

УДК 539.4.015.2

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, Г. М. КУЗЁМКИНА, О. И. ЯКУБОВИЧ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ АРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Разработана конечноэлементная модель взаимодействия цилиндрической металлической арматуры с матрицей композита, особенностью которой является представление арматуры в виде трехмерного деформируемого твердого тела. Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния упрочняющей арматуры и матрицы композита в зависимости от коэффициента трения между соприкасающимися фазами. Приведены результаты исследования влияния положения упрочняющей арматуры на жесткость и прочность несущей строительной конструкции.

В последнее время появился большой интерес к адаптивным материалам и конструкциям, которые способны адаптироваться ко внешнему воздействию, включая способность к самодиагностике, залечиванию дефектов, самоупрочнению и т.д. Уже в настоящее время в строительстве используются некоторые варианты применения таких материалов и конструкций. Для их создания необходимо выполнение исследований влияния свойств различных конструктивных элементов на параметры ее надежности и долговечности. К числу таких задач относится задача об анализе взаимодействия арматуры с матрицей композита, в которой рассматриваются свойства взаимодействия материалов контактирующих фаз.

Постановка арматуры в матрицу композита дает возможность увеличения прочности и жесткости машиностроительных и строительных конструкций. Качества композитного материала в значительной степени зависят от свойств поверхностей сцепления его контактирующих фаз [1, 2]. Среди программных комплексов, реализующих расчеты таких конструкций методом конечных элементов наиболее известны ANSYS, NASTRAN, MARC [3–5].

Была поставлена задача об установлении влияния коэффициента трения между арматурой и матрицей композита на деформации конструкции и напряжения в различных ее элементах. Расчет выполнялся с применением метода конечных элементов. Особенностью разработанной модели являлось представление арматуры в виде трехмерного деформируемого твердого тела, причем использовались двадцатиузловые призматические конечные элементы.

Авторы многочисленных исследований [6–9] моделируют арматуру тонкими стержнями, воспринимающими только продольные нагрузки. Это, во-первых, не позволяет достоверно оценить напряжения в областях взаимодей-

ствия арматуры и матрицы композита, т. к. не учитывает неравномерность распределения напряжений по сечению арматуры, во-вторых, не дает возможность учесть, как влияет трение между контактирующими фазами композита на его напряженно-деформированное состояние.

Для анализа особенностей взаимодействия металлической арматуры и матрицы композита нами предложена модель, в которой арматурные стержни моделируются трехмерными конечными элементами. В качестве объекта исследования использована консольная балка с длиной 1 м и прямоугольным поперечным сечением 20×30 см, армирование которой обеспечивалось пятью стальными стержнями диаметром 2 см [10, 11]. Принималось: модули упругости материала матрицы и арматурной стали 27 и 200 ГПа соответственно. Нагружение балки осуществлялось силами тяжести ее элементов и равномерно распределенным давлением 170 кПа, приложенным к верхней грани.

Для уменьшения объема вычислений при создании конечноэлементной модели учитывалась симметрия рассчитываемой конструкции, поэтому разработанная модель представляла собой половину реальной балки, рассеченной продольной вертикальной плоскостью. На рисунке 1 приведена схема разбиения балки на объемы с одинаковыми физическими свойствами.

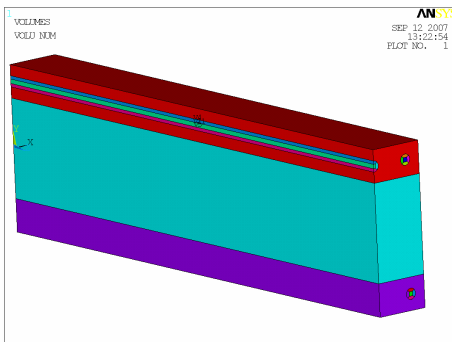


Рисунок 1 – Схема разбиения балки на объемы

Необходимость дополнительного разбиения арматурных стержней обусловлена необходимостью получения качественной сетки конечных элементов, показанной на рисунке 2.

При конечно-элементном моделировании контактного взаимодействия между арматурой и бетонной матрицей размер элемента по длине арматуры принят равным 20 мм, что позволяло с достаточной степенью точности определить положение площадок внутреннего скольжения. Полученная конечно-элементная сетка изображена на рисунке 3.

Расчеты выполнены исходя из того, что между материалами композита имеется сухое трение, определяемое законом Кулона. Значения коэффициен-

тов трения принимались в диапазоне от 0 до 1, который соответствует разным физическим свойствам поверхностей контактирующих фаз композита. Учет адгезии между материалами может приводить к значениям коэффициента трения, превышающим 1.

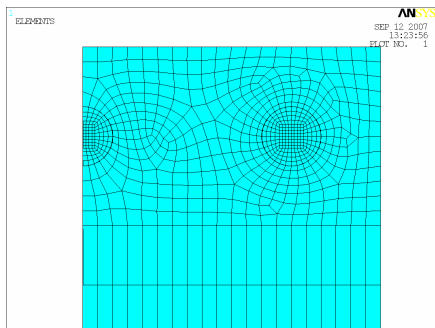


Рисунок 2 – Сетка конечных элементов (общее число элементов 78800)

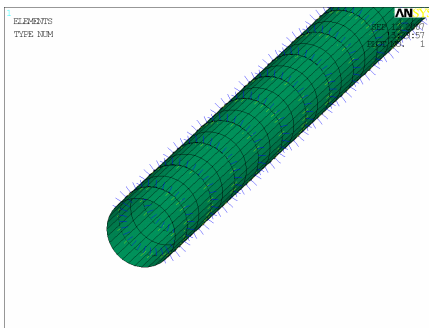


Рисунок 3 – Контактные конечные элементы (всего 4000 элементов)

Анализ состояния контакта между соприкасающимися поверхностями показал, что проскальзывание отсутствует только на небольших участках соприкосновения между арматурой и матрицей композита. Эти участки расположены в верхних частях арматурных стержней на расстояниях, не превышающих пяти диаметров арматуры от места защемления. Различие в модулях упругости материалов композита приводит к тому, что между арматурой и матрицей образуется зазор. Его зависимость от коэффициента трения между деталями балки приведена на рисунке 4. Выполнен анализ изменения напряжений по длине арматурного стержня. При отсутствии трения максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются в заданном поперечном сечении. При увеличении коэффициента трения место с максимальными эквивалентными напряжениями смещается от защемленного конца балки.

Анализ значений максимальных эквивалентных по Мизесу напряжений в материале арматуры показал, что они монотонно возрастают по мере увеличения коэффициента трения. Аналогичная зависимость обнаружена и для первого главного напряжения.

Анализ влияния коэффициента трения на жесткость конструкции показал, что этот параметр постепенно увеличивается при увеличении сцепления между материалами композита. Причем градиент убывания деформации постепенно понижается при увеличении коэффициента трения. Значения деформаций при наличии трения между фазами композита могут быть снижены на 15 % и более. Постановка арматуры в матрицу с натягом может еще больше увеличить этот эффект.

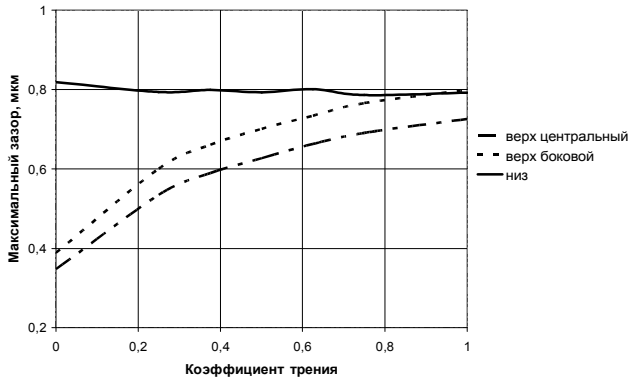


Рисунок 4 – Зависимость максимального зазора между арматурными стержнями и матрицей от коэффициента трения

Помимо расчета напряженно-деформированного состояния балки при малых коэффициентах трения между арматурой и бетоном выполнен анализ ее деформирования при коэффициентах трения, превышающих единицу. Результаты расчетов показали, что при малых значениях параметра  $f$  силы трения недостаточны для того, чтобы удержать арматуру от скольжения относительно матрицы (рисунок 5). При увеличении коэффициента трения прекращается относительное смещение верхних стержней, а нижние стержни смещаются внутри бетонной матрицы. При больших значениях коэффициента трения относительное смещение стержней прекращается.

Отметим, что при «средних» значениях коэффициента трения существенно ухудшается сходимость решения, и время расчета увеличивается на порядок. Например, при коэффициенте трения  $f = 0$  время расчета составило 3 часа, при  $f = 2$  – 147 часов, при  $f = 10$  – 3,5 часа.

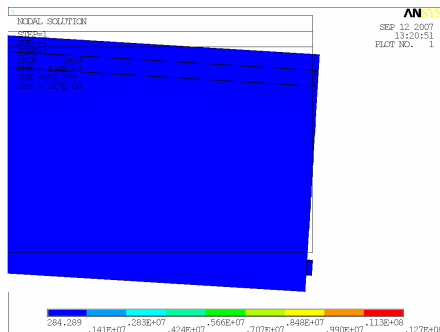


Рисунок 5 – Смещение арматуры в матрице композита при  $f = 0$  (время расчета 3 часа)

Выполнен ряд расчетов с целью установления влияния расположения арматурных стержней на напряженно-деформированное состояние балки. При этом изменялось расположение осей арматурных стержней внутри арматурной матрицы.

При изменении положения стержней по горизонтали деформации конструкции, а также напряжения в бетоне практически не изменяются. Напряжения в арматуре при смещении боковых арматурных стержней от продольной вертикальной плоскости симметрии балки к ее боковым стенкам незначительно увеличиваются (с 30,8 до 31,4 МПа). Таким образом, изменение положения арматурных стержней по горизонтали практически не оказывает влияние на прочность и жесткость балки.

В то же самое время смещение арматурных стержней по вертикали оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние балки. Увеличение расстояния от арматурных стержней до горизонтальной плоскости симметрии матрицы приводит к увеличению жесткости конструкции. Этот вывод очевиден и подтверждает результаты, получаемые с применением приближенных теорий деформирования армированных стержневых элементов конструкций.

Напряжения в арматурных стержнях увеличиваются при смещении арматурных стержней от середины балки к верхней и нижней граням (рисунок 6). В то же самое время максимальные и первое главное напряжение и эквивалентное напряжение в бетоне при таком смещении арматуры уменьшаются, как это представлено на рисунке 7. Теория деформирования, предполагающая сохранение плоской формы поперечными сечениями балки, дает противоположный результат.

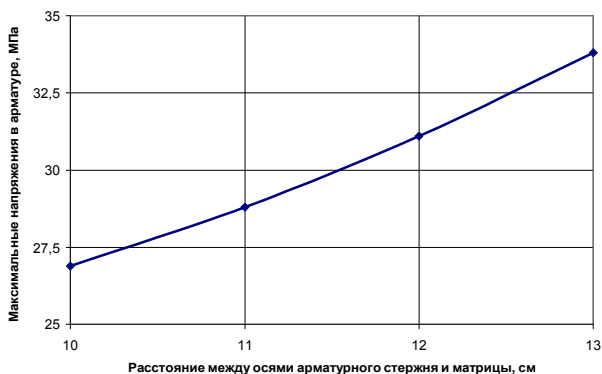


Рисунок 6 – Зависимость максимальных напряжений в арматуре от расстояния между осью арматурного стержня и осью матрицы

Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по обеспечению прочности железобетонных конструкций путем изменения расположения упрочняющей арматуры в бетонной матрице.

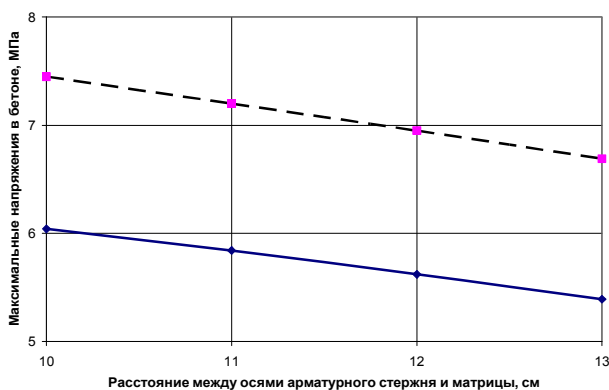


Рисунок 7 – Зависимость максимальных первых главных напряжений (пунктир) и эквивалентных по Мизесу (сплошная линия) напряжений в бетоне от расстояния между осью арматурного стержня и осью матрицы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Аиелло, М. А.** Моделирование поведения работающих на растяжение бетонных элементов конструкций, армированных стержнями из волокнистого композита / М. А. Аиелло, М. Леоне, Л. Омбрес // *Механика композитных материалов.* – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 431–444.
- 2 **Тепферс, Р.** Сцепление арматуры из волокнистого композита в бетоне – актуальная проблема / Р. Тепферс, Л. Де Лоренцис // *Механика композитных материалов.* – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 477–496.
- 3 **Басов, К.** ANSYS в примерах и задачах / К. Басов. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
- 4 **Шимкович, Д. Г.** Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д. Г. Шимкович. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
- 5 **Moaveni, S.** Finite element analysis. Theory and application with ANSYS / S. Moaveni. – New Jersey: Prentiss Hall Inc. – 1999. – 527 p.
- 6 **Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates Final Report** / United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. / Kachlakev D., Miller T., Yim S. etc. – 2001. – 34 p.
- 7 **Fanning, P.** Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams / P. Fanning // *Electronic Journal of Structural Engineering.* – 2001. – № 2. – P. 111–119.
- 8 **Limkatanyu, S.** Reinforced concrete frame element with bond interfaces. Part 1: Displacement-Based, Force-Based and Mixed Formulations / S. Limkatanyu, E. Spacone // *Journal of Structural Engineering.* – 2002. – Vol. 128, № 3. – P. 346–355.

9 **Brožovský, J.** Modelování fyzikálně nelineárního chování železobetonových konstrukcí: Teze disertační práce: 36 – 06 – 9 / J. Brožovský. – Brno, 2001. – 44 s.

10 **Кузёмкина, Г. М.** Конечноеэлементное моделирование бетонной матрицы с упругопрочной арматурой / Г. М. Кузёмкина, А. О. Шимановский, Д. А. Черноус // 4-я междунар. науч. конф. «Полимерные композиты, покрытия, пленки. Полицом 2003».– Гомель : ИММС НАНБ, 2003.– С. 53–55.

11 **Кузёмкина Г. М.** Компьютерное моделирование взаимодействия бетонной матрицы с металлической арматурой // Машиностроение.– Вып. 20, Т. 2. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – С. 336–341.

Получено 24.12.2007