

УДК 691.3:004.94

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, А. Ю. ШУБЕРТ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВКЛЮЧЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТА

Выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния армированного волокнами композита под действием приложенного распределенного давления среде программного комплекса ANSYS. Показано, насколько увеличение диаметра волокон, модуля упругости и коэффициента Пуассона упрочняющего наполнителя увеличивает жесткость и уменьшает деформации неоднородного материала, а также позволяет снизить напряжения в нем.

Ключевые слова: композитный материал, компьютерное моделирование.

В настоящее время в различных технических объектах находят широкое применение различные композитные материалы. Они позволяют значительно уменьшить массу машин и сооружений при выполнении условий прочности и жесткости. Существующие аналитические методы решения задач механики композитных материалов [1, 2] дают, как правило, возможность оценки усредненных механических характеристик, однако не позволяют в полной мере установить распределение напряжений внутри материала.

Существующее инженерное программное обеспечение создало возможности для компьютерного моделирования деформирования композитов под действием приложенных эксплуатационных нагрузок [3–5]. При этом уровни описания поведения материала подразделяют на нано- (атомистический), микро- (дислокаций и единичных пустот и включений), мезо- (определяемый микроструктурой материала, т. е. комбинацией ряда включений, слоев) и макро- (конкретная деталь). В программном комплексе ANSYS существует возможность учета армирования материала путем его распределения по объему детали [6, 7]. Такой подход дает возможность достаточно точно оценить деформацию конкретных деталей, однако не позволяет установить особенности напряженно-деформированного состояния, связанные с неоднородностью материала.

При необходимости анализа особенностей взаимодействия упрочняющих элементов с матрицей композита необходимо использовать модели, рассматривающие представительный объем некоторой детали, которые основаны на реальных структурах материалов. На начальном этапе таких исследований элементарная двумерная ячейка встраивалась в некоторый эквивалентный материал [8, 9]. Одним из основных результатов таких расчетов было опре-

деление формы включений, которые обеспечивают максимальные и минимальные модули Юнга композитов. Позднее были разработаны пространственные компьютерные модели композитных материалов, содержащие элементарные ячейки материала, с помощью которых удалось провести некоторые расчеты, позволяющие оптимизировать сопротивление разрушению, прочность, текучесть, износостойкость и иные параметры [10–14].

В Белорусском государственном университете транспорта выполнен ряд расчетов напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из таких композитов с помощью программного комплекса ANSYS [15–18]. Рассматривалось деформирование материала с зернами заполнителя двух видов: кубическими и шаровидными, а также с арматурой в виде стержней. Выполненный в ходе исследований анализ показал, в частности, что наиболее неблагоприятный случай с точки зрения прочности рассматриваемого материала имеет место, если зерна заполнителя лежат вдоль линии действия внешней нагрузки.

Целью представленной работы стал анализ влияния размера включений, модуля упругости и коэффициента Пуассона на деформации композитного материала и напряжения, возникающие в составляющих его фазах материала. Для создания конечноэлементных моделей использован программный комплекс ANSYS.

Рассматривался плоский элемент структуры материала размерами $0,2 \times 0,2$ м, включающий матрицу, внутри которой располагался заполнитель. Такая модель описывает ситуацию, при которой армирующая фаза имеет цилиндрическую форму, а оси цилиндров располагаются в плоскостях, параллельных плоскости приложения нагрузки. Физические характеристики матрицы были приняты следующими: коэффициент Пуассона равен 0,3, модуль упругости – 26 ГПа. Для включений рассматривались случаи изменения диаметров от 0,01 до 0,09 м, модуль упругости варьировался от 15 до 26 ГПа, коэффициент Пуассона от 0,15 до 0,3. Такие характеристики возможны при матрице из бетона и композитной арматуре.

В результате проведенных расчетов получена информация о характере распределения напряжений, возникающих в неоднородном материале. На рисунке 1 показано распределение эквивалентных по Мизесу напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в мезофрагменте бетонного основания при действии давления $p = 1$ МПа.

По результатам расчетов построены графики, характеризующие влияние диаметра включения на распределение эквивалентных напряжений и деформации в выделенном элементе. Из рисунка 2, *а* следует, что напряжения в материале при изменении размера включения изменяются незначительно (менее чем на 2 %). В то же время при увеличении диаметра армирующего элемента с 0,01 до 0,09 м деформации уменьшаются почти на 20 % (рисунок 2, *б*). По нашему мнению, это связано главным образом с увеличением объема армирующей фазы.

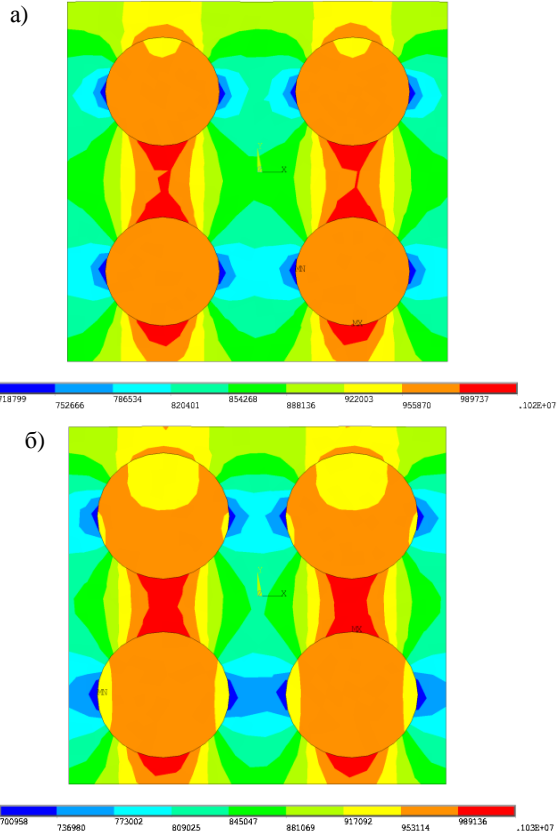


Рисунок 1 – Распределение эквивалентных напряжений, Па, в бетонной плите основания при диаметрах включений 0,06 м (а) и 0,07 м (б)

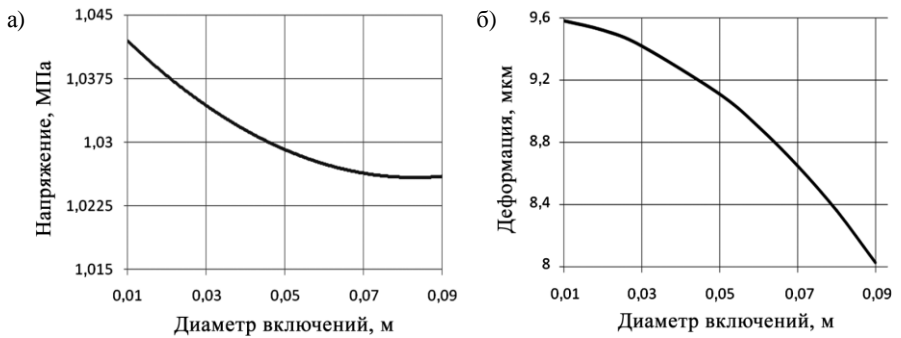


Рисунок 2 – Зависимость эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) от диаметра включений

Как правило, объем упрочняющей матрицы и включений при формировании бетонных оснований оказываются близкими. Поэтому для анализа влияния модуля упругости на напряженно-деформированное состояние материала рассматривалась ячейка материала с диаметром включений, равным 0,08 м.

По результатам расчетов были построены графики зависимости максимальных эквивалентных напряжений и деформаций в материале основания в зависимости от модуля упругости упрочняющей фазы. Результаты расчета показали, что при увеличении модуля упругости от 15 до 26 ГПа максимальные эквивалентные напряжения в материале уменьшаются на 16 % (рисунок 3, а), а деформации элемента – на 28 % (рисунок 3, б).

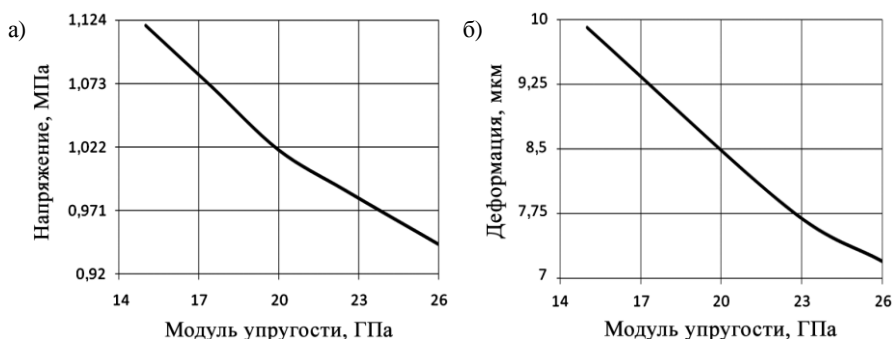


Рисунок 3 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) от модуля упругости материала упрочняющей фазы композита

Заметим, что при значениях модуля упругости, превышающих 21,3 ГПа эквивалентные напряжения по Мизесу оказались меньшими, чем приложенное давление. Такой результат объясняется относительно небольшими силами, действующими на боковые грани выделенного элемента структуры при его сжатии.

Снижение уровня напряжений в материале при увеличении модуля упругости упрочняющей фазы связано со снижением его неоднородности. Уменьшение деформаций обусловлено увеличением жесткости не только армирующей фазы, но и материала в целом. Однако даже при одинаковых модулях упругости армирующей фазы материала и матрицы, армирующие элементы продолжают выступать в качестве концентраторов напряжений. Поэтому дополнительно были выполнены расчеты с целью анализа влияния коэффициента Пуассона на напряжения и деформации в материале.

Выполненные расчеты показали, что при увеличении коэффициента Пуассона от 0,15 до 0,3 максимальные эквивалентные напряжения в материале уменьшаются на 8 % (рисунок 4, а). При этом максимальные смещения точек элемента уменьшаются на 4 % (рисунок 4, б).

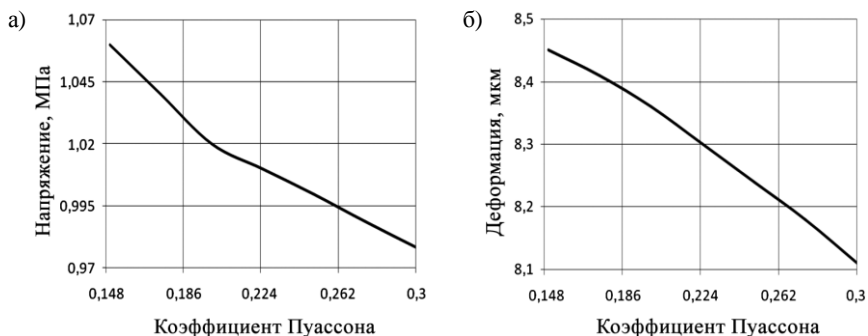


Рисунок 4 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) от коэффициента Пуассона материала армирующей фазы композита

Полученные результаты показывают, что обеспечить лучшие механические характеристики бетонных оснований транспортных сооружений и иных конструкций можно, используя армирующие материалы, коэффициент Пуассона которых незначительно отличается от коэффициента Пуассона матрицы.

Таким образом, проведенное моделирование позволило оценить, насколько размеры и физические параметры регулярно расположенных упрочняющих волокон влияют на прочность и жесткость армируемого материала. При случайном расположении таких волокон численные результаты могут оказаться несколько скорректированными, но установленная тенденция сохранится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Кристенсен, Р. М.** Введение в механику композитов / Р. М. Кристенсен. – М. : Мир, 1982. – 334 с.

2 **Starovoitov, E. I.** Foundations of the theory of elasticity, plasticity, and viscoelasticity / E. I. Starovoitov, F. B. Nagiyev. – Toronto, New Jersey : Apple Academic Press, 2012. – 346 p.

3 **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.

4 **Mishnaevsky, L. L.** Computational Mesomechanics of Composites: Numerical Analysis of the Effect of Microstructures of Composites of Strength and Damage Resistance / L. L. Mishnaevsky. – Chichester : Wiley, 2007. – 294 p.

5 **Басов, К. А.** ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. – М. : Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.

6 **Stolarski, T.** Engineering Analysis with ANSYS Software / T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2018. – 562 p.

7 **Ковтун, В. А.** Обзор современных прикладных программных комплексов для проведения исследований композитных изделий / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 1 (65). – С. 258–266.

8 **Dong, M.** Transverse mechanical behaviour of fiber reinforced composites – FE modelling with embedded cell models / M. Dong, S. Schmauder // *Computational Material Science*. – 1996. – Vol. 5, No. 1–3. – P. 53–66.

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

10 Multiscale Modeling of Highly Heterogeneous MMCs / T. Antretter [et al.] // *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1999. – Vol. 79, No. S1. – P. 127–130.

11 **Jin, L.** Meso numerical simulation of reinforced concrete members / L. Jin, X.-L. Du // *Shuili Xuebao*. – 2012. – Vol. 43. – No. 10. – P. 1230–1242.

12 Micromechanical model for polymeric nano-composites material based on SBFEM / Y. Khudari Bek [et al.] // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 194. – P. 516–526.

13 **Liang, X.** Meso-scale modelling of steel fibre reinforced concrete with high strength / X. Liang, C. Wu // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 165. – P. 187–198.

14 **Шилько, С. В.** Двухуровневый метод оптимизации состава материала деталей машин из дисперсно-армированных композитов / С. В. Шилько // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2019. – № 2 (47). – С. 51–57.

15 **Pleskachevskii, Y. M.** Finite-element modeling of the interaction of reinforcement with concrete matrix / Y. M. Pleskachevskii, A. O. Shimanovskii, G. M. Kuzemkina // *Mechanics of Composite Materials*. – 2008. – Vol. 44, No. 3. – P. 209–214.

16 **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. – P. 346–351.

17 **Якубович, О. И.** Влияние формы армирующих гранул на напряженно-деформированное состояние композита / О. И. Якубович // *Механика. Исследования и инновации*. – 2018. – Вып. 11. – С. 274–280.

18 **Шимановский А. О.** Влияние физических констант заполнителя на напряженно-деформированное состояние строительных композитов / А. О. Шимановский, О. И. Якубович, А. Ю. Шуберт // *Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.* – Гомель : БелГУТ, 2019. – Т. 2. – С. 77–78.

A. O. SHIMANOVSKY, A. Yu. SHUBERT

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

INFLUENCE OF PHYSICAL AND GEOMETRIC PARAMETERS OF FILLERS ON THE STRESSED-STRAINED STATE OF A COMPOSITE

Computer simulation of the stress-strain state of a composite reinforced by the fibers under the influence of the applied distributed pressure is performed using the ANSYS software package. It is shown the degree of the material stiffness increase, the inhomogeneous material deformation and the stresses decrease depending on the increase of the fiber diameter, elasticity modulus and the Poisson's ratio of the reinforcing filler.

Получено 10.11.2018