

Научная статья
УДК 69.07
<https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.4.63>
EDN: AVNOST

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балок с жесткой композитной арматурой

В. И. Римшин^{1,2✉}, С. В. Усанов^{2,3}, А. Е. Воробьев⁴, Е. С. Савельев⁴

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва)

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (г. Москва)

³Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар)

⁴Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (г. Новосибирск)
v.rimshin@niisf.ru✉

Аннотация

Введение. Одним из ключевых этапов разработки ВМ-модели является её расчет на восприятие нагрузок и воздействий различного рода. Модель для выполнения таких расчетов выгружается в специализированные программные комплексы. Метод конечных элементов – один из самых распространенных численных методов расчёта конструкций. Его преимущества – возможности расчета конструкций со сложной геометрией путем аппроксимации поверхностей с требуемой степенью точности, учета в составе конструкции материалов с разными свойствами и ряд других. Наиболее существенным недостатком метода является необходимость проведения большого количества вычислений. Современные вычислительные мощности компьютеров позволяют выполнять расчеты довольно быстро, хотя сложность вычислений и требования к расчетам также возрастают.

К одним из перспективных материалов в строительной отрасли относят пултрузионные полимерные профили (ППП). Конструкции с армированием из ППП стали применяться в строительстве недавно; экспериментальные данные, соответственно, представлены в ограниченном количестве. Как и в случае с конструкциями, армированными композитной полимерной арматурой, при использовании ППП в зарубежных расчетных методиках проводят аналогию со стальной жесткой арматурой с поправкой на свойства ППП. Отечественные нормативные документы для конструкций с жесткой композитной арматурой в настоящее время еще не разработаны, чем и обусловлена актуальность данного исследования.

Целью исследования являются создание конечно-элементной модели для расчетов несущей способности изгибаемых элементов с жесткой композитной полимерной арматурой и анализ полученных результатов.

Методика испытания. В настоящей работе численная реализация модели выполнена в программном комплексе SIMULIA Abaqus, отличающемся рядом преимуществ. Комплекс дает возможность создавать как статическое, так и динамическое нагружение, подробно визуализировать результаты расчета, имеет специальные опции для получения решений с учетом нелинейных эффектов (пластичность, ползучесть, изменение жесткости) и другие. Задача решена в пространственной постановке с учетом нелинейных свойств бетона и арматуры.

Результаты. Численная модель может быть использована для дальнейших исследований поведения под нагрузкой конструкций с жесткой композитной арматурой. Предложенная модель дает возможность подобрать оптимальные параметры конструирования изгибаемых элементов с армированием из ППП, использующих прочностные свойства композитного профиля в полной мере. Модель основана на законах деформации бетона и арматуры различных типов, которые имеют опытные подтверждения.

Заключение. Новые возможности прогнозирования прочности и деформативности перспективных материалов и конструкций в программных комплексах, интегрированных с ВМ-моделями, дадут современные и востребованные технические решения. Это отвечает принятым в нашей стране стратегическим подходам к цифровой трансформации в строительстве.

Ключевые слова: численное моделирование; напряженно-деформированное состояние; балка; жесткая композитная полимерная арматура; несущая способность; изгибаемые элементы.

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балок с жесткой композитной арматурой / В. И. Римшин, С. В. Усанов, А. Е. Воробьев, Е. С. Савельев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 63–73. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.63>; EDN: AVNOST

Введение

Первое упоминание термина Building Information Model (BIM) относят к 1992 году. В настоящее время процесс проектирования в строительной отрасли уже тесно связан с созданием информационных моделей зданий и сооружений. Одним из ключевых этапов разработки BIM-модели является её расчет на восприятие нагрузок и воздействий различного рода. Модель для выполнения таких расчетов выгружается в специализированные программные комплексы.

Метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий решать широкий круг научных и инженерных задач и являющийся, наверное, самым распространенным в мире численным методом расчёта конструкций, приобрел популярность благодаря своим преимуществам. К ним относят возможность расчета конструкций со сложной геометрией путем аппроксимации поверхностей с требуемой степенью точности, возможность учета в составе конструкции материалов с разными свойствами и ряд других.

Из недостатков МКЭ наиболее существенным является необходимость проведения большого количества вычислений. Современные вычислительные мощности компьютеров позволяют выполнять расчеты довольно быстро, хотя сложность вычислений и требования к расчетам также возрастают.

Из широко распространенных программных комплексов, основанных на МКЭ, выделим такие известные, как

ABAQUS, ANSYS и некоторые другие. Они обладают возможностью импорта данных из BIM-моделей, используя соответствующие API [1–7].

К одним из перспективных материалов, внимание к которым в строительной отрасли нарастает, относят пултрузионные полимерные профили (ППП). Их популярность прослеживается по числу публикаций о конструкциях с этими материалами. В августе текущего года вышла в свет первая редакция свода правил РФ, который в скором будущем позволит проектировщикам конструировать из PPP здания и сооружения различного назначения.

Применение пултрузионных полимерных профилей оказывается оправданным в тех случаях, когда их преимущества используются в полном объеме. К основным достоинствам PPP следует отнести высокую прочность при растяжении и стойкость к воздействию коррозии, небольшой удельный вес, немагнитность и радиопрозрачность. Недостатками композитных материалов являются низкий модуль упругости и отсутствие площадки текучести. По мере накопления положительного опыта применения PPP затраты на производство должны снижаться, что повысит экономическую целесообразность их использования.

Конструкции с армированием из PPP стали применяться в строительстве недавно; экспериментальные данные, соответственно, представлены в ограниченном количестве. Как и в случае с конструкци-

ями, армированными композитной полимерной арматурой, при использовании ППП в зарубежных расчетных методиках проводят аналогию со стальной жесткой арматурой с поправкой на свойства ППП. Отечественные нормативные документы для конструкций с жесткой композитной арматурой в настоящее время еще не разработаны.

Целью исследования являются создание конечно-элементной модели для расчетов несущей способности изгибаемых элементов с жесткой композитной полимерной арматурой и анализ полученных результатов. Выборка, составленная на основе экспериментальных данных нескольких авторов [8–10], приведена в таблице 1.

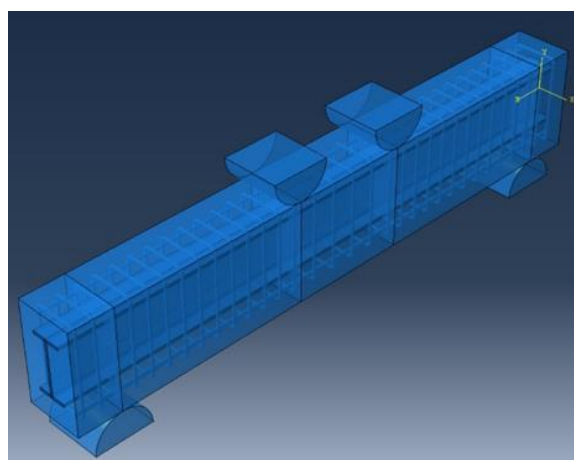
Таблица 1. Характеристики балок

Table 1. Beam characteristics

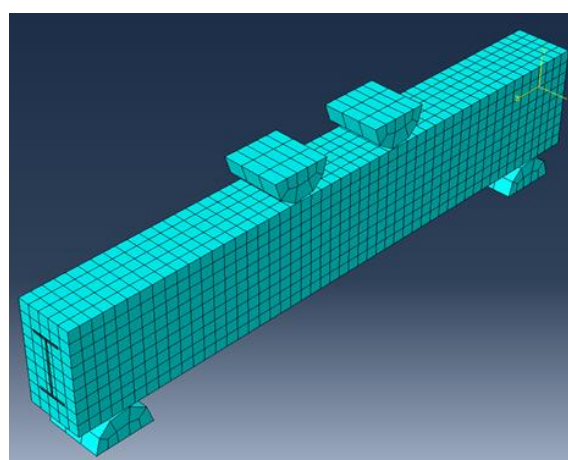
№ п/п	Автор	Шифр балки	b , мм	h_0 , мм	R_b , МПа	R_s , МПа	$R_{жс}$, МПа	μ_s , %	$\mu_{жс}$, %	μ'_s , %	E_s , МПа	$E_{жс}$, МПа	e	M_{ult} , кНм
1	M. N.S. Hadi, et al. [6]	S0.57M	200	312	39,75	584,00	368,00	0,64	6,09	0,25	199200	35838	0	138,36
2		S0.57B	200	312	39,75	584,00	368,00	0,64	6,09	0,25	199200	35838	0,096	134,00
3		F0.46M	200	312	39,75	503,00	368,00	0,54	6,09	0,25	25600	35838	0	119,60
4		F0.46B	200	312	39,75	503,00	368,00	0,54	6,09	0,25	25600	35838	0,096	113,57
5	T.H. Ibrahim, et al. [7]	CG	200	270	29,29	520,70	347,50	0,74	6,11	0,29	200000	27100	0	185,10
6	E.M. Mahmood, et al. [8]	EG	200	270	67,25	520,00	347,50	0,74	6,11	0,29	200000	27100	0	218,68

Все образцы содержали в качестве жесткой арматуры стеклокомпозитные ППП и разрушились по нормальному сечению. Для каждой балки приведены следующие параметры: ширина сечения b , рабочая высота h_0 , призмная прочность бетона R_b , предел текучести стальной арматуры R_s , предел прочности при растяжении композитного профиля $R_{жс}$, процент стального продольного армирования

растянутой зоны μ_s , процент армирования жесткой композитной арматурой $\mu_{жс}$, процент стального продольного армирования сжатой зоны μ'_s , модуль упругости стальной арматуры E_s , модуль упругости композитного профиля $E_{жс}$, эксцентриситет продольной оси композитного профиля относительно нейтральной оси балки e и величина разрушающего изгибающего момента M_{ult} .



а)



б)

Рисунок 1. Общий вид (а) и конечно-элементная модель (б) балки

Fig. 1. General view (a) and finite element model (b) of the beam

Создание конечно-элементной (КЭ) модели выполнено на примере образца 1 из таблицы 1. Численный анализ позволит оценить прогибы изгибаемого элемента, разрушающую нагрузку, напряжения в стальной арматуре и ППП и ряд других параметров. Физико-механические свойства материалов приведены в статье. Общий вид балки и её конечно-элементную модель иллюстрирует рисунок 1.

Методика испытания

Наряду с отечественным программным обеспечением пользуются популярностью для создания КЭ-моделей и зарубежные комплексы для прочностных расчетов. В настоящей работе численная реализация модели выполнена в программном комплексе SIMULIA Abaqus, отличающемся рядом преимуществ. Комплекс дает возможность создавать как статическое, так и динамическое нагружение, подробно визуализировать результаты расчета, имеет специальные опции для получения решений с учетом нелинейных эффектов (пластичность, ползучесть, изменение жесткости) и другие [11].

Задача решена в пространственной постановке с учетом нелинейных свойств бетона и арматуры. Моделирование бетона выполнено пространственными сплошными 8-узловыми элементами типа C3D8R. Работа бетона описывалась моделью пластичного разрушения с повреждениями (в зарубежной терминологии – Concrete Damaged Plasticity (CDP).

Модель CDP использует принцип изотропной упругой поврежденности в совокупности с изотропной пластичностью для моделирования нелинейного поведения бетона и подходит в том числе для нагружения с плавно возрастающей нагрузкой. В качестве основных механизмов разрушения модель CDP предусматривает растрескивание при действии растягивающих напряжений и раздробление при сжатии бетонного элемента [12–27].

В соответствии с рекомендациями жесткий композитный профиль собран из четырехузловых оболочечных элементов типа S4R. Разрушение профиля и деградация его свойств описываются критерием прочности Хашина, включающего критерии прочности волокон при растяжении и сжатии в направлении волокон, критерии прочности матрицы при растяжении и сжатии в поперечном направлении, критерии расслоения при растяжении и сжатии. Напряженно-деформированное состояние профиля оценивается по эквивалентным напряжениям Мизеса.

Для создания стальных стержней продольного и поперечного армирования применили трехмерные двухузловые ферменные элементы типа T3D2, в которых возникают осевые усилия. Конечно-элементная модель учитывает как упругие, так и пластичные свойства материала.

Результаты испытания

Полученные графики прогибов по результатам численных и экспериментальных исследований приведены на рисунке 2.

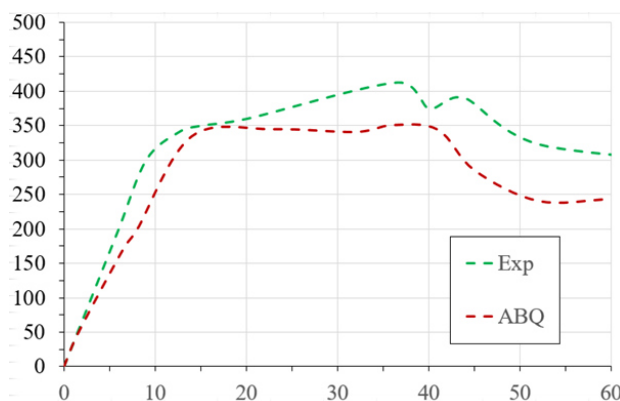


Рисунок 2. Опытные (Exp) и расчетные (ABQ) диаграммы деформирования балки
Fig. 2. Experimental (Exp) and calculated (ABQ) beam deformation diagrams

В момент разрушения образца опытный и осреднённый расчетный прогибы оказываются очень близкими – 36,6 и 36,4 мм соответственно.

Как видно, расчетная кривая по форме и значениям повторяет опытные данные, но лежит несколько ниже (см. рис. 2). Форма разрушения, полученная численным моделированием, соответствует экспериментальной: напряжения

в растянутой стальной арматуре достигают предела прочности (рис. 3) и наступает исчерпание несущей способности балки.

Напряжения в жесткой арматуре при этом своего предела прочности не достигают (рис. 4). Их значения соответствуют примерно 50 % от предельных величин, более эффективно включается в работу растянутая часть профиля.

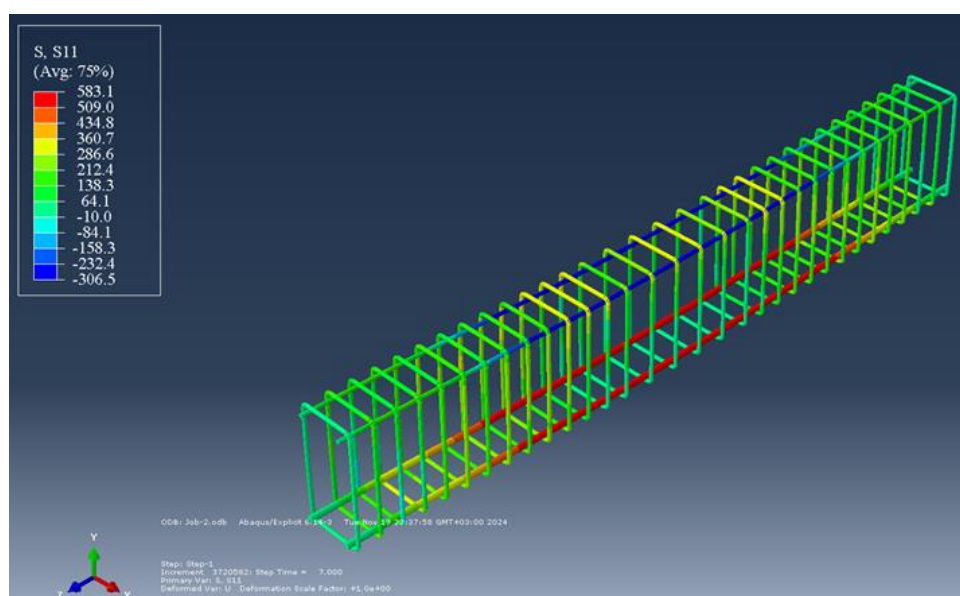


Рисунок 3. Распределение напряжений в стальном арматурном каркасе при разрушении образца
Fig. 3. Distribution of stresses in the steel reinforcement cage during specimen failure

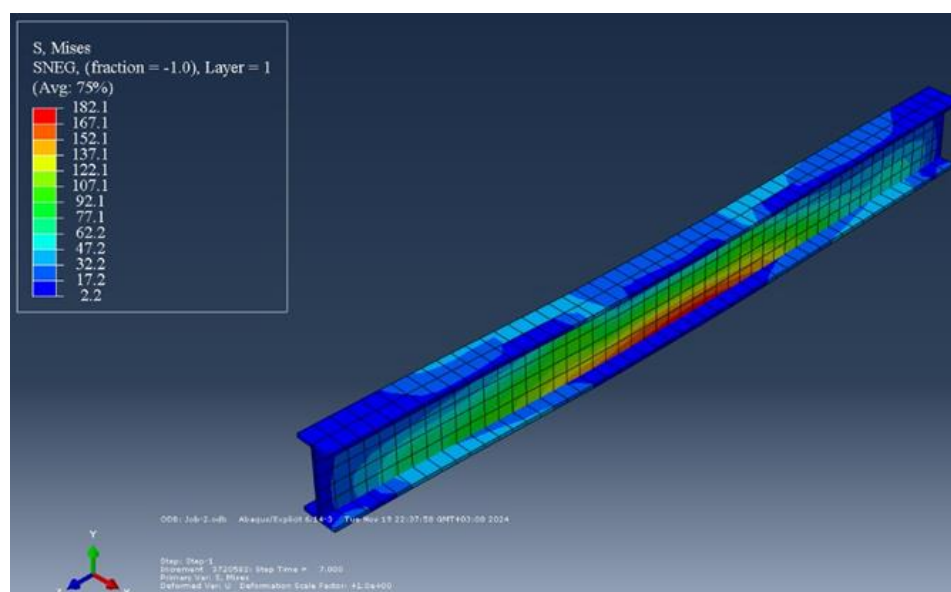


Рисунок 4. Распределение эквивалентных напряжений в жесткой композитной арматуре
Fig. 4. Distribution of equivalent stresses in rigid composite reinforcement

Разработанная конечно-элементная модель дает представление о напряженно-деформированном состоянии изгибаемого элемента на всех этапах загрузки, позволяя в том числе оценить предельные величины нагрузок. Сходимость значений расчетных и опытных предельных нагрузок является удовлетворительной, их соотношение составляет 0,85.

Отметим, что жесткая композитная арматура вносит существенный вклад в повышение несущей способности балки, а гибкая стальная арматура оказывает значительное влияние на повышение пластичности разрушения.

Численное моделирование, выполненное в рамках данной работы, подтвердило применимость выбранного подхода для прогнозирования напряженно-деформированного состояния балок с жесткой композитной арматурой. Результаты расчета прогибов, предельных нагрузок и напряжений в арматуре, полученные с использованием конечно-элементной модели, близки к экспериментальным данным. Улучшение сходимостей опытных и расчетных значений возможно при наличии большего количества исходных величин, описывающих физико-механические характеристики материалов.

Таким образом, в целом предложенная модель может быть использована для дальнейших исследований поведения под нагрузкой конструкций с жесткой композитной арматурой. Численная модель дает возможность подобрать оптимальные параметры конструирования изгибаемых

элементов с армированием из ППП, использующих прочностные свойства композитного профиля в полной мере. Модель основана на законах деформации бетона и арматуры различных типов, которые имеют опытные подтверждения. Использование средств визуализации программного комплекса для анализа результатов расчётов обеспечивает наглядность распределения усилий, деформаций и напряжений в элементах.

Заключение

Наблюдаемый рост интереса к пултрузионным профилям и их использованию для армирования бетонных элементов потребует в скором времени соответствующего объема исследований в области механических свойств таких профилей и их совместной работы с бетоном. Необходимо проведение численных и экспериментальных исследований для ППП с разным типом волокон. Это будет отвечать задачам оптимального проектирования бетонных конструкций с ППП, повышать экономическую эффективность таких решений.

Новые возможности прогнозирования прочности и деформативности перспективных материалов и конструкций в программных комплексах, интегрированных с ВМ-моделями, дадут современные и востребованные технические решения. Это отвечает принятым в нашей стране стратегическим подходам к цифровой трансформации в строительстве, отмеченным в том числе на соответствующих сессиях Российской академии архитектуры и строительных наук.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батрак В. Е. Применение композитных материалов для промышленных сооружений // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 2(25). С. 5-11. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-2(25)-5-11. EDN: JMETGT.
2. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций / В. И. Римшин, А. К. Соловьев, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4(23). С. 101-107. DOI: 10.51608/26867818_2023_4_101. EDN: QMDTVU.
3. Римшин, В. И., Анпилов С. М., Усанов С. В. Применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1(24). С. 42-52. DOI 10.51608/26867818_2024_1_42. EDN: DEIRZB.

4. Тарасов И. В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития // Стратегии бизнеса. 2018. № 6(50). С. 43-49. DOI: 10.17747/2311-7184-2018-5-43-49. EDN: UWAXCR.
5. Комплексный подход к контролю качества высокопрочного бетона в период эксплуатации / В. И. Римшин, П. С. Трунтов, Е. С. Кецко, А. С. Нагуманова // Строительные материалы. 2020. № 6. С. 4-7. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-4-7. EDN: WUQXKF.
6. Результаты расчета усиления строительных конструкций здания методом конечных элементов / В. И. Римшин, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов [и др.] // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4(10). С. 67-78. EDN: PRUWHF.
7. Автоматизация жизненного цикла зданий при реконструкции и капитальном ремонте / В. И. Римшин, И. Л. Шубин, В. Т. Ерофеев, А. А. Аветисян // Жилищное строительство. 2022. № 7. С. 6-12. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-6-12. EDN: LIMAVP.
8. Усиление конструкций здания текстильной промышленности внешним армированием из композитных материалов / В. И. Римшин, В. Л. Курбатов, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 242-249. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_242. EDN: ABPOAY.
9. Кришан, А. Л., Римшин В. И., Астафьева М. А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. Москва: АСВ, 2020. 322 с. ISBN: 978-5-4323-0352-3. EDN: ROLLKN.
10. Научные основы искусственного интеллекта в строительстве / В. И. Римшин, И. С. Кузина, А. А. Никитин, А. Е. Молчанова // Русский инженер. 2023. № 4(81). С. 41-45. EDN: FEYVPY.
11. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций / В. И. Римшин, А. К. Соловьев, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4(23). С. 101-107. DOI: 10.51608/26867818_2023_4_101. EDN: QMDTVU.
12. Римшин В. И., Кецко Е. С., Трунтов П. С. Большой строительный словарь. Москва: АСВ, 2022. Том 1. 572 с. EDN: AERTFJ.
13. Римшин В. И., Амелин П. А., Сулейманова Л. А. Нейросетевое прогнозирование несущей способности железобетонных элементов на различных стадиях жизненного цикла // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 42-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-42-55. EDN: NQAETI.
14. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks / R. Perera, M. Barchin, A. Arteaga, A. De Diego // Composites Part B: Engineering. 2010. Vol. 41, no 4. Pp. 287-298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.03.003.
15. Peng F., Xue W., Xue W. Database Evaluation of Shear Strength of Slender Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Members // ACI Structural Journal. 2020. Vol. 117, no 3. Pp. 273-282. DOI: 10.14359/51723504.
16. Estep D. D. Bending and Shear Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams with Closed and Open Sections. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 2014. 545. DOI: 10.33915/etd.545.
17. Lagaros N. D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no 2. P. 1131. DOI: 10.3390/app13021131.
18. Hadi M. N. S., Yuan J. S. Experimental investigation of composite beams reinforced with GFRP I-beam and steel bars // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 144. P. 462-474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.217.
19. Ibrahim T. H., Allawi A. A., El-Zohairy A. Impact Behavior of Composite Reinforced Concrete Beams with Pultruded I-GFRP Beam // Materials. 2022. Vol. 15, no 2. p. 441. DOI: 10.3390/ma15020441.
20. Mahmood E. M., Allawi A. A., El-Zohairy A. Flexural Performance of Encased Pultruded GFRP I-Beam with High Strength Concrete under Static Loading // Materials. 2022. Vol. 15, no 13. Pp. 4519. DOI: 10.3390/ma15134519.
21. Model of Stress-Strain State of Three-Layered Reinforced Concrete Structure by the Finite Element Methods / V. D. Tho, E. A. Korol, V. I. Rimshin, P. T. Anh // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18, no. 2. Pp. 62-73. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-62-73. EDN: SLZMQX.
22. Compressed Reinforced Concrete Elements Bearing Capacity of Various Flexibility / A. L. Krishan, M. A. Astafeva, V. I. Rimshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. Pp. 283-291. DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26. EDN: JPNURD.
23. Eryshev V. A., Karpenko N. I., Rimshin V. I. The Parameters Ratio in the Strength of Bent Elements Calculations by the Deformation Model and the Ultimate Limit State Method // IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. Vol. 753. P. 022076. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022076. EDN: WQBSNL.

24. Deformation Models of Concrete Strength Calculation in the Edition of Russian and Foreign Norms / N. I. Karpenko, V. I. Rimshin, V. A. Eryshev, L. I. Shubin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. Vol. 753. P. 052043. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052043. EDN: TYMKCF.

25. Rimshin V. I., Suleymanova L. A., Amelin P. A. Strength of Normal Sections of Flexural Reinforced Concrete Elements Damaged by Corrosion and Strengthened with External Composite Reinforcement // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2024. Vol. 20, no. 4. Pp. 331-341. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-4-331-341. EDN: TZOMCJ.

26. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Digital robotic systems for non-destructive reinforced concrete structures testing // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 533. P. 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302045. EDN: SRSXHS.

27. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Promising directions for the artificial intelligence development in the housing and utilities sector // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 535. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453505001. EDN: OFARFI.

Статья поступила в редакцию 29.01.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2025;
принята к публикации 10.03.2025

Информация об авторах

РИМШИН Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), член-корреспондент РААСН, г. Москва. Область научных интересов – теоретические основы силового сопротивления строительных конструкций зданий и сооружений, подверженных деградационным повреждениям. Расчет и конструирование энергоэффективных конструкций в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве. Автор более 784 научных публикаций, в том числе 112 работ в системах WOS и SCOPUS, 58 учебников и учебных пособий с грифом Минобрнауки, 36 патентов РФ и авторских свидетельств. E-mail: v.rimshin@niisf.ru

УСАНОВ Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета, г. Краснодар. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, проектирование и непосредственное выполнение работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 50 научных публикаций. E-mail: svusanov@gmail.com

ВОРОБЬЕВ Александр Евгеньевич – студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета Сибстрин, г. Новосибирск. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, проектирование и непосредственное выполнение работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. E-mail: a.vorobyev@sibstrin.ru

САВЕЛЬЕВ Егор Сергеевич – студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета Сибстрин, г. Новосибирск. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, проектирование и непосредственное выполнение работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. E-mail: e.savelyev@sibstrin.ru

Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 69.07

<https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.4.63>

EDN: AVNOST

Numerical simulation of the stress-strain state of beams with rigid composite reinforcement**V. I. Rimshin^{1,2✉}, S. V. Usanov^{2,3}, A. E. Vorobev⁴, E. S. Savelev⁴**¹National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)²Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Moscow)³Kuban State Technological University (Krasnodar)⁴Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering Sibstrin (Novosibirsk)
v.rimshin@niisf.ru✉**Abstract**

Introduction. One of the key stages of the BIM-model development is the assessment of loads and impacts. The framework for executing such calculations is integrated into specialised software applications. The finite element method, a prevalent numerical technique for addressing diverse scientific and engineering challenges, is arguably the most often used method for structural calculations globally, having acquired prominence due to its advantages. This method encompasses the ability to calculate structures with complex geometry by approximating surfaces to the necessary precision, the ability to take into account materials with different properties in the structure and so on. The primary downside of this method is the necessity of doing numerous calculations. The contemporary computational capabilities of IT equipment enable rapid calculations, yet the complexity and demands of these calculations are also increasing.

One of the promising materials gaining increasing interest in the building industry is the pultruded polymer profile. Structures reinforced with such profiles have only recently come to use in construction; hence, experimental data are available in restricted amount. In instances involving structures reinforced with composite polymer reinforcement, the application of pultruded polymer profiles in external calculation methodologies draws a parallel to rigid steel reinforcement, with modifications made to account for the features of these profiles. Regulatory papers for domestic constructions using rigid composite reinforcement have yet to be developed.

The aim of research is to develop a finite element model for assessing the bearing capacity of bending elements reinforced with rigid composite polymers and to evaluate the resulting data.

Materials and Methods. This study details the numerical implementation of the model using the SIMULIA Abaqus software package, which has several advantages. The application enables the simulation of both static and dynamic loading, provides detailed visualisation of results, and includes specialised tools for getting solutions that account for nonlinear factors such as plasticity, creep, and variations in rigidity. The problem is solved by a spatial formulation that considers the nonlinear characteristics of concrete and reinforcement.

Research outcomes. The numerical model can be used for further studies into the performance of structures with stiff composite reinforcement subjected to load. The proposed model enables the selection of ideal parameters for designing bending elements with pultruded polymer profile reinforcement, hence maximising the strength attributes of the composite profile. The model is based on the principle of deformation of concrete and reinforcement of various types, substantiated by experimental evidence.

Conclusions. New opportunities for predicting the strength and deformability of promising materials and structures in software packages integrated with BIM-models can provide modern and popular technical solutions. This corresponds to the strategic approaches to digital transformation in construction adopted in our country.

Keywords: numerical modeling; stress-strain state; beam; rigid composite polymer reinforcement; bearing capacity; bendable elements.

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Rimshin V. I., Usanov S. V., Vorobev A. E., Savelev E. S. Numerical simulation of the stress-strain state of beams with rigid composite reinforcement. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2025;(1):63–73. (In Russian). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.63>; EDN: AVNOST

REFERENCES

1. Batrak V. E. Application of composite materials for industrial structures. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2020;(2):5-11. DOI: 10.37538 / 2224-9494-2020-2 (25) -5-11. EDN: JMETGT. (In Russ.).
2. Rimshin V. I., Soloviev A. K., Suleymanova L. A., Amelin P. A. Neural network prediction of physical-mechanical characteristics of composite materials used for strengthening building structures. *Expert: theory and practice*. 2023;(4):101-107. DOI: 10.51608 / 26867818_2023_4_101. EDN: QMDTVU. (In Russ.).
3. Rimshin V. I., Anpilov S. M., Usanov S. V. Application of cognitive technologies for forecasting the strength of thin-walled I-beams. *Expert: theory and practice*. 2024;(1):42-52. DOI: 10.51608/26867818_2024_1_42. EDN: DEIRZB. (In Russ.).
4. Tarasov I. V. Industry 4.0: concept & development. *Business strategies*. 2018;(6):43-49. DOI: 10.17747/2311-7184-2018-5-43-49. EDN: UWAXCR. (In Russ.).
5. Rimshin V. I., Truntov P. S., Ketsko E. S., Nagumanova A. S. Comprehensive approach to quality control of high-strength concrete during operation. *Construction materials*. 2020;(6):4-7. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-4-7. EDN: WUQXKF. (In Russ.).
6. Rimshin V. I., Ketsko E. S., Truntov P. S. et al. Results of calculation of building constructions strengthening using finite element method. *Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences*. 2020;(4):67-78. EDN: PRUWHF. (In Russ.).
7. Rimshin V. I., Shubin I. L., Erofeev V. T., Avetisyan A. A. Automation of the life cycle of buildings during reconstruction and major repairs. *Housing construction*. 2022;7:6-12. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-6-12. EDN: LIMAVP. (In Russ.).
8. Rimshin V. I., Kurbatov V. L., Ketsko E. S., Truntov P. S. Extile industry building strengthening with external reinforcement with composite materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2021;(6):242-249. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_242. EDN: ABPOAY. (In Russ.).
9. Krishan, A. L., Rimshin, V. I., Astafieva, M. A. Compressed concrete pipe elements. Theory and practice. Moscow: ASV Publishing House, 2020. 322 p. ISBN: 978-5-4323-0352-3. EDN: ROLLKN. (In Russ.).
10. Rimshin V. I., Kuzina I. S., Nikitin A. A., Molchanova A. E. Scientific foundations of artificial intelligence in construction. *Russian engineer*. 2023;(4):41-45. EDN: FEYPVY. (In Russ.).
11. Rimshin V. I., Soloviev A. K., Suleymanova L. A., Amelin P. A. Neural network prediction of physical-mechanical characteristics of composite materials used for strengthening building structures. *Expert: theory and practice*. 2023;(4):101-107. DOI: 10.51608/26867818_2023_4_101. EDN: QMDTVU. (In Russ.).
12. Rimshin V. I., Ketsko E. S., Truntov P. S. Big construction dictionary. Moscow: Publishing house ASV, 2022. Vol. 1. 572 p. EDN: AERTFJ. (In Russ.).
13. Rimshin V. I., Amelin P. A., Suleymanova L. A. Neural network forecasting of the bearing capacity of damaged reinforced concrete elements at various stages of the life cycle. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2024;(11):42-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-42-55. EDN: NQAETI. (In Russ.).
14. Perera R., Barchín M., Arteaga A., De Diego A. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(4):287-298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.03.003.
15. Peng F., Xue W., Xue W. Database Evaluation of Shear Strength of Slender Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*. 2020;117(3):273-282. DOI: 10.14359/51723504.
16. Estep D. D. Bending and Shear Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams with Closed and Open Sections. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*. 2014;545. DOI: 10.33915/etd.545.
17. Lagaros N. D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering. *Applied Sciences*. 2023;13(2):1131. DOI: 10.3390/app13021131.
18. Hadi M. N. S., Yuan J. S. Experimental investigation of composite beams reinforced with GFRP I-beam and steel bars. *Construction and Building Materials*. 2017;144:462-474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.217.
19. Ibrahim T. H., Allawi A. A., El-Zohairy A. Impact Behavior of Composite Reinforced Concrete Beams with Pultruded I-GFRP Beam. *Materials*. 2022;15(2):441. DOI: 10.3390/ma15020441.
20. Mahmood E. M., Allawi A. A., El-Zohairy A. Flexural Performance of Encased Pultruded GFRP I-Beam with High Strength Concrete under Static Loading. *Materials*. 2022;15(13):4519. DOI: 10.3390/ma15134519.
21. Tho V. D., Korol E. A., Rimshin V. I., Anh P. T. Model of Stress-Strain State of Three-Layered Reinforced Concrete Structure by the Finite Element Methods. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(2):62-73. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-62-73. EDN: SLZMQX.

22. Krishan A. L., Astafeva M. A., Rimshin V. I. et al. Compressed Reinforced Concrete Elements Bearing Capacity of Various Flexibility. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;182:283-291. DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26. EDN: JPNURD.
23. Eryshev V. A., Karpenko N. I., Rimshin V. I. The Parameters Ratio in the Strength of Bent Elements Calculations by the Deformation Model and the Ultimate Limit State Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*. 2020;753:022076. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022076. EDN: WQBSNL.
24. Karpenko N. I., Rimshin V. I., Eryshev V. A., Shubin L. I. Deformation Models of Concrete Strength Calculation in the Edition of Russian and Foreign Norms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*. 2020;753:052043. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052043. EDN: TYMKCF.
25. Rimshin V. I., Suleymanova L. A., Amelin P. A. Strength of Normal Sections of Flexural Reinforced Concrete Elements Damaged by Corrosion and Strengthened with External Composite Reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(4):331-341. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-4-331-341. EDN: TZOMCJ.
26. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Digital robotic systems for non-destructive reinforced concrete structures testing. *E3S Web of Conferences*. 2024;533:02045. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302045. EDN: SRSXHS.
27. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Promising directions for the artificial intelligence development in the housing and utilities sector. *E3S Web of Conferences*. 2024;535:05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453505001. EDN: OFARFI.

The manuscript was submitted on 29.01.2025; reviewed on 12.02.2025;
adopted for publication on 10.03.2025

Information about the authors

RIMSHIN Vladimir Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Housing and Communal Complex of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN), Corresponding Member of the RAASN, Moscow. Research interests – theoretical foundations of force resistance in building constructions subject to degradation damage. Calculation and design of energy-efficient structures in housing and communal services and construction. Author of more than 784 publications, including 112 works indexed in WoS and SCOPUS, 58 student manuals approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 36 patents for inventions of the Russian Federation. E-mail: v.rimshin@niisf.ru

USANOV Sergei Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures of the Kuban State Technological University, Krasnodar. Research interests – technical inspection of buildings and structures, design and direct execution of works on reconstruction and repair of buildings and structures, and technical operation of buildings. Author of more than 50 publications. E-mail: svusanov@gmail.com

VOROBEEV Aleksandr Evgenievich – student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering Sibstrin (Novosibirsk). Research interests – technical inspection of buildings and structures, design and direct execution of works on reconstruction and repair of buildings and structures, and technical operation of buildings. E-mail: a.vorobyev@sibstrin.ru

SAVELEV Egor Sergeevich – student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering Sibstrin (Novosibirsk). Research interests – technical inspection of buildings and structures, design and direct execution of works on reconstruction and repair of buildings and structures, and technical operation of buildings. E-mail: e.savelyev@sibstrin.ru

Contribution of the authors. The authors contributed equally to this paper.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed and approved the final version of the manuscript.