

Особенности моделирования составных железобетонных конструкций с учетом пониженного модуля сдвига

В.В. Кузнецов¹, А.В. Марченко², А.Н. Зиятдинова²

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)*

²*Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация: В статье рассматриваются особенности моделирования составных железобетонных балок из различных (В25 и В65) классов бетона по прочности. В процессе моделирования применялась основные положения теории составных стержней. Сечение железобетонной балки разделялось пограничными слоями с пониженным коэффициентом сдвига. Оценивались напряжения и характер распределения деформаций по высоте сечения балки до и после введения различного количество пограничных слоев. При проведении расширенного анализа рассматривались варианты введения вертикально расположенных пограничных слоев по длине балки. По полученным результатам позволили оценить специфику работы изгибаемых конструкций с различным количеством пограничных слоев.

Ключевые слова: контактная зона, характеристика контакта, модуль сдвига, расчет с учетом сдвига, составная конструкция, железобетонная балка из высокопрочного бетона.

Введение

Композитные конструкции и конструкции, выполненные объединением нескольких материалов с различными характеристиками, имеют большую область использования в строительной практике. Одним из существующих подходов к расчету сложных конструктивных решений с повышенными прочностными характеристиками является рассмотрение элемента как многослойного. Поперечное сечение элемента условно или из-за различной деформативности разделяют на слои, между которыми выделяют зоны контакта с иными расчетными физико-механическими характеристиками. Для расчета составных стержней и пластин часто применяются положения, описанные в работе А.Р. Ржаницына [1].

С повышением уровня детализации расчета железобетонных элементов требуется не только анализировать существующие теоретические [2-4] и практические подходы к испытаниям конструкций на прочность и деформативность [4,5], и жесткость с учетом податливости [6,7],

трансформировать существующие диаграммы деформирования материалов используемые в расчетах [8, 9] с учетом особенностей диаграмм деформирования высокопрочных бетонов [10], но и учитывать характер нагружения конструкций [11,12] но и подвергать анализу и оценке результаты численных расчетов [12,13] в различных программных комплексах.

Рассмотрим задачу численного моделирования железобетонных конструкций с учетом пониженного модуля сдвига.

В ходе решения этой задачи выполним серию численных расчетов с применением диаграмм деформирования материалов и комбинацией различных теоретических подходов к рассмотрению сечения элемента как многослойного с наличием контактных слоев.

Для проведения анализа был выбран железобетонный образец с геометрическими характеристиками сечения 150x50x1200 мм с одиночным армированием d10 в нижней зоне, защитным слоем 15 мм.

Железобетонный образец при численном анализе испытывается по однопролетной схеме, четырехточечным изгибом. Расстояние от опоры до сосредоточенной силы рассматривалось 150 и 300 мм. За рассматриваемый материал был принят бетон классом В25 и В65 с характеристиками по СП 63.13330. Характеристики железобетонного образца приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики железобетонных образцов

Марка бетона	Размеры сечения, мм			Пролет, мм	As	Расстояние от опоры до сосредоточенной силы, мм
	b	h	a			
В25	50	150	15	1200	d10	150
В25	50	150	15	1200	d10	300
В65	50	150	15	1200	d10	150
В65	50	150	15	1200	d10	300

При проведении численного расчета с использованием предпосылок теории составных стержней сечение по высоте разбивалось на слои. Которые имели нелинейные деформационные характеристики и пограничные слои, которые обладали одинаковыми между собой линейными характеристиками (пониженный модуль упругости и модуль сдвига). Количество слоев составляло 2 или 3 слоя по высоте сечения. Для численного анализа принимались пониженные характеристики пограничных слоев с коэффициентом 0.1 от начального модуля сдвига (G) и модуля упругости (E). Для сравнения были рассчитаны модели без выделения горизонтальных и вертикальных пограничных слоев.

При проведении расширенного анализа с применением в численном моделировании методики выделения пограничных слоев с пониженными характеристиками материалов (с коэффициентом 0.1) были выполнены модели с пограничными слоями расположенными вертикально или горизонтально, разбивающими балку на блоки.

1. Результаты численного исследования с разбивкой по высоте горизонтальными пограничными слоями.

Для данного этапа анализа были выполнены модели с различными характеристиками материалов (для бетона В25 и В65). Нагрузка прикладывалась через АЖТ на расстоянии 150 и 300 мм от опоры. Величина нагрузки составляла 2.8 и 1.35 тс соответственно. Анализировались перемещения и усилия, возникающие в арматурном стержне. В процессе анализа были составлены диаграммы распределения растягивающих и сжимающих деформаций по высоте балки в нормальном сечении, расположенном в непосредственной близости от приложенной нагрузки в пролете конструкции.

Общий вид моделей с разбивкой на 2 и 3 слоя показан на рис. 1.

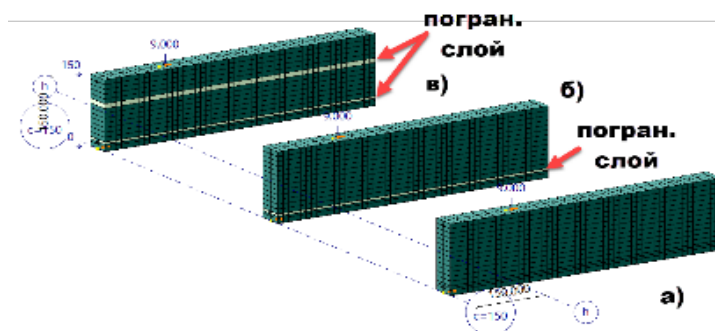


Рис. 1. – Общий вид моделей с разбивкой на 2 и 3 слоя

(а) без погран., слоев, (б) с одним погран., слоем, (в) с двумя погран., слоем.

Характер распределения напряжений с различным количеством горизонтальных пограничных слоев показан на рис. 2.

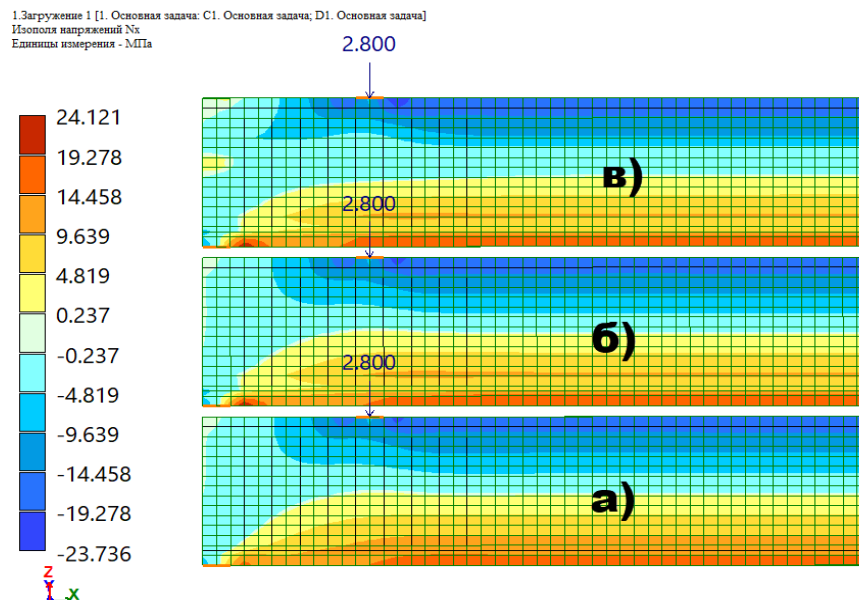


Рис. 2. – Характер распределения напряжений по высоте балки

(а) без пограничных слоев, (б) с одним горизонтальным погран. слоем, (в) с двумя горизонтальными погран. слоем.

На приведенных распределениях напряжений заметно, что введение пограничного слоя вблизи арматуры расположенной в нижней части балки существенного перераспределения напряжений не происходит. Вместе с тем, при введении пограничного слоя в середине балки вносит вклад в перераспределение напряжений по сжатой зоне балки.

Для анализа распределения сжимающих и растягивающих деформаций по высоте сечения были получены диаграммы относительных деформаций, (для удобства визуализации относительные деформации представлены с увеличением в тысячу раз).

Характер распределения сжимающих и растягивающих деформаций по высоте сечению показан на рис. 3.

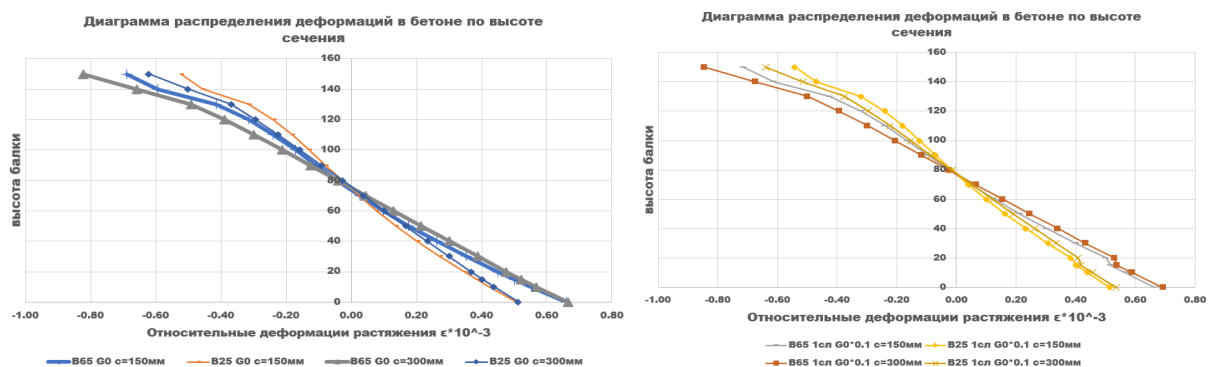


Рис. 3. –Распределения сжимающих и растягивающих деформаций по высоте сечения балки без пограничных (слева) и с одним горизонтальными пограничным слоем (справа)

На приведенных диаграммах заметно, что введение пограничного слоя вблизи арматуры хоть и не существенно, но влияет на общий почти линейный характер распределения деформаций по сечению. Появляющаяся в сжатой зоне нелинейность в характере распределения деформаций по высоте сечения может является влиянием расположенной вблизи сечения сосредоточенной силы.

2. Результаты численного исследования с разбивкой пограничными слоями по пролету балки

Для данного этапа анализа были выполнены модели с различными характеристиками материалов (для бетона В25 и В65). Нагрузка прикладывалась через АЖТ на расстоянии 150 и 300 мм от опоры. Величина нагрузки составляла 2.8 и 1.35 тс соответственно. Анализировались перемещения, возникающие усилия в арматурном стержне в процессе

анализа были составлены диаграммы распределения растягивающих и сжимающих деформаций по высоте балки в нормальном сечении расположенном в непосредственной от приложенной нагрузки в пролете конструкции.

Общий вид моделей с вертикальной разбивкой пограничными слоями показан на рис. 4.

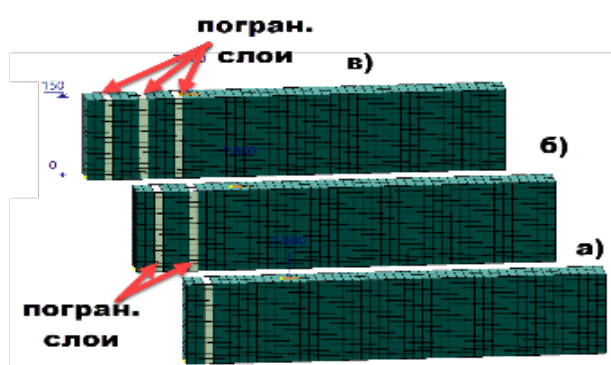


Рис. 4. – Общий вид моделей с вертикальной разбивкой пограничными слоями (а) с одним вертикальным погран.слоем, (б) с двумя, (в) с тремя вертикальными погран. слоем.

Характер распределения главных напряжений с вертикальными пограничными слоями при различном количестве пограничных слоев показан на рис. 5.

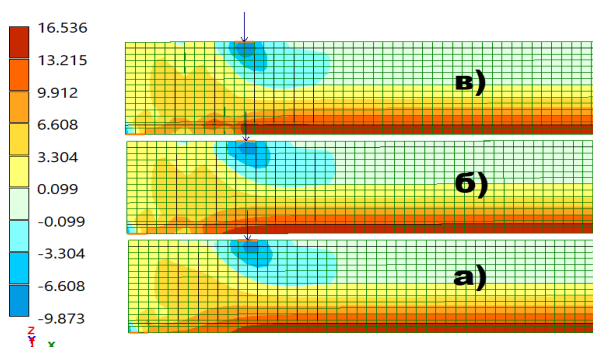


Рис. 5. – Характер распределения главных напряжений (а) с одним вертикальным погран.слоем, (б) с двумя, (в) с тремя вертикальными погран. слоем.

На приведенных распределениях главных напряжений заметно, что появление вертикального пограничного слоя существенно влияет на характер распределения главных напряжений по сечению конструкции.

Воспользуемся аналогичным подходом для анализа распределений положительных и отрицательных относительных деформаций по нормальному сечению, расположенному в непосредственной близости от оси приложения сосредоточенной силы.

Характер распределения положительных и отрицательных относительных деформаций по нормальному сечению показан на рис. 6.

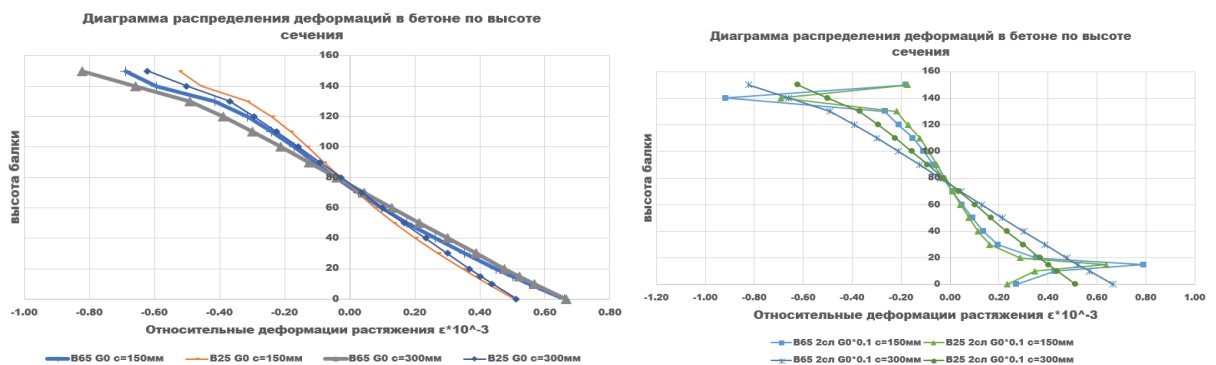


Рис. 6. – распределения положительных и отрицательных относительных деформаций в нормальном сечении балки без вертикальных пограничных (слева) и с двумя вертикальными пограничными слоями (справа)

На приведенных диаграммах заметно, что введение вертикальных пограничных слоев влияет на общий характер распределения деформаций по сечению. Из почти линейного характера распределения деформаций характер превращается в скачкообразный и резко меняющий направление. Появляющиеся в сжатой зоне скачки могут являться влиянием расположенной вблизи сечения сосредоточенной силы, а резкое изменение величины деформаций в нижней части сечения может говорить о увеличении вклада в несущую способность сечения стальной арматуры.

Заключение

При численном анализе работы изгибаемых железобетонных балок из различного класса бетонов (В25 и В65) были достигнуты следующие результаты:

- 1) Определены и визуализированы диаграммы распределения относительных деформаций по сечению балок при работе на изгиб;
- 2) Зафиксирован частично линейный с плавным отклонением от линейной зависимости характер распределения отрицательных и положительных относительных деформаций по высоте сечения при введении горизонтальных пограничных слоев с пониженным модулем сдвига;
- 3) Определен скачкообразный характер распределения отрицательных и положительных относительных деформаций с резким изменением в зоне расположения арматуры при введении вертикальных пограничных слоев с пониженным модулем сдвига;
- 4) Подтверждено предположение о сильном влиянии на деформативность конструкции наличие пограничных слоев с пониженным модулем сдвига (использовались одинаковые характеристики для всех пограничных слоев);
- 5) Определено незначительное по величине перераспределение напряжений при введении горизонтального пограничного слоя вблизи арматурного стержня, которое не меняет существенным образом распределение главных напряжений в сечениях конструкции.

Литература

1. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М., Стройиздат, 1986г. -316с.
2. Peresyupkin E.N., Pochinok V.P., Shevtsov V.S., Shevtsov S.V. Impact of Concrete Type on Crack Resistance of Reinforced Concrete Constructions.

European researcher / International Multidisciplinary Journal, 2012, N 5-2 (21), pp. 622-625.

3. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. О диаграммной методике расчета деформаций стержневых элементов и ее частных случаях // Бетон и железобетон. 2012. № 6. С. 20–27.

4. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность.- М.: Стройиздат, 1997.- 576 с.

5. Бондаренко В.М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения. Строительство и реконструкция. 2009. №4. С. 28-33.

6. Колчунов В.И., Марьенков Н.Г., Омельченко Е.В., Тугай Т.В., Бухтиярова А.С. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. С. 12–15.

7. Фардиев Р.Ф., Ашрапов А.Х. Применение теории составных стержней к определению характера распределения напряжений в поперечном сечении усиленного внецентренно сжатого элемента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (34). С. 363–369.

8. Маилян Д.Р., Кургин К.В. О необходимости трансформации базовой аналитической зависимости " σ - ϵ " бетона - Инженерный вестник Дона. 2011. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/712.

9. Резван И.В., Маилян Д.Р., Резван А.В. Построение диаграммы "напряжения-деформации" бетона в условиях пассивного бокового обжатия // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127.

10. Мкртчян А.М., Маилян Д.Р. Особенности расчёта железобетонных колонн из высокопрочного бетона по деформированной схеме. – Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2186.

11. Daneshvar, K., Moradi M. J., Ahmadi K., Mahdavi G., and HaririArdebili M.A. 2021. “Dynamic Behavior of Corroded RC Slabs with Macro-Level Stochastic Finite Element Simulations.” *Engineering structures* 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112056.

12. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K. and Hajiloo H. 2021. “Strengthening of Corroded Reinforced Concrete Slabs under Multi-Impact Loading: Experimental Results and Numerical Analysis.” *Construction and building materials* 284. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.

13. Кочерженко В.В., Сапожников П.В., Кузнецов В.В. Планирование эксперимента испытания выштамповки на сдвиг в перпендикулярном направлении // Инженерный вестник Дона, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8796.

References

1. Rzhanicyn A.R. *Sostavnye sterzhni i plastinki [Composite rods and plates]*. М., Strojizdat, 1986g. 316 p.

2. Peresyarkin E.N., Pochinok V.P., Shevtsov V.S., Shevtsov S.V. *European researcher / International Multidisciplinary Journal*, 2012, N 5-2 (21), pp. 622-625.

3. Karpenko N.I., Karpenko S.N. *Beton i zhelezobeton*. 2012. №6, pp. 20–27.

4. Holmjanskij M.M. *Beton i zhelezobeton: Deformativnost' i prochnost'*. [Concrete and reinforced concrete: the Deformability and strength]. М.: Strojizdat, 1997. 576 p.

5. Bondarenko V.M. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2009. №4. pp. 28-33.



6. Kolchunov V.I., Marienkov N.G., Omelchenko E.V., Tugai T.V., Bukhtiyarova A.S. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2014. № 2. pp. 12-15.
7. Fardiev R.F., Ashrapov A.H. Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2015. № 4. pp. 363-369.
8. Mailyan D.R., Kurgin K.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/712.
9. Rezvan I.V., Mailjan D.R., Rezvan A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127.
10. Mkrtchyan A.M., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2186.
11. Daneshvar, K., Moradi M. J., Ahmadi K., Mahdavi G., and HaririArdebili M.A. 2021. Engineering structures 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112056.
12. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K. and Hajiloo H. 2021. Construction and building materials 284. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.
13. Kocherzhenko V.V., Sapozhnikov P.V., Kuznetsov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8796.

Дата поступления: 29.12.2024

Дата публикации: 25.02.2025