

УДК 539.3:691.3:004.94

О. И. ЯКУБОВИЧ

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АРМИРУЮЩИХ ГРАНУЛ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТА

Выполнено конечно-элементное моделирование деформирования композитного материала с кубическими и шаровидными армирующими гранулами. Получено распределение напряжений в материале и выполнен анализ влияния коэффициента трения и адгезии на его расслоение под действием сжимающей нагрузки.

**Ключевые слова:** конечно-элементное моделирование, композитный материал, напряженно-деформированное состояние, гранулы, адгезия.

В строительстве и машиностроении широко применяются композиты разной структуры. Композитные материалы, армированные гранулами, одни из наиболее часто употребляемых. К их числу относится, в частности, такой строительный материал, как бетон. Поэтому анализ напряженно-деформированного состояния композитов, армированных гранулами, и изделий из них является актуальной и важной задачей.

Сложность структуры композитных материалов и многообразие параметров, влияющих на их свойства, обусловили использование метода конечных элементов при моделировании поведения таких материалов под действием механических нагрузок [1]. Применение типичных структурных ячеек выделяется как один из подходов к моделированию материалов.

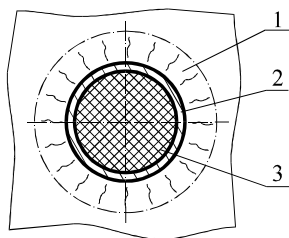


Рисунок 1 – Внутренняя структура композита:  
1 – матрица; 2 – граничный слой; 3 – наполнитель [3]

В статье [2] отмечается, что на поверхности зерен заполнителя бетона имеется многослойная система из продуктов гидратации цемента, составляющая контактный слой толщиной 0,5–3 мкм. Это позволяет рассматривать бетон в виде схемы, приведенной на рисунке 1. Аналогичная структура характерна и для полимерных композитов.

Авторами ряда публикаций [4–7] были исследованы структура и состав контактных зон между зернами заполнителей и цементным камнем, а также влияние различных факторов на силу сцепления заполнителей с цементным камнем. В качестве заполнителя могут использоваться элементы, имеющие разные геометрические и физические параметры. Однако их влияние на прочность материала изучено недостаточно.

В данной работе на основе результатов, представленных ранее в статьях [8–10], поставлена задача об анализе влияния формы гранул на напряженно-

деформированное состояние композитного материала и его прочность под действием приложенных нагрузок.

С целью выяснения, насколько форма заполнителя влияет на напряженно-деформированное состояние композитного материала, рассмотрены случаи, при которых армирование осуществлялось элементами шаровидной и кубической формы. Варианты, при которых гранулы представляют собой многогранник с числом граней больше шести, тогда можно рассматривать как промежуточные варианты между двумя исследуемыми.

Для моделирования использован метод выделения ячейки периодичности, включающей две гранулы, расположенные в матрице друг над другом. Учитывая симметрию системы, рассматривалась одна четвертая каждой гранулы с соответствующей частью матрицы. Такой подход справедлив в случаях, при которых размер ячейки намного меньше размеров конструктивного элемента. Для удобства сопоставления полученных результатов габаритные размеры ячеек приняты одинаковыми и составляли  $25 \times 25 \times 100$  мм.

Конечноэлементные модели были созданы с использованием программного комплекса ANSYS. Наполнитель и матрица композита были промоделированы шестигранными конечными элементами SOLID65, имеющими 8 узлов. Использовались следующие характеристики материалов модели: матрица – модуль Юнга  $E_m = 50$  ГПа, коэффициент Пуассона –  $\nu_m = 0,15$ ; заполнитель –  $E_g = 30$  ГПа,  $\nu_g = 0,27$ . Чтобы учесть возможное расслоение материала, принималось во внимание контактное взаимодействие между матрицей и гранулами. Предполагалось, что коэффициент трения между ними находится в пределах от 0 до 1, а адгезия может принимать любые значения. При создании контакта использовались элементы TARGE170 и CONTA174. Общее число конечных элементов каждой модели (рисунок 2) составило около 100 000.

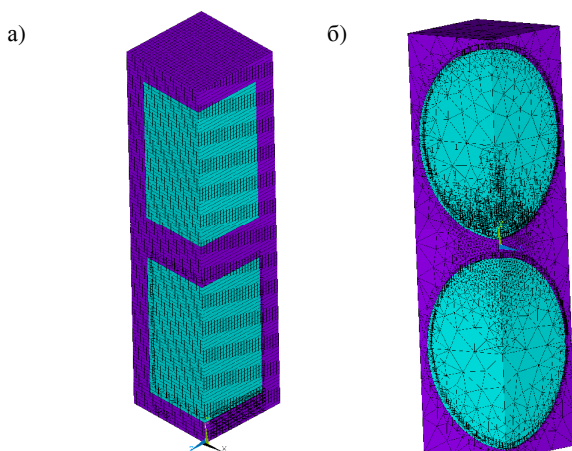


Рисунок 2 – Конечноэлементные модели материала с кубическими (а) и сферическими (б) зёрнами заполнителя

В качестве граничных условий использовалось условие симметрии боковой и нижней граней выбранной ячейки периодичности. К верхней грани ячейки прикладывалось равномерно распределенное давление 30 МПа.

Полученные результаты расчетов для кубических и сферических зерен заполнителя показали, что связанное с увеличением коэффициента трения и адгезии повышение жесткости системы не приводит к существенным изменениям значений абсолютных деформаций.

Из приведенной схемы распределения напряжений в матрице для кубического заполнителя (рисунок 3) видно, что наибольшие касательные напряжения возникают в областях расположения вершин и превышают напряжения в основном массиве матрицы в 3–5 раз. Максимальные по модулю главные напряжения в материале заполнителя (рисунок 4) превышают минимальные на 60 %, т. е. их распределение значительно более равномерное.

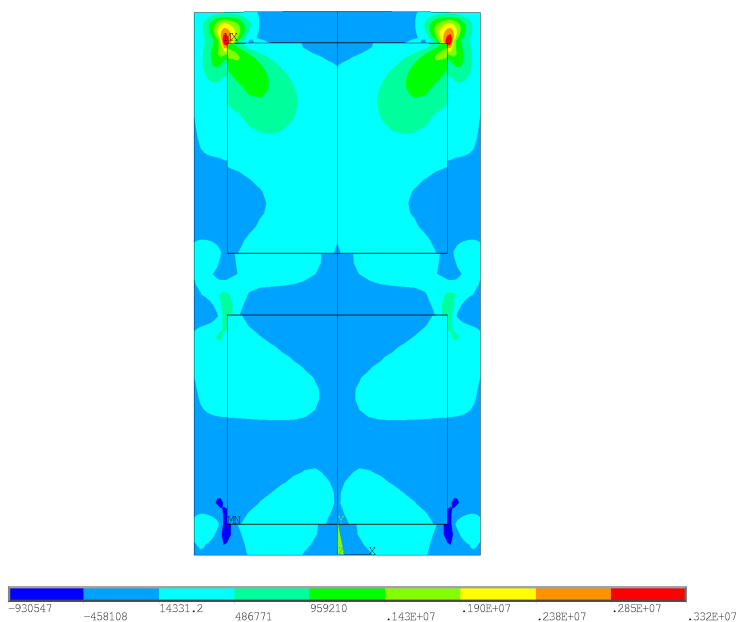


Рисунок 3 – Касательные напряжения в матрице для кубических зерен заполнителя

Особенность распределения напряжений в матрице с шаровидными зёрнами заполнителя связана с большими их значениями в областях, соответствующих расположению вертикальной оси симметрии гранул непосредственно между ними (рисунок 5). Наибольшие напряжения по вертикальной оси  $\sigma_y$  в гранулах также возникают в месте наибольшего сближения гранул по вертикали и достигают 40 МПа. Наименьшие напряжения  $\sigma_y$  имеют место в экваториальных плоскостях гранул, т. е. местах с наименьшим внедрением (рисунок 6).

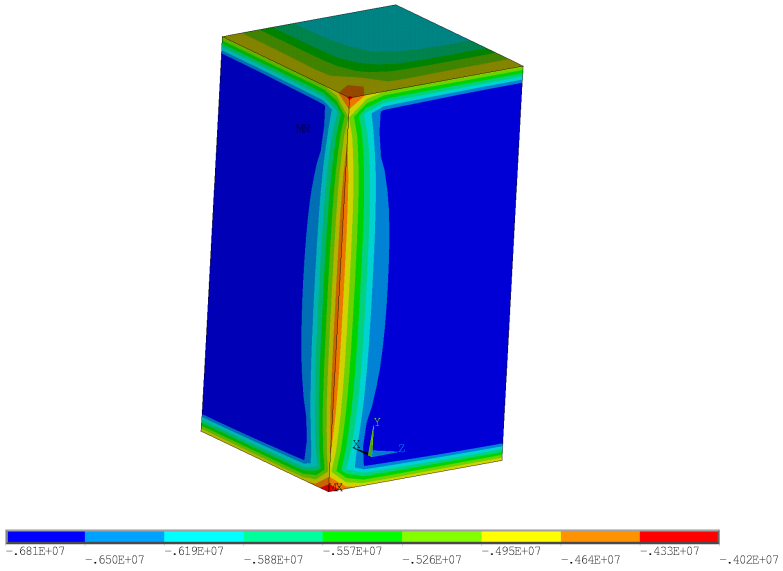


Рисунок 4 – Распределение напряжений  $\sigma_y$  в армирующих гранулах кубической формы

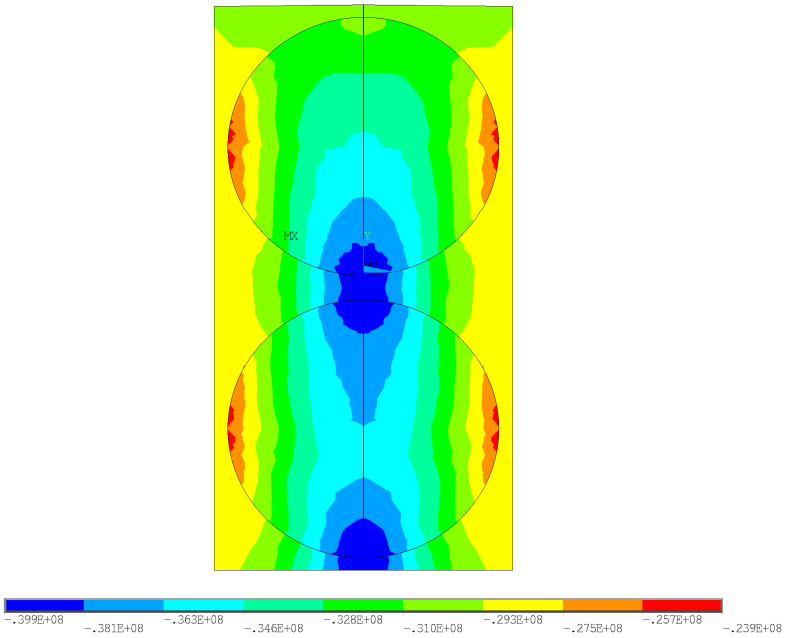


Рисунок 5 – Напряжения  $\sigma_y$  в матрице с шаровидными зёрнами

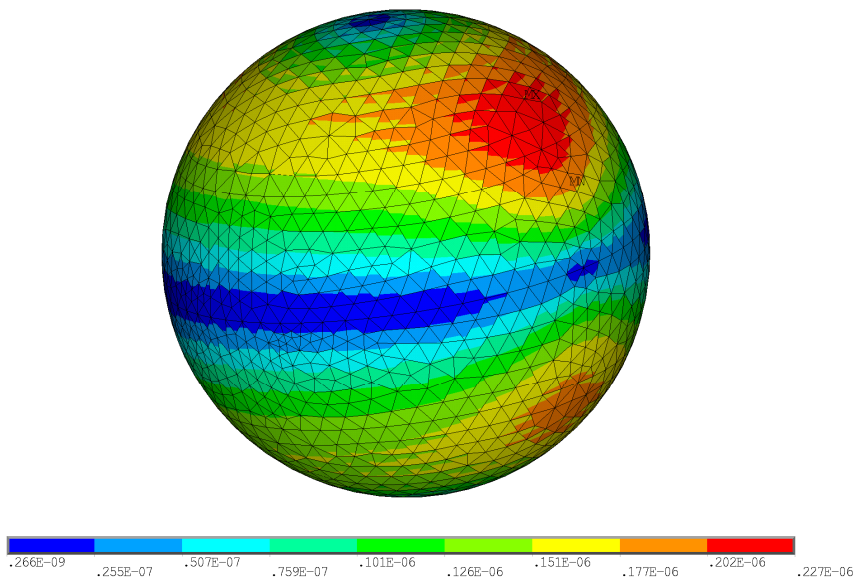


Рисунок 6 – Внедрение (м) в шаровидную армирующую гранулу

Вычисления, выполненные для разных значений коэффициента сцепления между материалами композита, показали, что структура распределения напряжений существенно не изменяется. Однако при малых значениях коэффициента трения и адгезии под нагрузкой возможно относительное смещение поверхностей зерен и матрицы. Наличие таких перемещений указывает на расслоение материала. На рисунках 7 и 8 приведены зависимости минимальной адгезии, при которой обеспечивается неподвижность контакта между матрицей и зернами, от коэффициента трения.

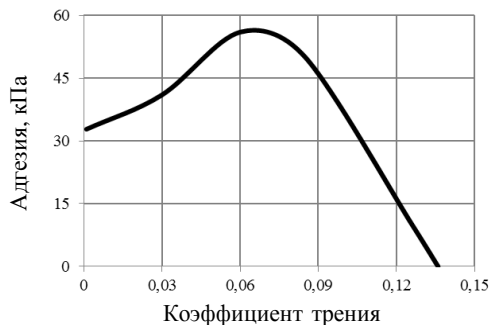


Рисунок 7 – Зависимость адгезии от коэффициента трения для кубических зерен

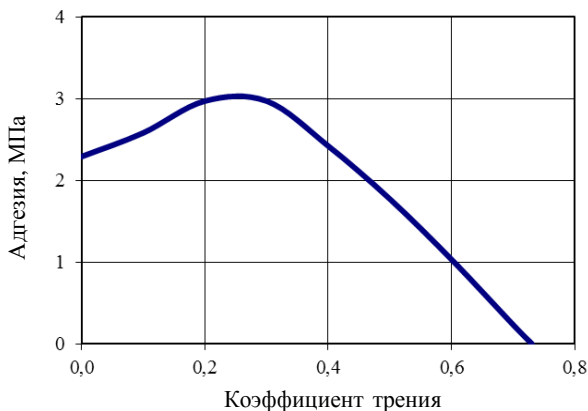


Рисунок 8 – Зависимость адгезии от коэффициента трения для элемента со сферическими зёрнами

Полученные результаты показывают, что прочная связь между кубическими зёрнами и матрицей обеспечивается существенно меньшими значениями адгезии и коэффициента трения по сравнению со случаем шаровидных гранул. В то же время в областях вершин кубических гранул возникают существенные касательные напряжения, которые могут привести к возникновению трещины в матрице. Распределение напряжений в матрице со сферическими зёрнами заполнителя более равномерное.

Таким образом, для создания сверхпрочного бетона целесообразно использование шарообразных зёрен, но при этом должны предъявляться повышенные требования к качеству связующего. Для конструкций, находящихся в более легких условиях эксплуатации, рационально применение зёрен заполнителя, имеющих форму многогранников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Плескачевский, Ю. М. Компьютерное моделирование структуры и свойств композитов в нагруженных конструкциях / Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2016. – № 1 (34). – С. 41–51.

2 Mishnaevsky, L. Continuum mesomechanical finite element modeling in materials development: A state-of-the-art review / L. Mishnaevsky, S. Schmauder // *Applied Mechanics Reviews*. – 2001. – Vol. 54, No. 1. – P. 49–67.

3 Bernard, O. Multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials / O. Bernard, F. J. Ulm, E. A. Lemarchand // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, No. 8. – P. 1293–1309.

4 Суханов, В. Г. Взаимодействие матричного материала с поверхностью заполнителей: роль в формировании макроструктуры бетона / В. Г. Суханов, А. С. Чернега // *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво)*. – Вип. 78: Кн. 2. – Київ, ДП НДІБК, 2013. – С. 516–522.

5 Finite element modeling of the cement matrix and filler grains interaction / A. Shimanovsky [et al] // *Technolog.* – 2013. – Vol. 5, No. 4. – P. 171–174.

6 Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials / D. P. Bents [and other] // *Journal of American Ceramic Society.* – 2001. – Vol. 84, No. 1. – P. 129–135.

7 Черноус, Д. А. Упругопластическое деформирование пористых материалов (двумерная модель) / Д. А. Черноус, Д. А. Конек // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2002. – Т. 7, № 1. – С. 21–24.

8 Kuziomkina, H. M. The special features of the deformation for the bearing building constructions with composite reinforcement / H. M. Kuziomkina, A. O. Shimanovsky, V. I. Yakubovich // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 48. – С. 346–351.

9 Многоуровневое компьютерное моделирование строительных композитов с учетом внутренних контактных взаимодействий / А. О. Шимановский [и др.] // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 13–18.

10 Якубович, О. И. Влияние размеров армирующих гранул на прочность композита / О. И. Якубович // *Актуальные вопросы машиноведения.* – 2016. – Вып. 5. – С. 329–332.

*V. I. YAKUBOVICH*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

#### **EFFECT OF GRANULE FORM ON STRESS-STRAIN STATE OF A REINFORCED COMPOSITE**

There was performed a finite element modeling of the deformation of a composite material with cubic and spherical reinforcing granules. The stresses distribution in the material was obtained, and it was analyzed the influence of the friction coefficient and adhesion on its exfoliation under the compressive load action.

Получено 11.11.2018