

УДК 624.012.45

Царук О.Г.

Научный руководитель: кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций, Шалобыта Н.Н.

К АНАЛИЗУ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Железобетон, как и любой другой неоднородный материал, является достаточно сложным для расчёта и конструирования. Это связано с особенностями совместной работы бетона и арматуры при приложении нагрузки, а также при образовании и развитии трещин в бетоне.

С появлением современных программных комплексов конечно-элементного моделирования интенсивно развиваются нелинейные расчёты ж/б конструкций с использованием нелинейных деформаций материалов. При этом имеется возможность варьировать различные факторы, влияющие на перераспределение усилий, и на стадии проектирования создавать такие условия, учитывающие пластические свойства материала, при которых перераспределение усилий будет происходить в заданном направлении. Это позволит получить существенный технико-экономический эффект, который еще далеко не полностью реализуется при проектировании [4]

Основная часть

На данный момент существует определенный перечень программных комплексов, позволяющих производить научный анализ напряженно-деформированного состояния конструкции. Для инженерного анализа применяют комплексы Sofistik, SAP2000, STARK и другие. Для научного анализа применяют комплексы более высокого уровня MSC.Nastran, ANSYS, ABAQUS.

В качестве базового комплекса для численного анализа железобетонного элемента, армированного стальной и стеклопластиковой арматурой, был выбран программный комплекс ANSYS, поскольку имеет возможность моделировать железобетонные конструкции с учетом образования трещин в растянутой зоне бетона, а также раздробления его в сжатой зоне, что являлось принципиальным требованием при постановке целей исследования.

Программный комплекс ANSYS решает методом конечных элементов стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные задачи из таких областей физики, как механика твердого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика. Возможно решение связанных задач. Для решения задач деформирования конструкций МКЭ применяется в варианте метода перемещений [1]. Расчёты могут производиться в пакетном (*Batch*) или интерактивном (*Interactive*) режимах. При применении двух этих режимов реально воспользоваться всеми возможностями комплекса.

Методика численного моделирования

Для описания тела железобетонной балки использовался объемный конечный элемент SOLID 65. Опорные пластины моделировались с использованием объемного конечного элемента SOLID 185. Для моделирования контактной области между опорными пластинами и телом балки использовалась пара конечных элементов TARGE 170 и CONTA 174. Для моделирования стержневых элементов армирования использовался конечный элемент LINK 180.

Размер конечных элементов принимался в соответствии с расположением элементов армирования по сечению. Вдоль пролета балки размер конечного

элемента для бетона и арматуры был принят равным 25 мм. Контакт между бетоном и арматурой обеспечивался совмещением узлов КЭ-сетки арматуры и бетона.

Для исключения влияния приложения приложения сосредоточенной силы и возникающих вследствие этого локальных всплесков напряжений, нагрузка прикладывалась через распределительные пластины, установленные в том числе и на опорах. Контакт между пластинами и телом балки задавался таким образом, чтобы обеспечивалась полная совместность перемещений общих узлов сетки

На рисунках 1 и 2 представлено разбиение на конечные элементы и общий вид геометрической модели исследуемой балки.

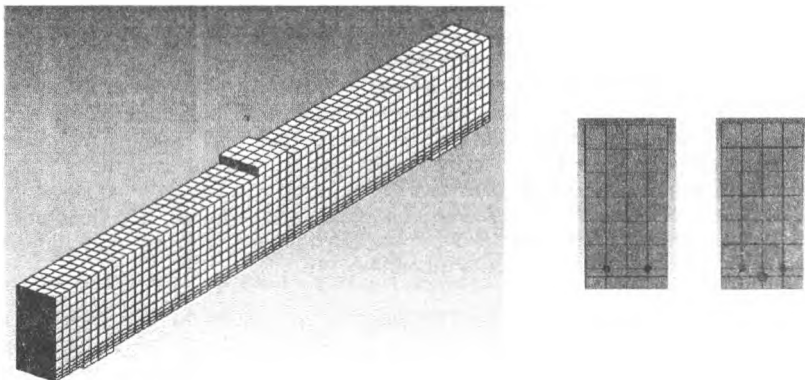


Рисунок 1 – Разбиение на конечные элементы

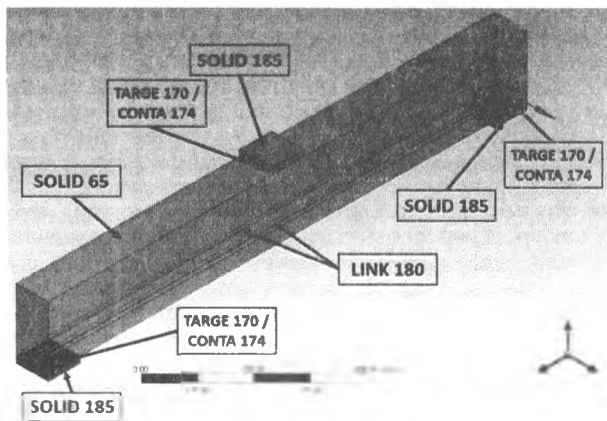


Рисунок 2 – Общий вид геометрической модели

Элемент SOLID 65 используется для трехмерного (3D) моделирования объемных тел, имеющих или не имеющих арматуру [1]. Элемент определяется восемью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в 228

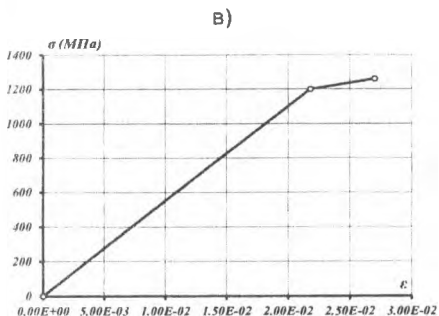
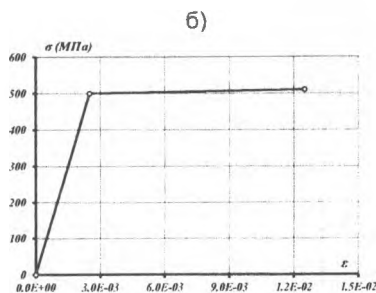
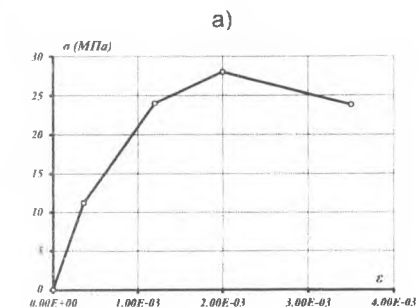
направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. В элементе можно указать до трех настроек армирования. Элемент обладает специальными возможностями образования трещин и дробления. Самой важной особенностью элемента является использование нелинейных свойств материала.

Для учета физической нелинейности учитывалась полная диаграмма деформирования для бетона, билинейная диаграмма деформирования для стальной арматуры, полная диаграмма деформирования для стеклопластиковой арматуры.

Принятые прочностные и деформационные характеристики для материалов представлены в таблице 1, диаграммы деформирования для всех материалов представлены на рисунке 3.

Таблица 1 – прочностные и деформационные характеристики материалов

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	2	3
Бетон С20/25	31000	0.2
	Средняя прочность при сжатии $f_{cm} = 28$ МПа Средняя прочность при растяжении $f_{ctm} = 2.2$ МПа	
Стальная арматура S500	200000	0.3
Стеклопластиковая арматура АСП $\varnothing 8, \varnothing 10, \varnothing 12$.	55000	0.2



а) – бетон, б) – стальная арматура,
в) – стеклопластиковая арматура
Рисунок 3 – Принятые диаграммы деформирования материалов

Результаты численного моделирования

Первым этапом анализа было сопоставление величины предельной нагрузки по результатам ручного расчета и численного моделирования в случае использования в качестве армирования стальной арматуры.

В таблице 2 представлены полученные значения.

Таблица 2 – Результаты теоретического и численного расчета

Площадь армирования $A_{st}, \text{см}^2$	Разрушающая нагрузка, кН		Отклонение $\Delta, \%$
	теоретический расчет	численный расчет	
1	2	3	4
$2\emptyset 6 (A_s = 0.566 \text{см}^2)$	15.95	19.4	22
$2\emptyset 8 (A_s = 1.006 \text{см}^2)$	27.33	34	24
$2\emptyset 10 (A_s = 1.57 \text{см}^2)$	40.67	52.2	28
$2\emptyset 12 (A_s = 2.26 \text{см}^2)$	55.28	67.6	22
$2\emptyset 14 (A_s = 3.08 \text{см}^2)$	70.07	72.4	3
$2\emptyset 16 (A_s = 4.02 \text{см}^2)$	78.83*	82	4
$2\emptyset 18 (A_s = 5.09 \text{см}^2)$	78.83*	80.6	2

* - разрушение по сжатой зоне бетона

Вторым этапом анализа была оценка эффекта от использования стеклопластиковой арматуры совместно со стальной. Для этого в КЭ-модель был добавлен стержень стеклопластиковой арматуры разных диаметров ($\emptyset 8, \emptyset 10, \emptyset 12$) в дополнение к стальной ($2\emptyset 8, 2\emptyset 10, 2\emptyset 12$).

Графическая интерпретация полученных данных представлена на рисунке 4

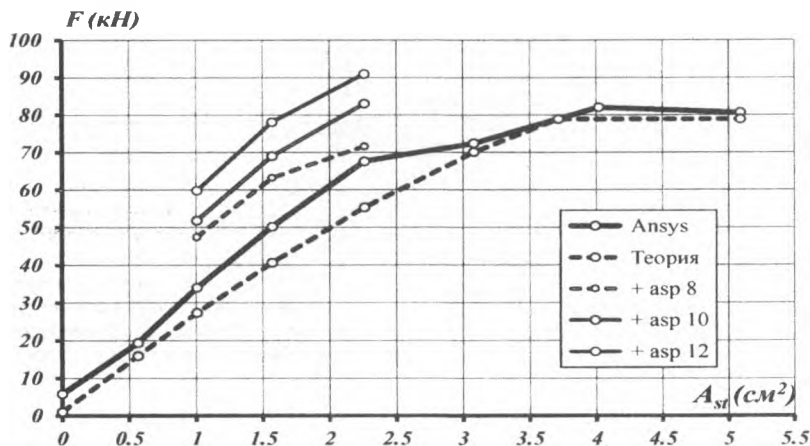


Рисунок 4 – Зависимость предельной нагрузки от площади армирования

Анализ полученных данных в случае армирования стальной арматурой показал превышение значений разрушающей нагрузки по результатам численного моделирования в сравнении с соответствующими результатами теоретического расчета на величину порядка 25%.

На рисунке 5 представлен характер деформирования балки с указанием растягивающих относительных деформаций в предельном состоянии.



Рисунок 5 – Растягивающие относительные деформации

На рисунке 6 представлен характер образования трещин в балке со стальной арматурой на разных стадиях нагружения.

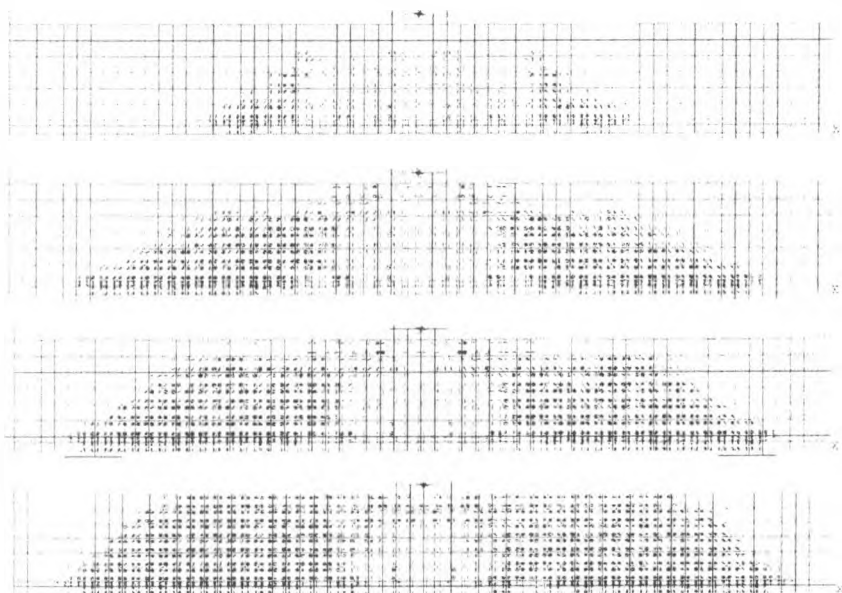


Рисунок 6 – Развитие трещин в балке со стальной арматурой

При применении стеклопластиковой арматуры в дополнение к стальной рассматривался процесс перераспределения напряжений в бетоне и арматуре после образования трещин в бетоне и достижения предела текучести в стальной арматуре. В качестве примера рассмотрено сечение с армированием $A_s 2\varnothing 10 + A_{\varphi} \varnothing 10$.

При нагружении балки наблюдалось три основные стадии работы конструкции (см. рисунок 8). На первых этапах нагружения наблюдалась линейная работа сечения балки до момента образования первых трещин в растянутой зоне бетона. Далее при достижении нагрузки 14 кН наблюдалось образование первых трещин, что привело к включению в работу армирования в большей степени при снижении жесткости бетонного сечения. С дальнейшим ростом нагрузки наблюдался рост деформаций в бетоне и арматуре. В армировании данный этап был линейным. Следующим ключевым моментом было наступление предела текучести в стальной арматуре при нагрузке 53 кН. С этого момента происходит нарастание напряжений в стеклопластиковой арматуре при неизменных напряжениях в стальной арматуре, т.е. большую часть нагрузки начинает воспринимать стеклопластиковая арматура. В дальнейшем происходит разрушение образца балочной конструкции из-за превышения предельных деформаций в бетоне и значительных напряжений и деформаций в стальной арматуре.

На рисунке 7 представлен характер образования трещин в балке со стальной и стеклопластиковой арматурой на разных стадиях нагружения

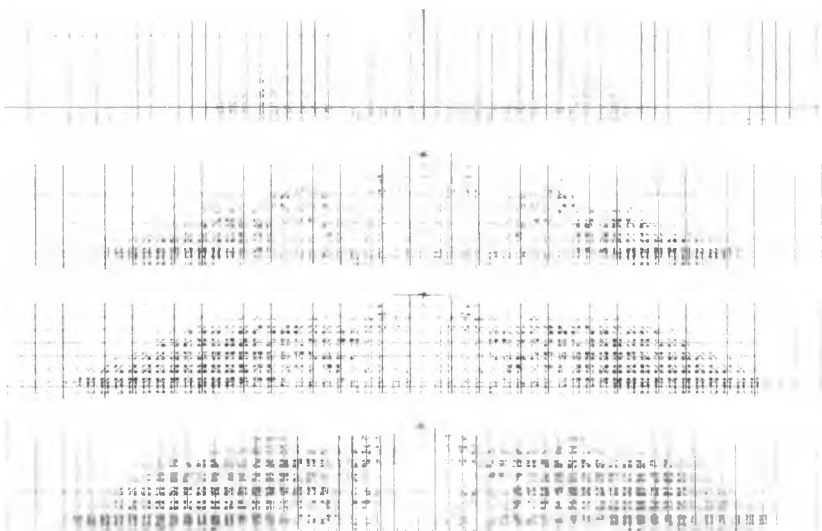
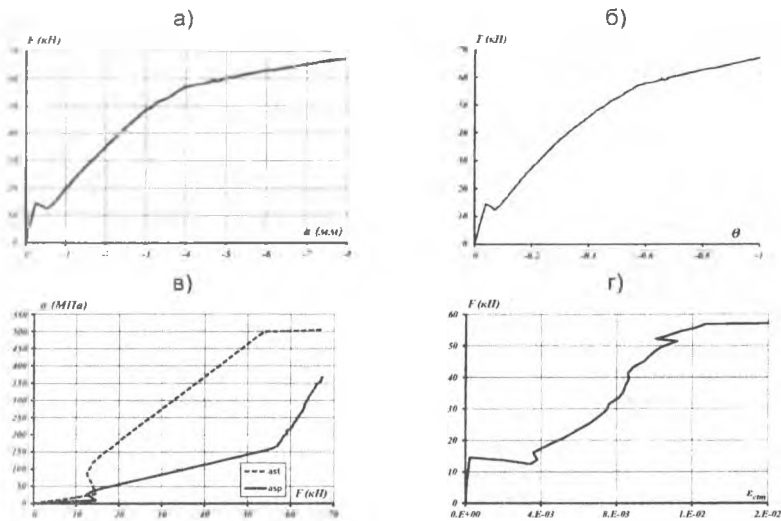


Рисунок 7 – Развитие трещин в балке со стальной и стеклопластиковой арматурой

На рисунке 8 представлены графики зависимости прогиба, угла поворота балки, а также относительных деформаций растяжения от прикладываемой нагрузки. Также представлен график, на котором виден процесс перераспределения напряжений на стеклопластиковую арматуру при достижении в стальной арматуре предела текучести.



а) – прогиб балки от величины прикладываемой нагрузки,
 б) – угла поворота балки от величины прикладываемой нагрузки,
 в) – напряжений в арматуре от величины прикладываемой нагрузки,
 г) – относительных деформаций растяжения
 от величины прикладываемой нагрузки
Рисунок 8 – Графики зависимости

Заключение

Использование КЭ-модели позволяет проводить полный анализ работы конструкции на любом этапе нагружения и с любыми параметрами сечения и армирования при наименьших финансовых и временных затратах, однако необходимость в экспериментальных испытаниях новых конструкций или конструктивных решений остается, поскольку для адекватной КЭ-модели необходима верификация.

Список цитированных источников

1. Басов, А.К. ANSYS. Справочник пользователя / А.К. Басов. – М.: ДМК, 2005. – 639с.
2. Пецольд, Т.М.; Тур, В.В. «Железобетонные конструкции. Основы теории расчета и конструирования». Издательство БГТУ, 2003.
3. Тихий, М., Ракосник, Й. «Расчет железобетонных рамных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий.» перевод с чешского Б.М. Сергеевко 1976г.
4. Шалобыта, Н.Н. Границы перераспределения усилий в железобетонных конструкциях / Н.Н. Шалобыта, М.Ч. Полонский, Т.П. Шалобыта, А.В. Масилевич // Вестник Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 1(85): Строительство и архитектура. – с. 33–36.
5. CEB-FIP Model Code 1990- Chapter 1-3, Final Draft. CEB Bull.d' Inf., 1991, No. 203.
6. DIN 1045-1:2001-07. Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 1: Design and construction – 148p
7. EN 1990 : 2001. Eurocode – Basis of Structural Design. – Brussels – 2011-67p.
8. EN 1992-1:2001 (Final Draft, April, 2002) Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General Rules and Rules for Building – Brussels – 2002, October - 230p.