особенности напряженно-деформированного состояния сжатой зоны бетона железобетонных балок при сопротивлении срезу / А. А. Невдах, П. В. Кривицкий // Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров : сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 14–15 декабря 2022 г. / редкол.: В. В. Зазерская [и др.] – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 1. – С. 61–66.

4. Reineck, K. H. Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model / K. H. Reineck // ACI Structural Journal. – Sept.-Oct., 1991. – Vol. 88, № 5. – P. 592–602.

5. Залесов, А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – К. : Будивэльнык, 1989. – 104 с.

6. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск : М-во архит. и строит. Респ. Беларусь, 2003. – 144 с.

7. Wight, J. Strain-Based Shear Strength Model for Slender Beams without Web Reinforcement / J. Wight, H.-G. Park, K.-K. Choi // ACI Structural Journal. – Jan., 1991. – Vol. 103, № 6. – P. 783–793.