

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29

Тамов М.М.

Кубанский государственный технологический университет

E-mail: murat.tamov@gmail.com

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ БАЛОК С КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ

Аннотация. Изложены результаты комплексных численных и экспериментальных исследований работы наклонных сечений железобетонных балок с композитным поперечным армированием. Предложена методика конечно-элементных расчетов балок в ПК Abaqus FEA, учитывающая фактические физико-механические свойства материалов, в т.ч. нелинейное поведение бетона, характеризующее моделью пластического деформирования с накоплением повреждений CDP. Сопоставлением расчетных данных с результатами испытаний авторов и других исследователей подтверждена высокая точность разработанных численных моделей для балок как со стальной, так и с композитной поперечной арматурой: вычисленные величины прогибов и несущей способности балок хорошо согласуются с опытными. В моделях для случаев разрушения балок вследствие разрыва хомутов учитывали ортотропность композитной арматуры и фактические траектории наклонных трещин. Установлено, что из-за неравномерного распределения нормальных напряжений, вызванного локальным изгибом в зоне пересечения с наклонными трещинами, прочность композитных стержней может снижаться до 80 % от их сопротивления при осевом растяжении. Разработанная методика моделирования позволяет достоверно оценивать несущую способность и деформативность балок со стальным и композитным поперечным армированием и может быть рекомендована для практического применения при расчетах балок на поперечную силу.

Ключевые слова: железобетонные балки, композитная арматура, нелинейный расчет, поперечная сила.

Введение. Композитная арматура (АКП) – современный строительный материал, изготавливаемый на основе стеклянных, базальтовых или углеродных волокон, пропитанных полимерной матрицей. В сравнении с традиционной стальной арматурой АКП обладает высокой коррозионной стойкостью, малой объемной массой и диэлектрическими свойствами, что делает ее востребованной при строительстве в агрессивных средах и на объектах с повышенными требованиями к долговечности конструкций. Применение АКП в железобетонных конструкциях требует учета ее анизотропности и пониженного модуля упругости по сравнению со сталью [1].

Большинство исследований бетонных балок с АКП посвящены прочности, трещиностойкости и деформативности их нормальных сечениях [2–5]. Работы, рассматривающие применение АКП для поперечного армирования, немногочисленны. Особенности восприятия поперечных сил прямоугольными балками с композитным армированием наклонных сечений изучались в работах [6–10], двутавровых и тавровых балок – в [11, 12]. Характер работы наклонных сечений с АКП определяется рядом факторов: сниженной прочностью изогнутых участков хомутов, низким модулем упругости АКП, отсутствием физического предела текучести и слабым нагельным эффектом [13, 14].

На участках загиба хомуты подвержены одновременному действию растягивающих напряжений вдоль волокон, поперечных напряжений со стороны охваченного хомутами бетона и напряжений сцепления с бетоном. Это снижает прочность криволинейных участков АКП по сравнению с прямыми. В [15–18] прочность в этих зонах составила 30–50 % от прочности прямых участков, при этом прочность снижается с ростом кривизны стержня.

Силы зацепления, действующие вдоль наклонных трещин, снижаются при использовании АКП из-за большей ширины раскрытия трещин и значительных деформаций хомутов. Действие сил зацепления возможно при деформациях поперечной арматуры до 0,4 % [18], в то время как деформации композитных хомутов зачастую превышают 1 %.

Раскрытие наклонных трещин сопровождается сдвигом, вызывающим локальные изгибные усилия в хомутах. Из-за ориентированного расположения волокон АКП эти усилия могут вызывать преждевременный разрыв хомутов в зоне пересечения трещиной [12]. В [14] испытаниями специальных образцов установлено, что минимальная прочность АКП при диагональном пересечении трещиной составляет около 65 % прочности вдоль волокон, без выявленной зависимости прочности от величины угла между стержнем и трещиной.

Разрушение балок со стальными хомутами наступает вследствие раздробления или разрыва (среза) бетона над вершиной наклонной трещины. В свою очередь, разрушение балок с поперечным композитным армированием помимо описанной формы [19] может также происходить и в результате разрыва хомутов [12, 20].

В настоящей статье приведены результаты комплексных экспериментальных и численных исследований сопротивления наклонных сечений железобетонных балок с композитным поперечным армированием. Задачи работы включали расчетную оценку напряженно-деформированного состояния АКП в месте пересечения с наклонными трещинами, построение нелинейных конечно-элементных моделей для расчета сопротивления балок поперечным силам, проведение испытаний специальных образцов АКП и балок с композитным армированием наклонных сечений, оценка точности моделей сопоставление теоретических и опытных результатов.

Материалы и методы. Построение конечно-элементных моделей балок выполнено в

программном комплексе Abaqus FEA, обладающем для железобетонных конструкций развитым функционалом свойств материалов, возможностью моделирования нелинейного поведения конструкций, создания сечений сложной геометрии, наглядной визуализации результатов расчета (деформаций, трещин, разрушения). Все компоненты предлагаемых конечно-элементных моделей – бетон, арматура и опоры балок – заданы в виде трехмерных деформируемых твердых тел (рис. 1). Нагружение осуществляли по принятой при испытаниях схеме. Опорным элементам были заданы граничные условия, соответствующие принятым в экспериментальных исследованиях. Нагружение моделей осуществляли через вспомогательный элемент заданием ему вертикальных перемещений. Взаимодействие арматуры и бетона обеспечивалось наложением связи «встраиваемый элемент». Между вспомогательными опорными элементами и бетоном была назначена жесткая связь «поверхность – поверхность» [21].

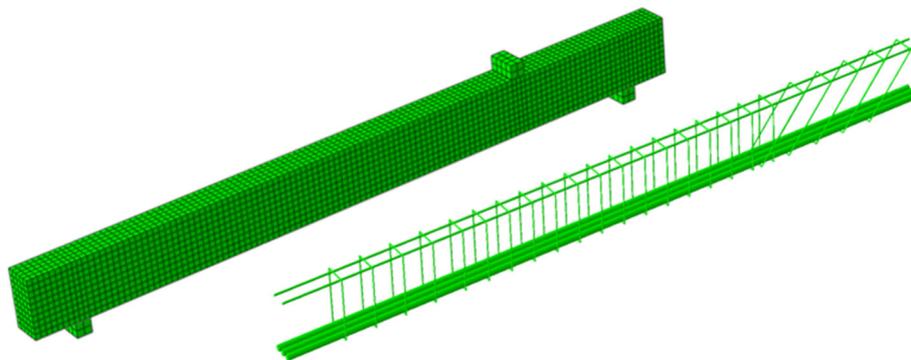


Рис. 1. Пример общего вида модели балки и арматурного каркаса

При моделировании случаев с раздроблением бетона сжатой зоны стальную и композитную арматуру задавали стержневыми упругими элементами. В моделях для случаев разрушения балок с разрывом композитных хомутов по наклонной трещине учитывали различие деформативных свойств АКП в разных направлениях. Для этого в Abaqus FEA были использованы объемные конечные элементы с типом задания параметров материала «инженерные константы» [21], позволяющим назначать различные значения модуля упругости в трех направлениях. Модуль упругости АКП в направлении волокон принимали по результатам испытаний на осевое растяжение, в двух оставшихся направлениях – по данным [12].

Бетон описывали моделью пластического деформирования с накоплением повреждений (Concrete Damage Plasticity или CDP) с модифицированной поверхностью текучести Друкера –

Прагера. Развитие поверхности текучести определяется эквивалентными пластическими деформациями при растяжении и сжатии. Потенциал пластического течения и поверхность текучести записывают с помощью двух инвариантов тензора напряжений – гидростатических напряжений и девиаторной части [22]. В качестве зависимости «напряжения-деформации» при сжатии принята диаграмма деформирования ЕКБ-ФИБ, при растяжении – усредненная кусочно-линейная диаграмма по [23]. Параметрические точки диаграмм деформирования назначали согласно опытным данным. Величины других параметров модели CDP – эксцентриситета ϵ , параметра вязкости μ , отношения второго инварианта напряжений на растягивающем меридиане K_c , отношения напряжений σ_{b0} и σ_{c0} , угла дилатансии ψ – оставляли назначенными программой по умолчанию.

Уровень напряжений в конечных элементах, реализующих поведение бетона, характеризуется коэффициентами повреждения [24] при растяжении $d_t = 1 - \frac{\sigma_{bt}}{\sigma_{btpk}}$ и сжатии $d_c = 1 - \frac{\sigma_b}{R_b}$ [25]. Коэффициенты d_c и d_t активируются при достижении сжимающими и растягивающими напряжениями вершин соответствующих диаграмм деформирования бетона. Расчеты по составленной модели позволяли получить графики роста прогибов балок, картины трещинообразования на различных этапах нагружения, изополя напряжений в арматуре и бетоне.

Проверку точности предложенных конечно-элементных моделей осуществляли сравнением с результатами собственных и чужих испытаний балок. Программа экспериментальных исследований авторов (табл. 1) включала 8 испытаний

балок сечением 100x200 мм (рис. 2, а), армированных в приопорных зонах стальными (эталонные образцы) и композитными (опытные образцы) хомутами (рис. 2, б). Для измерения деформаций хомутов по ожидаемой траектории образования критической наклонной трещины на них были наклеены тензорезисторы (рис. 2, в).

Хомуты эталонных балок были изготовлены из проволоки Вр-1 диаметром 5 мм, опытных балок – из базальтопластиковой арматуры диаметром 4 мм. Базальтопластиковые хомуты были изготовлены ООО «НЗК» (г. Новосибирск) из одной партии арматуры по чертежам автора. Угол наклона хомутов в соответствии с задачами исследования принимали равным 45 и 90°. Продольная арматура как эталонных, так и опытных балок состояла из трех стержней А400 диаметром 18 мм. Для испытания всех балок был принят единый пролет среза $a/h_0 = 2,5$.

Таблица 1

План экспериментальных исследований

№ балки	Шифр пролета среза	Хомуты	α , град.	μ_{fw} , %
1	О1-В-К-80	Ø4 АБК	90	0,31
	О2-В-К-100	Ø4 АБК	90	0,25
2	О3-Н-К-60	Ø4 АБК	45	0,42
	О4-Н-К-75	Ø4 АБК	45	0,34
3	О5-В-В-80	Ø5 Вр-1	90	0,47
	О6-В-В-100	Ø5 Вр-1	90	0,38
4	О7-Н-В-60	Ø5 Вр-1	45	0,63
	О8-Н-В-75	Ø5 Вр-1	45	0,50

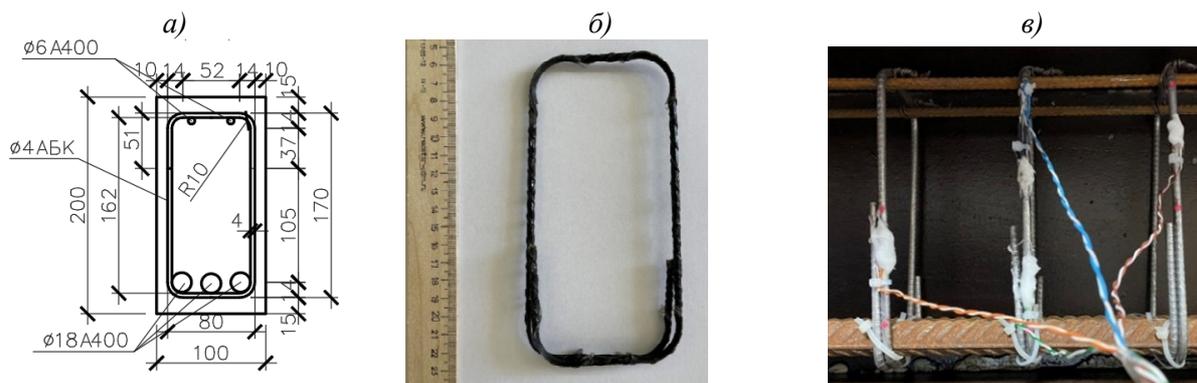


Рис. 2. Армирование опытных образцов: а) поперечное сечение балок; б) хомут из АБК; в) тензорезисторы на хомутах

Конечно-элементные модели по принятой методике составлены также для балок из опытов М.А. Иссы [26], С. Вивекананда и А. Сумати [27], Курта М. К [12] и Усанова С.В. [28].

Основная часть. Полученные для наших образцов графики деформирования балок хорошо согласуются с экспериментальными на

всех стадиях нагружения. На рис. 3 показан пример совмещения опытных и расчетных графиков прогибов. Из полученных изополей параметра dc следует, что разрушение балок в моделировании, как и в опытах, наступило от раздробления бетона над вершиной наклонной трещины вблизи точки приложения нагрузки (рис. 4).

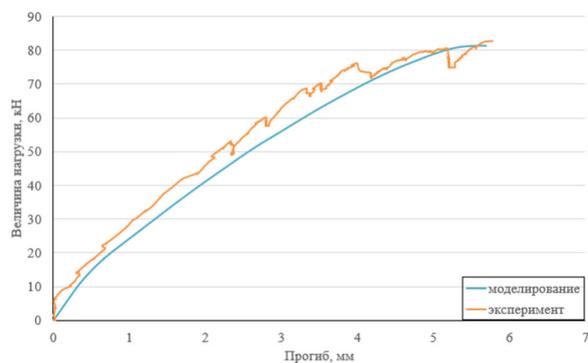


Рис. 3. Расчетные и опытные графики прогибов для балки О3-Н-К-60

Опытные (Q_{exp}) и теоретические значения прочности наклонных сечений наших балок, вычисленные по предложенной методике конечно-элементного моделирования (Q_{Abaq}) и по формулам СП 295.1325800 ($Q_{СП}$), приведены в табл. 2. Результаты расчета балок со стальными хомутами (образцы 3 и 4) по формулам СП оказались близки к опытным разрушающим нагрузкам. Среднее значение отношения $Q_{exp} / Q_{СП}$ составляет 0,98 при коэффициенте вариации 8,3 %. При этом формулы норм существенно переоцени-

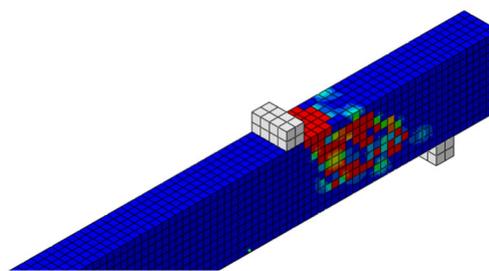


Рис. 4. Область разрушения сжатого бетона балки О2-В-К-100

вают несущую способность балок с композитным поперечным армированием – отношение $Q_{exp} / Q_{СП}$ для них равно 0,57. Более точными получились вычисления предложенными нелинейными конечно-элементными моделями. Они недооценивают опытные величины разрушающих поперечных сил на 6%, что следует считать удовлетворительным, принимая во внимание способность модели производить вычисления для балок как со стальными, так и с композитными хомутами.

Таблица 2

Сравнение расчетных и опытных значений разрушающих поперечных сил

Шифр образца		Q_{exp} , кН	$Q_{СП}$, кН	Q_{Abaq} , кН	$Q_{exp} / Q_{СП}$	Q_{exp} / Q_{Abaq}
1	О1-В-К-80	93,26	166,33	90,58	0,56	1,03
	О2-В-К-100	83,6	138,53	70,47	0,60	1,19
2	О3-Н-К-60	82,8	166,33	81,38	0,50	1,02
	О4-Н-К-75	83,79	138,53	71,62	0,60	1,17
3	О5-В-В-80	105,975	108,51	107,25	0,98	0,99
	О6-В-В-100	81,675	92,68	77,56	0,88	1,05
4	О7-Н-В-60	109,137	110,71	101,43	0,99	1,08
	О8-Н-В-75	102,91	94,88	106,25	1,08	0,97

В исследовании М.А. Иссы [26] испытаны балки прямоугольного сечения с композитным продольным и поперечным армированием стержнями АБК и без поперечной арматуры. Варьируемыми параметрами в исследовании являлись коэффициент продольного армирования, сечение балок и пролет среза. В работе С. Вивеканандам и А. Сумати [27] рассмотрено поведение балок прямоугольного сечения при разных сочетаниях классов бетона, стального и стеклопластикового продольного и поперечного армирования.

В результате моделирования балок [26, 27] получены зоны с образованием наклонных трещин (рис. 5, а и 6, а), участки раздробления бетона, а также близкие к опытным расчетные графики зависимости прогибов от величины прило-

женной силы (рис. 5, б и 6, б). Полученные графики деформирования балок хорошо согласуется с экспериментальным на всех стадиях нагружения. Разрушение моделей балок, как и при испытаниях, наступило в результате раздробления бетона над наклонной трещиной.

Численный анализ случаев с разрывом композитных стержней в зоне их пересечения наклонной трещиной включал моделирование трех балок, при испытании которых была получена эта форма разрушения: нашей балки О1-В-К-80, двутавровых балок Б17 из работы Усанова С.В. [1] и S4АН-0.8-7 из работы Курта М.К. [12].

В работе [28] исследовано поведение двутавровых железобетонных балок с композитным и стальным поперечным армированием при разных пролетах среза. Балка Б17, разрушившаяся в результате разрыва поперечной арматуры, имела

высоту сечения 280 мм, ширину полок 200 мм и толщину стенки 30 мм. Поперечное армирование

было выполнено одиночными базальтопластиковыми стержнями диаметром 4 мм с шагом 105 мм.

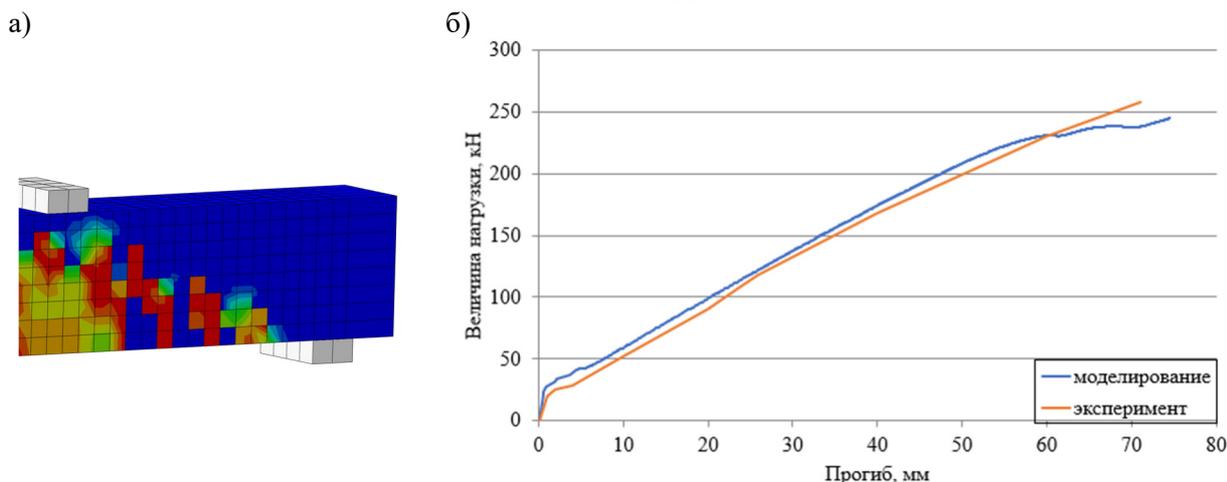


Рис. 5. Результаты расчета балки 3-16B2 [27]: а) зона образования трещин в пролете среза; б) расчетный и опытный графики прогибов

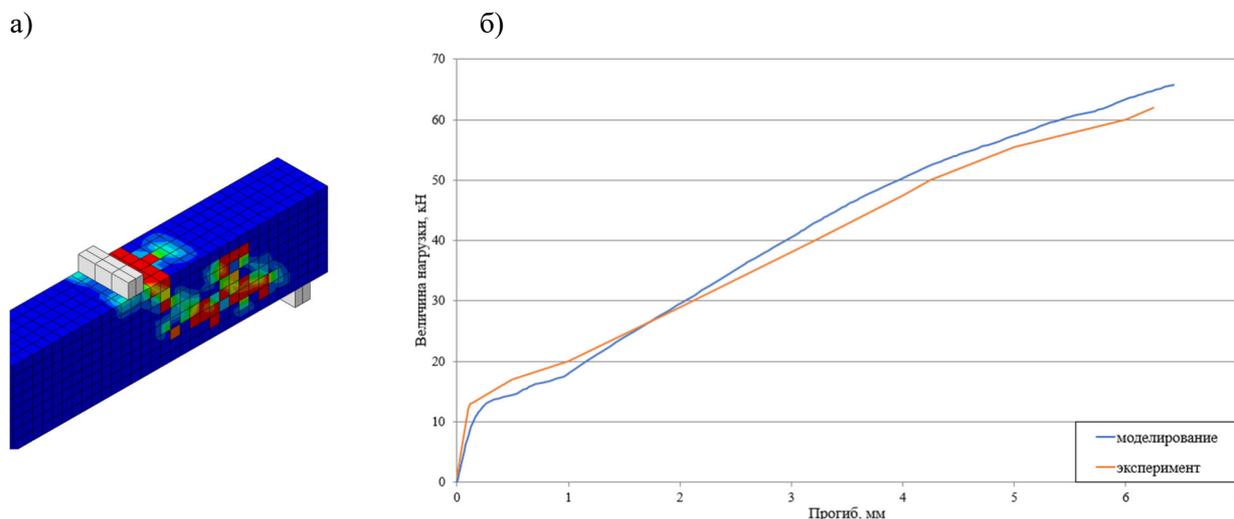


Рис. 6. Результаты расчета балки M25-GS [28]: а) область разрушения сжатой зоны балки; б) расчетный и опытный графики прогибов

Высота сечения, ширина полок и толщина стенки балки S4AH-0.8-7 из работы [12] составляли соответственно 650, 400 и 100 мм. Поперечное армирование балки в приопорной зоне состояло из спаренных стеклопластиковых стержней диаметром 12 мм, расставленных с шагом 300 мм. Нагружение балки осуществлялось с относительным пролетом среза $a/h_0 = 3,6$.

При составлении моделей балок создавали искусственную наклонную трещину (разделение конечных элементов) с траекторией и длиной, аналогичной трещине, по которой разорвались композитные стержни при испытаниях (рис. 7). НДС композитных хомутов анализировали, приложив к моделям балок нагрузку, при которой происходило разрушение балок при испытаниях.

Оригинальность подхода заключается в моделировании стержней объемными элементами с анизотропными деформативными свойствами. Расчетное НДС, возникающее в хомутах, демонстрирует способность модели имитировать локальный изгиб стержня в месте пересечения с наклонной трещиной (рис. 7). Нормальные напряжения в поперечном сечении стержня распределены на этом участке неравномерно. Так, в модели балки O1-B-K-80 крайевые напряжения в стержне в месте изгиба равны примерно 883 МПа, в то время как в середине сечения значения стержня – около 650 МПа (рис. 7). Таким образом, разница между максимальными и средними напряжениями составила 26%. Аналогичная картина получена при моделировании других балок.

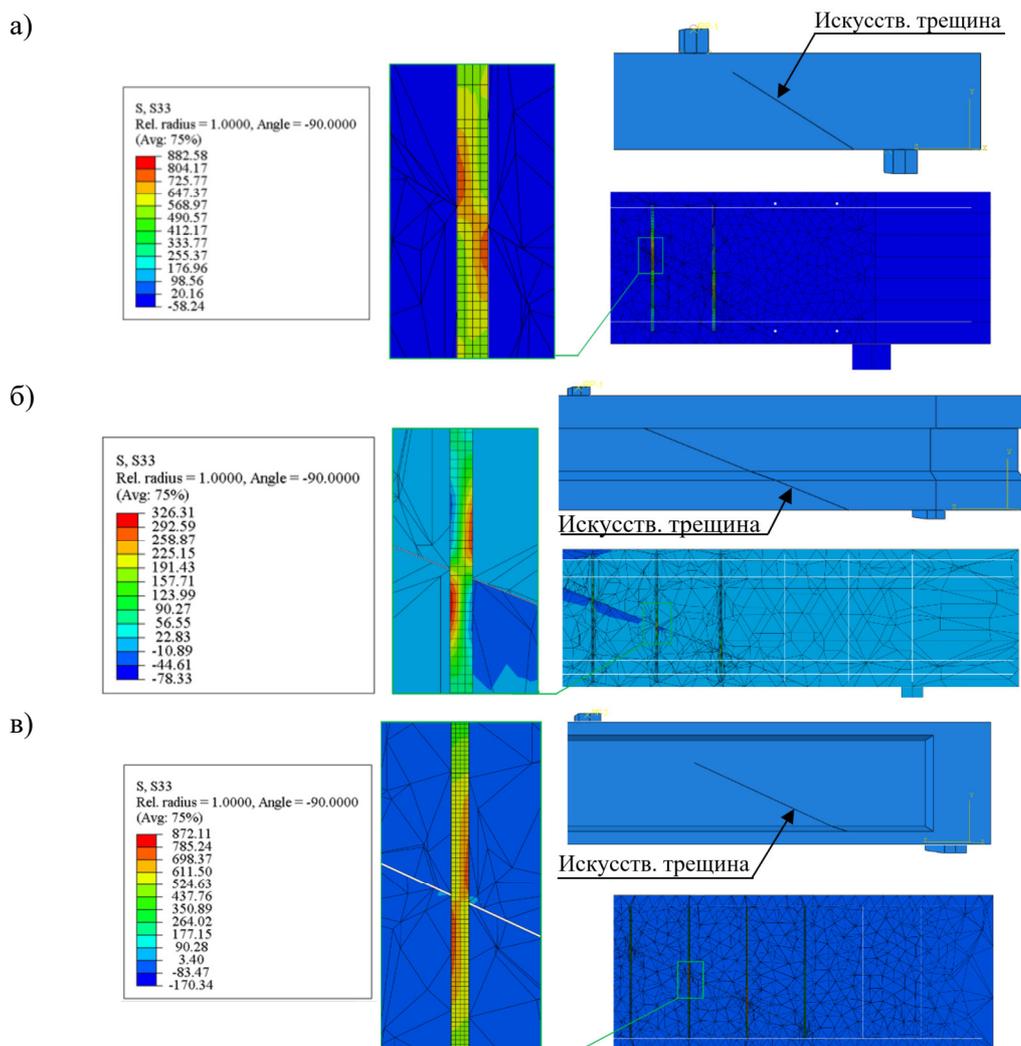


Рис. 7. Моделирование напряжений стержнях поперечного армирования:
 а) балки О1-В-К-80; б) балки Б17 [28]; в) балки S4AH-0.8-7 [12]

В табл. 3 сведены значения временного сопротивления АКП, использованной в опытах для хомутов, и полученные конечно-элементными расчетами значения максимальных напряжений в них. Во всех случаях разрыв хомутов произошёл при напряжениях, не достигающих сопротивления АКП, что можно объяснить снижением прочности стержней в результате их локального изгиба по наклонной трещине. При этом разница

между значениями этих напряжений оказалась в достаточно узком диапазоне 15–17%. Исходя из этого, можно рекомендовать ограничение напряжений в хомутах при моделировании 80% от прочности АКП при осевом растяжении. Определяющим это ограничение может стать в тех случаях, когда загиб хомутов будет выполнен с достаточно большим радиусом, исключая разрушение на гнущем участке.

Таблица 3

Результаты моделирования АКП в пересечении с наклонной трещиной

Источник	Наименование балки	Временное сопротивление при осевом растяжении, МПа	Максимальные расчетные напряжения в хомутах, МПа	Разница напряжений, %
Опыты авторов	О1-В-К-80	1049	883	16
[12]	S4AH-0.8-7	382	326	15
[28]	Б17	1049	872	17

Выводы. Предложена методика конечно-элементного моделирования сопротивления наклонных сечений балок с композитным поперечным армированием. Задача решена в нели-

нейной пространственной постановке с применением модели пластического деформирования бетона с накоплением повреждений (CDP). В случаях разрыва стержней учтены ортотропные

свойства композитной арматуры и реальные траектории наклонных трещин. Подтверждена высокая точность разработанных численных моделей: расчетные значения несущей способности и графики развития прогибов хорошо согласуются с результатами испытаний как авторских, так и представленных в литературе образцов. Моделирование напряженно-деформированного состояния композитных стержней в зоне пересечения с трещинами достоверно отражает распределение нормальных напряжений, объясняющее снижение прочности арматуры по сравнению с осевым растяжением. Показано, что разрыв хомутов происходит при напряжениях, составляющих около 80 % от прочности композитной арматуры. Разработанная методика может послужить эффективным инструментом для расчетов по прочности и прогибам балок с поперечным композитным армированием. Кроме того, предложенные численные модели в сочетании с физическими могут служить инструментом анализа НДС наклонных сечений с композитным армированием для сближения результатов расчета с результатами экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамов М.М., Руденко О.В., Усанов С.В. Нелинейная конечно-элементная модель для расчета прочности стенки двутавровых балок с композитным поперечным армированием // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 1. С. 10–16.
2. Megahed K. Predicting flexural strength of hybrid FRP-steel reinforced beams using symbolic regression and ML techniques // Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-05775-7.
3. Wei B., He X., Zhou M., Wang H., He J. Experimental study on flexural behaviors of FRP and steel bars hybrid reinforced concrete beams // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm. 2023.e02759.
4. Мирсаяпов И.Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомолекулярной полимерной композитной арматуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 3, № 65. С. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145.
5. Польской П.П., Хишмах М., Ахмад М. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжелого бетона // Инженерный вестник Дона. 2012. №4. С. 35–37. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/doc/polskoy_mervat_mihoub.doc_1304.doc.
6. Меркулов С.И., Есипов С.М. Армирование бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами // Эксперт: теория и практика. 2025. Т. 1, № 28. С. 145–149. DOI: 10.51608/26867818_2025_1_145.
7. Abed F., Ahmed E.R., Abdalla S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams // Journal of The Institution of Structural Engineers. 2019. Vol. 20. Pp. 689–701. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.019.
8. Bywalski C., Drzazga M., Kaźmierowski M., Kamiński M. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with A New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study // Wroclaw University of Science and Technology. 2020. Vol. 13 (5). DOI: 10.3390/ma13051159.
9. Krall M., Polak M.A. Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement // Engineering Structures. 2019. Vol. 198(5). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109333.
10. Han S., Fan C., Zhou A., Ou J. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups // Engineering Structures. 2023. Vol. 278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115520.
11. Ahmed E.A. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a Fiber Reinforced Polymer (FRP) Stirrups // The University of Sherbrooke. Canada, 2009. 291 Pp.
12. Kurth M., Hegger J. Shear resistance of concrete members with fibre reinforced polymers (FRP) – Experimental investigations // Bauingenieur. 2013. Vol. 88. Pp. 393–402.
13. Nanni A., Faza S. Design and construction of concrete reinforced with FRP bars: An emerging technology // ACI Concrete International. 2002. Vol. 24(11). Pp. 53–58.
14. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines // Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. Pp. 859–872. DOI: 10.1139/L00-004.
15. Maruyama K., Zhao W. Flexural and shear behavior of concrete beams reinforced with FRP rods / In: Swamy R. N. (ed.). – Corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield : Sheffield Academic Press, 1994. Pp.1330–1339.
16. Maruyama K., Rizkalla S.H. Shear Design Consideration for Pretensioned Prestressed Beams // ACI Structural Journal. 1988. Vol. 85(5). Pp. 492–498. DOI: 10.14359/2782.
17. Nagasaka T., Fukuyama H., Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups // Fiber-reinforced plastic reinforcement for concrete structures – international symposium. – Detroit: American Concrete Institute, 1993. Pp. 789–812. DOI: 10.14359/4138.

18. MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd ed. New Jersey : Prentice Hall, 1997. 938 pp.

19. Hegger J., Niewels J., Kurth M. Shear analysis of concrete members with fiberreinforced polymers (FRP) as internal reinforcement / In: 9th international symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures FRPRCS-9. 2009.

20. Tomlinson D., Fam A., Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 19(2). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491.

21. ABAQUS Online Documentation: Version 6.5-1. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch01s02.html> (дата обращения: 09.06.2025).

22. Raza A., Khan Q.U.Z., Ahmad A. Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019(1). DOI:10.1155/2019/1745341.

23. Wahalathantri B.L., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Fawzia S. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements

using ABAQUS / In: First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University of Technology. Brisbane, 2011. Pp. 260–264.

24. Solhmirzaei R., Kodur V. A Numerical Model for Tracing Structural Response of Ultra-High Performance Concrete Beams // Modelling. 2021. Vol. 2. Pp. 448–466. DOI: 10.3390/modelling2040024.

25. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Saleh M., Jaafar M.S.B., Karimzade K. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete // Structural Engineering International. 2017. Vol. 27(1). Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.

26. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups // Journal of Composites for Construction. 2016. Vol. 20(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638.

27. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars // International Journal of ChemTech Research. 2015. Vol. 8(2). Pp. 635–642.

28. Усанов С.В., Тамов М.М. Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базальтокомпозитной арматуры // Инженерный вестник Дона. 2022. Т. 4, № 88. С. 344–361.

Информация об авторах

Тамов Мурат Мухамедович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: murat.tamov@gmail.com. Кубанский государственный технологический университет. 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2

Поступила 04.07.2025 г.

© Тамов М.М., 2026

Tamov M.M.

Kuban State Technological University

E-mail: murat.tamov@gmail.com

NUMERICAL MODELS FOR SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH FRP STIRRUPS

Abstract. *This paper presents the results of comprehensive numerical and experimental investigation of shear behavior of reinforced concrete beams with FRP shear reinforcement. A finite element modeling approach is proposed using Abaqus FEA, incorporating the measured physical and mechanical properties of materials, including the nonlinear behavior of concrete represented by the Concrete Damage Plasticity (CDP) model. The accuracy of the developed numerical models is validated through comparison with experimental results obtained by the authors and other researchers. A strong agreement was observed between the calculated and experimental values of beam deflections and load-bearing capacity for beams with both steel and FRP shear reinforcement. For cases involving failure due to stirrup rupture, the models account for the orthotropic properties of FRP reinforcement and the observed trajectories of shear cracks. It was found that, due to non-uniform normal stress distribution induced by local bending in the region of crack-stirrup intersection, the strength of FRP bars may decrease to 80% of their axial tensile strength. The proposed modeling methodology enables reliable assessment of the load-bearing capacity and deformability of beams with both*

steel and FRP shear reinforcement and is recommended for practical application in shear design of reinforced concrete beams.

Keywords: reinforced concrete beams, FRP reinforcement, nonlinear analysis, shear.

REFERENCES

1. Tamov M.M., Rudenko O.V., Usanov S.V. Nonlinear finite element model for calculating the wall strength of I-beams with composite transverse reinforcement [Nelineynaya konechno-elementnaya model' dlya rascheta prochnosti stenki dvutavrovyykh balok s kompozitnym poperechnym armirovaniem]. Scientific Works of the Kuban State Technological University. 2023. No. 1. Pp. 10–16. (rus)
2. Megahed K. Predicting flexural strength of hybrid FRP-steel reinforced beams using symbolic regression and ML techniques. Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-05775-7.
3. Wei B., He X., Zhou M., Wang H., He J. Experimental study on flexural behaviors of FRP and steel bars hybrid reinforced concrete beams. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm. 2023.e02759.
4. Mirsayapov I.T., Lim V.A., Mirsayapov A. I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement [Otsenka effektivnosti primeneniya vysokomodul'noy polimernoy kompozitnoy armatury]. News KSUAE. 2023. Vol. 3(65). Pp. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. (rus)
5. Polskoy P.P., Khishmakh M., Akhmad M. The effect of fiberglass reinforcement on the strength of normal sections of bending elements made of heavy concrete [O vliyaniy stekloplastikovoy armatury na prochnost' normal'nykh secheniy izgibaemykh elementov iz tyazhelogo betona]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. No. 4. Pp. 35–37. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/doc/polskoy_mervat_mihoub.doc_1304.doc. (rus)
6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Reinforcement of concrete and reinforced concrete structures with composite materials [Armirovanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami]. Expert: theory and practice. 2025. Vol. 1(28). Pp. 145–149. DOI: 10.51608/26867818_2025_1_145. (rus)
7. Abed F., Ahmed E.R., Abdalla S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams. Journal of The Institution of Structural Engineers. 2019. Vol. 20. Pp. 689–701. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.019.
8. Bywalski C., Drzazga M., Kaźmierowski M., Kamiński M. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with A New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study. Wroclaw University of Science and Technology. 2020. Vol. 13(5). DOI: 10.3390/ma13051159.
9. Krall M., Polak M.A. Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement. Engineering Structures. 2019. Vol. 198, No. 5. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109333.
10. Han S., Fan C., Zhou A., Ou J. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups. Engineering Structures. 2023. Vol. 278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115520.
11. Ahmed E.A. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a Fiber Reinforced Polymer (FRP) Stirrups. The University of Sherbrooke. Canada, 2009. 291 pp.
12. Kurth M., Hegger J. Shear resistance of concrete members with fibre reinforced polymers (FRP) – Experimental investigations. Bauingenieur. 2013. Vol. 88. Pp. 393–402.
13. Nanni A., Faza S. Design and construction of concrete reinforced with FRP bars: An emerging technology. ACI Concrete International. 2002. Vol. 24, No. 11. Pp. 53–58.
14. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines. Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. Pp. 859–872. DOI: 10.1139/L00-004.
15. Maruyama K., Zhao W. Flexural and shear behavior of concrete beams reinforced with FRP rods. Swamy R. N. (ed.). Corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. Pp. 1330–1339.
16. Maruyama K., Rizkalla S.H. Shear Design Consideration for Pretensioned Prestressed Beams. ACI Structural Journal. 1988. Vol. 85, No. 5. Pp. 492–498. DOI: 10.14359/2782.
17. Nagasaka T., Fukuyama H., Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. Fiber-reinforced plastic reinforcement for concrete structures – international symposium. Detroit: American Concrete Institute, 1993. Pp. 789–812. DOI: 10.14359/4138.
18. MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 938 pp.
19. Hegger J., Niewels J., Kurth M. Shear analysis of concrete members with fiberreinforced polymers (FRP) as internal reinforcement. Collected papers of 9th international symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures FRPRCS-9. Sydney, Australia, July 13–15, 2009. Sydney, Australia: International Institute for FRP in Construction, 2009.
20. Tomlinson D., Fam A., Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure

and Shear. *Journal of Composites for Construction*. 2014. Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491.

21. ABAQUS Online Documentation: Version 6.5-1. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch01s02.html>.

22. Raza A., Khan Q.U.Z., Ahmad A. Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS. *Advances in Civil Engineering*. 2019. Vol. 2019, No. 1. DOI: 10.1155/2019/1745341.

23. Wahalathantri B.L., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Fawzia S. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. *First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland University of Technology, Brisbane, 2011. Pp. 260–264.

24. Solhmirzaei R., Kodur V. A Numerical Model for Tracing Structural Response of Ultra-

High Performance Concrete Beams. *Modelling*. 2021. Vol. 2. Pp. 448–466. DOI: 10.3390/modelling2040024.

25. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Saleh M., Jaafar M. S. B., Karimzade K. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. *Structural Engineering International*. 2017. Vol. 27, No. 1. Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.

26. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2016. Vol. 20, No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638.

27. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars. *International Journal of ChemTech Research*. 2015. Vol. 8, No. 2. Pp. 635–642.

28. Usanov S.V., Tamov M.M. Crack resistance of support zone regions of I-beams with transverse reinforcement made of basalt composite bars [Treshchinostoykost' priopornykh zon dvutavrovyykh balok s poperechnym armirovaniem iz bazaltokompozitnoy armatury]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. Vol. 4, No. 88. Pp. 344–361. (rus)

Information about the authors

Tamov, Murat M. PhD, Assistant professor. E-mail: murat.tamov@gmail.com. Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2.

Received 04.07.2025

Для цитирования:

Тамов М.М. Численные модели балок с композитным армированием наклонных сечений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 20–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29

For citation:

Tamov M.M. Numerical models for shear behavior of reinforced concrete beams with frp stirrups. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 2. Pp. 20–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29