

**ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА, НАГРУЖЕННОЙ ЛОКАЛЬНОЙ  
ОТРЫВАЮЩЕЙ СИЛОЙ**

*Н. Н. Шалобыта<sup>1</sup>, Е. С. Матвеевко<sup>2</sup>, Е. А. Деркач<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> К. т. н., проректор по научной работе БрГТУ, Брест, Беларусь, *nshalobyta@mail.ru*

<sup>2</sup> М. т. н., аспирант кафедры строительных конструкций БрГТУ, Брест, Беларусь,  
*elizabeth.brenkovich@yandex.by*

<sup>3</sup> М. т. н., начальник испытательного центра БрГТУ, Брест, Беларусь,  
*www.kamora@mail.ru*

**Реферат**

Проведено численно-экспериментальное исследование работы однопролетных железобетонных балок с различным процентом армирования, подверженных местному действию растягивающих усилий. По результатам численного моделирования и испытания опытных образцов были получены данные об особенностях образования и развития трещин в зоне отрыва, а также выявлена зависимость угла наклона трещин отрыва и размера зоны отрыва от положения точки приложения отрывающего усилия.

**Ключевые слова:** поддерживающая балка, поддерживаемая балка, отрыв, конечно-элементный анализ, эксперимент, зона отрыва, трещины отрыва.

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN  
STATE OF A REINFORCED CONCRETE ELEMENT ZONE LOADED  
WITH A RADIAL TEARING FORCE**

*N. N. Shalobyta, E. S. Matveenko, E. A. Derkach*

**Abstract**

A numerical and experimental study of the operation of single-span reinforced concrete beams with different percentages of reinforcement exposed to local tensile forces has been carried out. Based on the results of numerical modeling and testing of prototypes, data were obtained on the features of the formation and development of cracks in the separation zone, and the dependence of the angle of inclination of the separation cracks and the size of the separation zone on the position of the point of application of the tearing force was revealed.

**Keywords:** supporting beam, supported beam, separation, finite element analysis, experiment, separation zone, separation cracks.

**Введение**

Практика эксплуатации железобетонных конструкций, элементы которых подвержены местному действию растягивающих усилий (отрыву), показывает, что содержащиеся в отечественных [1] и зарубежных нормативно-правовых актах по проектированию бетонных и железобетонных конструкций [2–5] требования по

обеспечению несущей способности и эксплуатационной пригодности рассматриваемых конструкций не всегда гарантируют необходимый уровень надежности, результатом чего являются серьезные повреждения конструкций [6].

Рекомендации по конструированию зон, подверженных местному действию растягивающих усилий, как правило, сводятся к установке дополнительного конструктивного поперечного армирования или увеличению длины анкеровки вырываемых элементов [7]. Следует отметить, что влияние поперечного армирования таких конструкций, установленного, исходя из общего расчета прочности, по наклонным сечениям, а также влияние работы бетона на растяжение (отрыв) не учитывается.

Следует отметить, что выполнение требований [1–5] не исключает вероятность образования трещин в зоне отрыва, что и определяет актуальность исследования особенностей работы железобетонных элементов на отрыв.

### **Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния зоны отрыва при местном действии растягивающих усилий**

В качестве экспериментальных образцов для исследования работы железобетонных элементов при местном действии растягивающих усилий (отрыве) использованы железобетонные однопролетные балки (поддерживаемые (главные)) с примыканием поддерживаемых (второстепенных).

Поддерживаемая железобетонная балка запроектирована из условия обеспечения сопротивления изгибу и срезу в соответствии с [1]. Длина балки принята 3000 мм, размеры сечения –  $b \times h = 220 \times 500$  мм.

Испытывались две серии опытных образцов, отличающихся размером продольного рабочего армирования и положением точки приложения, отрывающего усилия  $d_s$ .

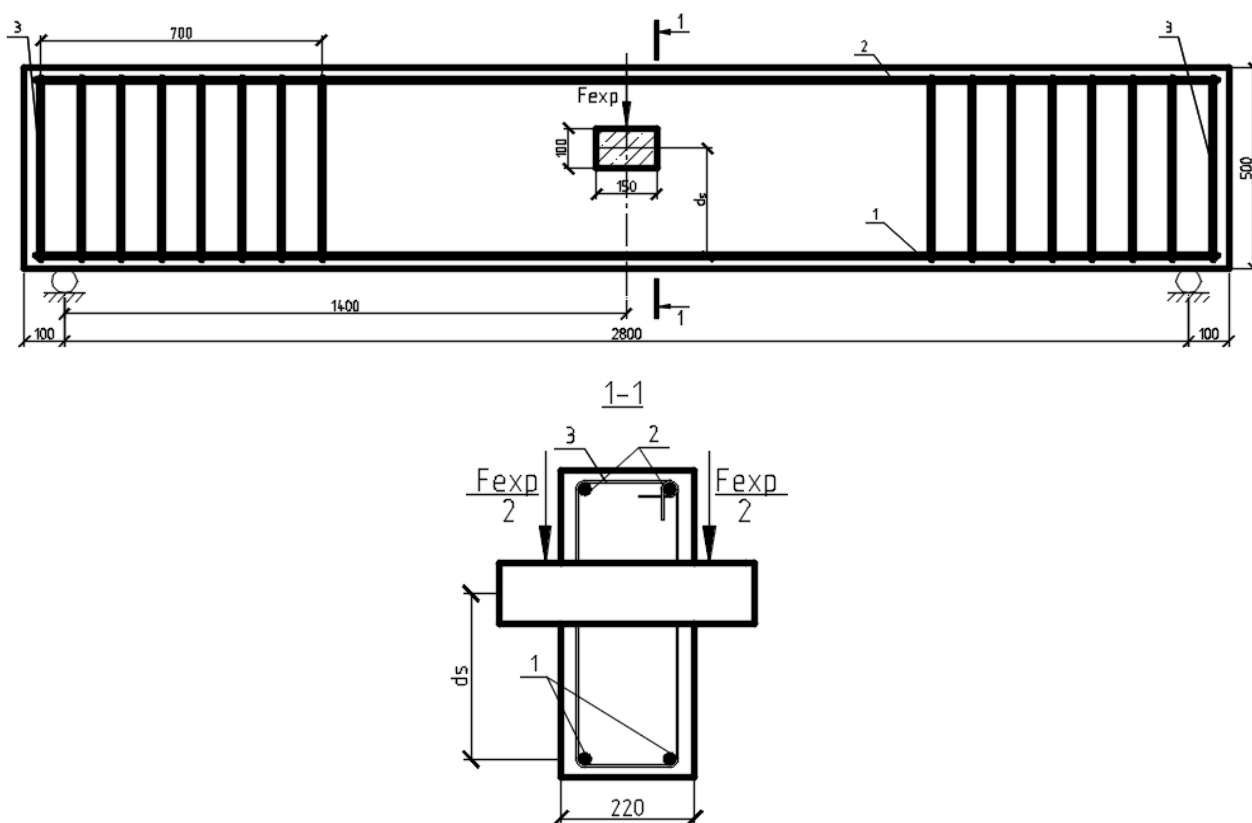
Железобетонные балки запроектированы и изготовлены с продольной рабочей арматурой в растянутой зоне 2Ø14 мм класса S500 (балки серии Б-I) и 2Ø16 мм класса S500 (балки серии Б-II). В сжатой зоне установлены 2Ø8 мм класса S500. Поперечное армирование приопорной зоны балок представлено хомутами из проволоки диаметрами 5 мм класса S500, установленными с шагом 100 мм (рисунок 1).

Поперечное армирование в месте пересечения балок (в месте передачи отрывающего усилия) не предусмотрено, с целью анализа размеров зоны отрыва в поддерживаемой балке (отрывающая нагрузка воспринимается только бетоном).

Информация о конструктивных особенностях опытных образцов представлена на рисунке 1 и в таблице 1.

**Таблица 1** – Основные конструктивные характеристики опытных балок

Серия	Размеры, см			Продольная арматура		Поперечная арматура (3)	$\rho_s$ , %	$f_{ctm}$ , МПа	$f_{cm}$ , МПа	$d_s$ , мм
	b	h	l	нижняя (1)	верхняя (2)					
Б-I	22	50	300	2Ø14 S500	2Ø8 S500	Ø5 S500 в приопорных зонах	1,48	3,05	32,4	210
Б-II	22	50	300	2Ø16 S500	2Ø8 S500		1,83			270



*Рисунок 1 – Конструкция опытных балок*

Опытные образцы были установлены на две независимые опоры: шарнирно-неподвижную, обеспечивающую одну степень свободы (поворот и ограничение перемещения по вертикали и горизонтали), и шарнирно-подвижную, которая ограничивала только вертикальные перемещения (рисунок 2).



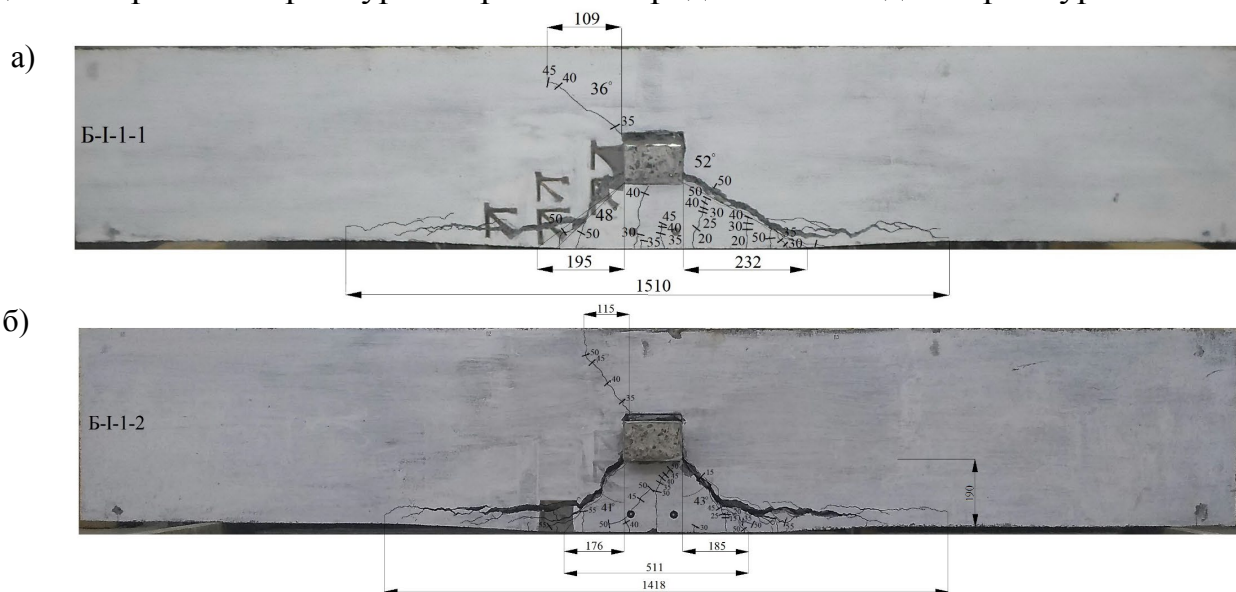
*Рисунок 2 – Общий вид испытательной*

Загружение балок производилось одной сосредоточенной силой, приложенной на расстоянии 1,4 м от опоры (в середине пролета). При помощи траверсы сосредоточенная нагрузка распределялась на консольные участки поддерживаемой балки по обе стороны от поддерживающей.

Первые диагональные трещины в балках серии Б-I, стартовавшие от угла нижней грани поддерживаемого элемента по направлению к нижней грани железобетонной балки, образовались при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 15$  кН. Одновременно при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 20\text{--}25$  кН происходило образование единичных нормальных трещин в поддерживающих балках в зоне действия максимального изгибающего момента на крайних растянутых волокнах. Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к развитию и раскрытию наклонных трещин. На следующих этапах загрузки происходило образование нормальных трещин в растянутой зоне бетона с шагом  $8 \div 10$  см, а также увеличение ширины раскрытия уже имеющихся нормальных и диагональных трещин. Учитывая, что балки запроектированы с учетом обеспечения сопротивления изгибу, существенное развитие и раскрытие нормальных трещин при увеличении нагрузки не происходило.

Однако при достижении нагрузки  $F_{\text{exp}}$  значения 35 кН от верхнего угла поддерживаемого элемента наблюдался старт наклонных трещин в направлении верхней грани железобетонной балки.

При нагрузке  $F_{\text{exp}} = 52.5$  кН (балка Б-I-1) и  $F_{\text{exp}} = 60$  кН (балка Б-I-2) происходило разрушение опытных образцов по наклонным трещинам в результате выделения усеченной пирамиды отрыва под нижней гранью поддерживаемого элемента (рисунок 3). При этом, при достижении наклонными трещинами продольной рабочей арматуры их развитие продолжалось вдоль арматуры.



**а) – балка Б-I-1; б) – балка Б-I-2**  
**Рисунок 3 – Трещинообразование и разрушение балок серии Б-I**

По результатам эксперимента угол наклона диагональных трещин отрыва к вертикали для балки Б-I-1 составил  $48^\circ \div 52^\circ$ , размеры пирамиды отрыва составили: 190 мм высота и 577 мм длина (рисунок 3, а). Для балки Б-I-2 угол наклона диагональных трещин отрыва составил  $41^\circ \div 43^\circ$ , размеры зоны отрыва составили: 190 мм высота и 511 мм длина (рисунок 3, б). Длина зоны отрыва с учетом горизонтальных участков диагональных трещин составила для балки Б-I-1 1510 мм, для балки Б-I-2 – 1577 мм (рисунок 3).

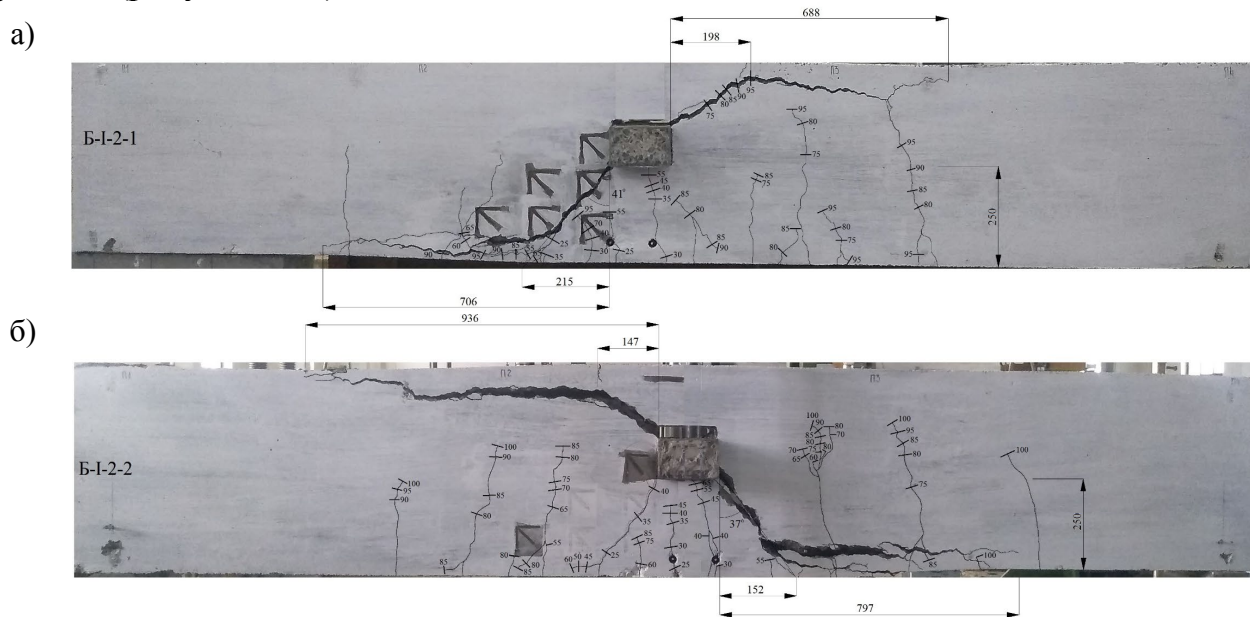
Также, как и для балок серии Б-I, при загрузении балок серии Б-II первыми образовались нормальные трещины, которые появились в поддерживающих

балках в зоне действия максимального изгибающего момента на крайних растянутых волокнах при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 20\text{--}25$  кН. И только при нагрузке в  $F_{\text{exp}} = 25$  кН в балке Б-II-1 появилась первая диагональная трещина, стартовая с нижнего угла поддерживаемого элемента в направлении растянутой зоны бетона (с одной стороны).

Для балки Б-II-1 при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 55$  кН диагональная трещина достигла рабочей продольной арматуры балки, и дальнейшее развитие этой трещины происходило вдоль центра тяжести арматуры по направлению к опоре.

А при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 75$  кН в балки Б-II-1 получила развитие наклонная трещина, развивающаяся по диагонали от верхнего угла поддерживаемого элемента к верхней грани железобетонной балки (рисунок 4, а).

В балке Б-II-2 при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 55$  кН по обе стороны от поддерживаемого элемента симметрично стартовали две нормальные трещины (рисунок 4, б). Дальнейшее нагружение балки характеризовалось поочередным образованием нормальных трещин с каждой из сторон от поддерживаемого элемента, стартовых от нижней грани поддерживаемого элемента и достигающих на этапе образования длины в 130–300 мм. Все нормальные трещины при последующем нагружении постепенно развивались по вертикали по мере уменьшения сжатой зоны железобетонной балки. Разрушение балки Б-II-2 имело тот же вид, что и балки Б-II-1 – взаимным сдвигом частей балки в зоне действия растягивающего усилия (рисунок 4, б).



а) – балка Б-II-1; б) – балка Б-II-2

*Рисунок 4 – Трещинообразование и разрушение балок серии Б-II*

Разрушение опытных балок Б-II-1 и Б-II-2 происходило при нагрузке  $F_{\text{exp}} = 97,7$  кН и  $F_{\text{exp}} = 105$  кН соответственно.

Угол наклона к вертикали диагональных трещин отрыва для балки Б-II-1 по результатам эксперимента составил  $38^\circ$  для нижней трещины и  $52^\circ$  для верхней, длина проекции наклонных трещин, по которым происходило разрушение, составила 1544 мм (рисунок 4, а).

Для балки Б-II-2 угол наклона нижней трещины отрыва составил  $37^\circ$ , верхней –  $53^\circ$ , длина проекции наклонных трещин равна 1883 мм (рисунок 4, б).

### Численное исследование напряженно-деформированного состояния зоны отрыва при местном действии растягивающих усилий

Для получения более подробных данных об особенностях напряженно-деформированного состояния в зоне отрыва железобетонных элементов, к которым приложено локальное растягивающее усилие, а также уточнения зависимости угла наклона трещин отрыва и размера зоны отрыва от положения точки приложения, отрывающего усилия, проведен численный эксперимент в среде программного комплекса «*Abaqus/CAE*», реализующего метод конечных элементов [8].

Конечно-элементный анализ проводился для опытных железобетонных балок серии Б-I и Б-II, особенности конструирования и схема загрузки представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

По результатам численного эксперимента для каждой из балок были получены картины распределения трещин отрыва по высоте сечения поддерживающего элемента, а также размеры зоны отрыва (рисунок 5).

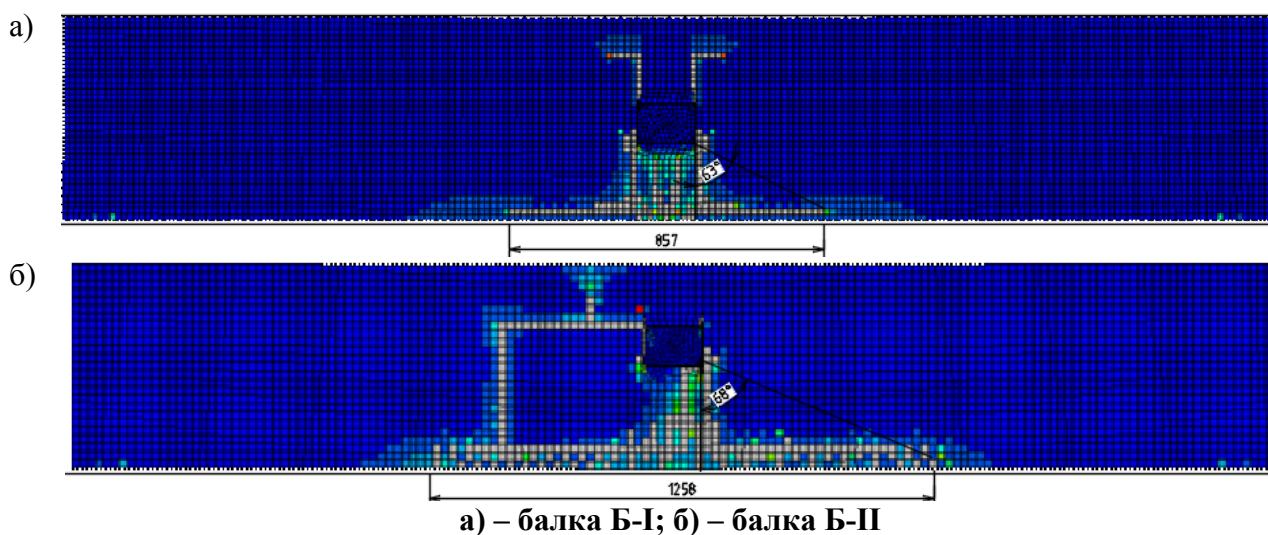


Рисунок 5 – Распределение трещин в зоне отрыва моделируемых балках

Работа балок при приложении отрывающей нагрузки характеризуется появлением первых трещин при нагрузке, равной 15 кН и 25 кН для балок Б-I и Б-II соответственно. Зоной локализации первых диагональных трещин является область сопряжения поддерживающей и поддерживаемой балок. Первые нормальные трещины стартуют в растянутой зоне бетона поддерживающей балки непосредственно под зоной приложения отрывающего усилия. Развитие этих трещин по вертикали прекращается после их достижения нижней продольной арматуры главной балки, что является следствием передачи растягивающих напряжений от бетона арматуре.

При увеличении нагрузки до 45 кН и 120 кН для балок Б-I и Б-II соответственно возникают нормальные трещины ближе к опорам, которые впоследствии отклоняются в направлении центра тяжести второстепенной балки.

Увеличение прикладываемого отрывающего усилия так же приводит к развитию диагональных трещин, образовавшихся в углах верхней грани поддерживаемого элемента, в направлении сжатой зоны бетона. Для балки Б-I харак-

терно постепенное симметричное развитие диагональных трещин в направлении сжатой зоны бетона с ростом прикладываемого отрывающего усилия. Диагональные трещины, распространяющиеся в направлении сжатой зоны бетона, при увеличении отрывающего усилия для балки Б-II развиваются только с одной стороны, постепенно принимая горизонтальное направление.

Разрушение опытных образцов происходило при следующих значениях отрывающего усилия:

- 52 кН для балки Б-I;
- 134 кН для балки Б-II.

Как видно по результатам численного эксперимента, несущая способность сопряжения поддерживающего и поддерживаемого элементов при действии растягивающего (отрывающего) усилия зависит как от диаметра рабочего продольного армирования, так и от положения точки приложения, отрывающего усилия. Железобетонная поддерживающая балка Б-II разрушилась при отрывающей нагрузке, более чем в два раза превышающей значение нагрузки, при которой произошло разрушение железобетонной поддерживаемой балки Б-I.

### **Выводы**

1. По результатам численно-экспериментального исследования сопротивления в узле фрагмента пересечения балок – поддерживающей (главной) и поддерживаемой (второстепенной) – выявлено, что на несущую способность соединения существенное влияние оказывает размер рабочего продольного армирования поддерживающего элемента, а также положение поддерживаемого элемента. При увеличении площади продольного рабочего армирования поддерживающей железобетонной балки и смещении точки приложения отрывающего усилия по высоте сечения в направлении верхней грани на 22 %, несущая способность сопряжения поддерживающего и поддерживаемого элементов увеличивается более чем в два раза.

2. Характер разрушения рассматриваемого соединения в большей степени зависит от положения точки приложения отрывающего усилия по высоте сечения поддерживающей балки. Так, для серии балок, поддерживаемый элемент которых располагается ближе к нижней грани, разрушение происходило вследствие выделения усеченной пирамиды отрыва под нижней гранью поддерживаемого элемента. Разрушение балок, положение точки приложения отрывающего усилия для которых смещено в направлении верхней грани относительно первой серии балок, характеризовалось взаимным сдвигом частей балки в зоне действия растягивающего усилия.

3. Так как при изменении положения точки приложения, отрывающего усилия характер разрушения рассматриваемых соединений меняется, следовательно, методики расчета таких соединений должны учитывать эти различия, в том числе при подборе и расстановке дополнительного поперечного армирования в зоне отрыва.

### **Литература**

1. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 244 с.

2. Еврокод 2. Бетонные и железобетонные конструкции. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : Минстройархитектуры, 2009. – 191 с.

3. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные правила : СП 63.13330.2018 – Введ. 20.06.2019. – М. : М-во строит. и жил.-коммунал. хозяйства, 2019. – 118 с.

4. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (318R-19) : ACI Committee 318 – MI ; Farmington Hills : American Concrete Institute, 2019. – 628 p.

5. Design of concrete structures : CSA A23.3-04 – Canadian standards association standard, 2019. – 301 p.

6. Анализ методов расчета прочности элементов железобетонных конструкций на отрыв / Н. Н. Шалобыта [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1(124). – С. 39–42.

7. Analysis of calculation methods and numerical simulation of the stress-strain state of reinforced concrete elements under local action of tensile forces / N. N. Shalobyta [et al.] // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – No. 3 (132). – P. 35–40.

8. Abaqus 6.13. Analysis User's Guide. Volume III : Materials. – Dassault Systemes Simulia Corp., Providence : RI, 2013. – 699 p.

УДК 624.014

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА СРЕЗ ПО EN 1993-1-8, СП 5.04.01 И ANSI/AISC 360-05**

***А. Б. Шурин<sup>1</sup>, Д. А. Жданов<sup>2</sup>, А. И. Дробыш<sup>3</sup>***

<sup>1</sup> *К. т. н., доцент, зав. кафедрой строительных конструкций БрГТУ, Брест, Беларусь*

<sup>2</sup> *К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций БрГТУ, Брест, Беларусь*

<sup>3</sup> *Магистрант, лаборант кафедры строительных конструкций БрГТУ, Брест, Беларусь*

### **Реферат**

Расчет болтовых соединений является важной составляющей проектирования в строительстве. EN 1993-1-8 [1], СП 5.04.01 [2] и ANSI/AISC 360-05 [3] – это нормативные документы, которые регламентируют расчет и конструирование болтовых соединений в соответствии с европейскими, белорусскими и американскими нормами.

Использование таких стандартов обеспечивает надежность и безопасность проектирования болтовых соединений, их конструкций, а также соответствие современным техническим требованиям, что, в свою очередь, способствует улучшению качества и надежности проектов. Они обеспечивают универсальность и применимость методов и правил к различным условиям и областям промышленности и строительства [4].

**Ключевые слова:** металлические конструкции, болтовое соединение, болт, срез, смятие, податливость.