

УДК 539.3

**Баталов П.В.**

*студент*

*4 курс, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»*

*Пермский национальный исследовательский*

*политехнический университет*

*Россия, г. Пермь*

**Галин Э.Р.**

*студент*

*4 курс, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»*

*Пермский национальный исследовательский*

*политехнический университет*

*Россия, г. Пермь*

## **РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЁРЗШЕГО ГРУНТА**

*Аннотация:* Сделаны расчёты эффективных упругих характеристик промёрзшего грунта, с использованием модели механики микронеоднородной среды. Расчёты проведены в зависимости от объёмной доли армирующего наполнителя (льда). Получены зависимости поперечного модуля Юнга и поперечного модуля сдвига от объёмной доли наполнителя.

*Ключевые слова:* механика гетерогенных сред, промёрзший грунт, эффективные упругие характеристики, объёмная доля армирующего компонента, МКЭ.

## **CALCULATION OF EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF FROZEN GROUND**

***Annotation:** Calculations of the effective elastic characteristics of the frozen ground were made using a model of a unidirectional composite with a tetragonal structure. Calculations are carried out depending on the volume fraction of the reinforcing filler (ice). Dependences of the transverse Young's modulus and the transverse shear modulus on the volume fraction of the filler are obtained.*

***Key words:** mechanics of heterogeneous environments, frozen ground, effective elastic characteristics, volume fraction of reinforcing component, FEM.*

В настоящее время в механике композиционных материалов и конструкций наработана обширная научная база по таким вопросам как моделирование и расчёты композитных материалов и конструкций, состоящих из различных компонентов и находящихся в разнообразных условиях нагружения. Так, например, в статье Ташкинова М.А. изучается упругое поведение многокомпонентных композиционных материалов с помощью моделирования [1].

Однако в силу многообразия, как компонентов композитов, так и их условий нагружения, научная работа в этих направлениях всё ещё продолжается. Также следует упомянуть, что большинство исследований проводится для классических композиционных материалов, таких как волокнистые или дисперсно-упрочнённые композиты [2], [3]. Этого требует современное производство изделий из композитов.

Хотя, большинство материалов, которые нас окружают, также являются неоднородными, и из этого можно сделать вывод, что модели и принципы механики композитов можно применять и для других исследований. Так, например, строительство подземных объектов, к которым относятся и вертикальные стволы шахт, является наукоемким и ресурсозатратным процессом. Оно сопровождается решением множества проблем, связанных с обеспечением безопасности при строительстве и дальнейшей эксплуатации объекта. Влияние различных факторов, таких как: потеря устойчивости, воздействие обильных водопритоков и др. может

способствовать разрушению стенок выработки. Для того чтобы решать такого типа задачи, грунт необходимо рассматривать как неоднородную среду для более точного описания. Так в статье Сулейманова Р.Н. и Чекалкина А.А. методы и подходы механики композиционных материалов используются для моделирования процесса образования ледопородного массива при проходке вертикальных шахт методом замораживания [4]. Также проблемы связанные с эффективной оценкой напряженно-деформированного состояния зоны бурения в горных породах, является одной из важнейших в процессе моделирования строительства нефтяных и газовых скважин [5]. Из этого можно сделать вывод, что применение моделей механики композитов может быть актуальным для исследований, где рассматриваются гетерогенные среды.

Целью данной работы является определение эффективных упругих характеристик промерзшего грунта с использованием модели микронеоднородной среды [6]. Роль армирующего наполнителя будет играть лёд, а в роли матрицы будет выступать грунт. В данной работе мы определили эффективные поперечный модуль Юнга ( $E_{\perp}^*$ ) и поперечный модуль сдвига ( $G_{\perp}^*$ ) в зависимости от объёмной доли наполнителя ( $V_f$ ). Компоненты нашего композита будем считать изотропными и однородными.

Расчёт производился в первом приближении, так как отрицательная температура компонентов учитывалась только тем, что упругие свойства компонентов были взяты при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ . Расчёты проводились с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [7] реализуемого в программном пакете «ANSYS».

Данные взятые для расчётов:

Свойства льда  $E_1 = 3 * 10^9 \text{Па}$ ,  $\nu_1 = 0.37$ ;

Свойства грунта  $E_2 = 5 * 10^8 \text{Па}$ ,  $\nu_2 = 0.36$ .

Сторона ячейки  $a = 6 * 10^{-3} \text{м}$

Как говорилось выше, для расчётов была взята модель микронеоднородной среды, в данном случае модель однонаправленного композита с тетрагональной структурой (рисунок 1).

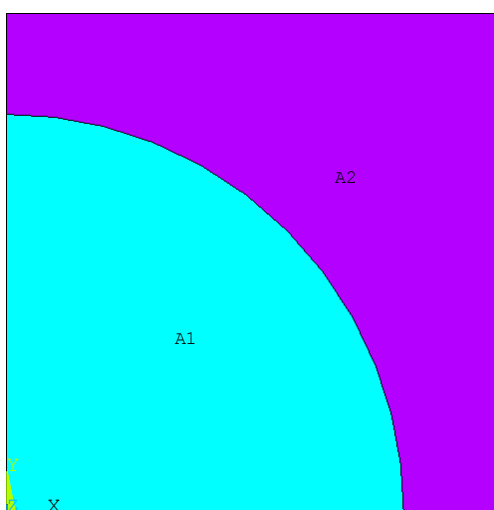


Рисунок 1. Ячейка периодичности однонаправленного композита с тетрагональной структурой для  $V_f = 0.5$

Для того чтобы найти эффективные упругие характеристики сначала было необходимо найти поля микронапряжений и микродеформаций в ячейке, для этого в «ANSYS» решалась статическая краевая задача теории упругости для структурно неоднородного тела (рисунок 2).

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}(\vec{r}) = 0, \\ \sigma_{ij}(\vec{r}) = C_{ijmn}(\vec{r})\varepsilon_{mn}(\vec{r}), \\ \varepsilon_{ij}(\vec{r}) = \frac{1}{2}[u_{i,j}(\vec{r}) + u_{j,i}(\vec{r})], \\ u_i(\vec{r})|_{\Gamma} = \varepsilon_{ij}^* r_j. \end{cases} \quad (1)$$

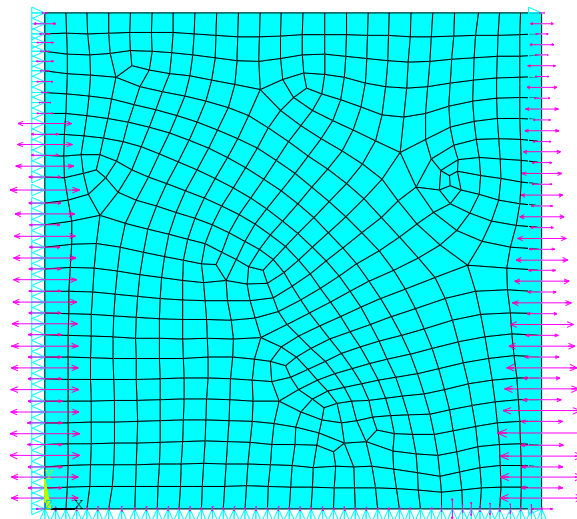


Рисунок 2. Ячейка с заданными граничными условиями на одноосное растяжение

Для того чтобы найти модуль Юнга задавались граничные условия в перемещениях на одноосное растяжение, для того чтобы в результате получить макронапряжения по оси X (рисунок 3). Заданное перемещение  $u_x = 6 * 10^{-6}$  м.

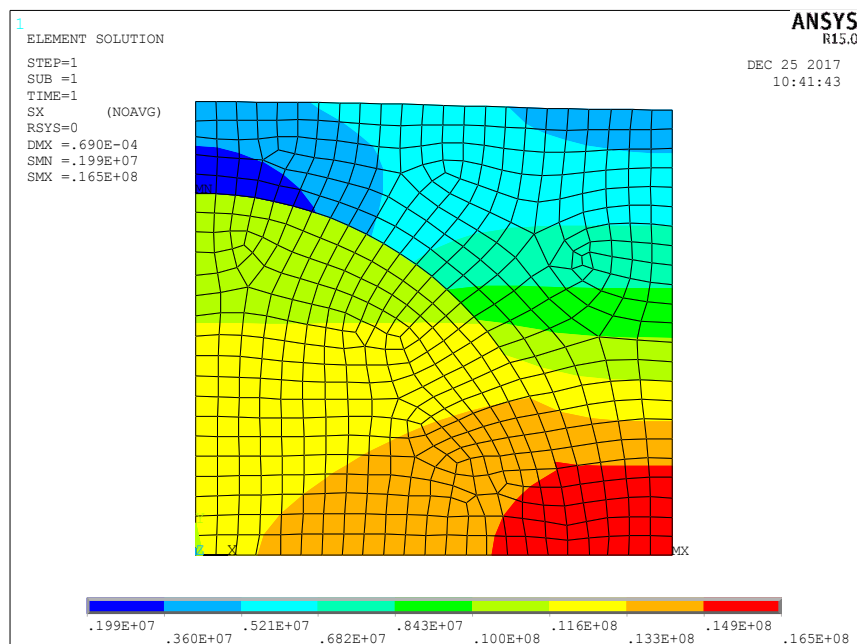


Рисунок 3 – График напряжений  $\sigma_{11}$  для одноосного растяжения. После того как были найдены макронапряжения  $\sigma_{11}^*$  и макродеформации  $\epsilon_{11}^*$ , по закону Гука были определены поперечные модули Юнга для разных объёмных наполнений (рисунок 4).

$$E_{\perp}^* = \frac{\sigma_{11}^*}{\varepsilon_{11}^*} \quad (2)$$

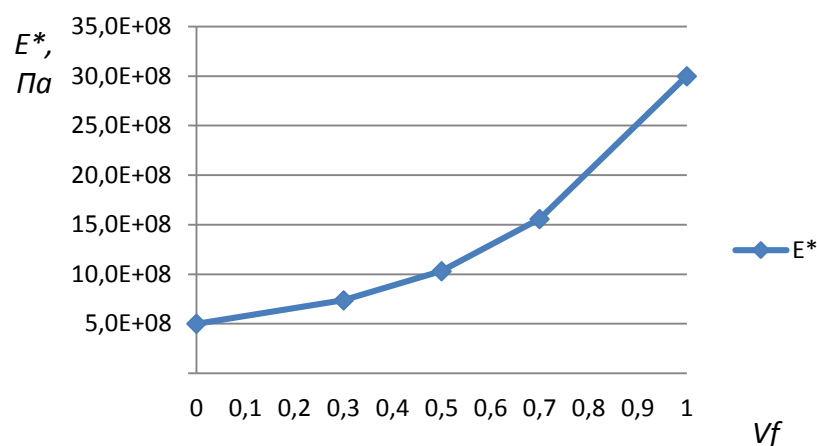


Рисунок 4. График зависимости эффективного поперечного модуля Юнга  $E_{\perp}^*$  от объёмной доли наполнителя  $V_f$

Для нахождения поперечного модуля сдвига, задавались граничные условия в перемещениях на чистый сдвиг. После нахождения макронапряжений и макродеформаций по закону Гука были найдены искомые характеристики для разных объёмных наполнений (рисунок 5).

$$G_{\perp}^* = \frac{\sigma_{11}^* - \sigma_{22}^*}{2(\varepsilon_{11}^* - \varepsilon_{22}^*)} \quad (3)$$

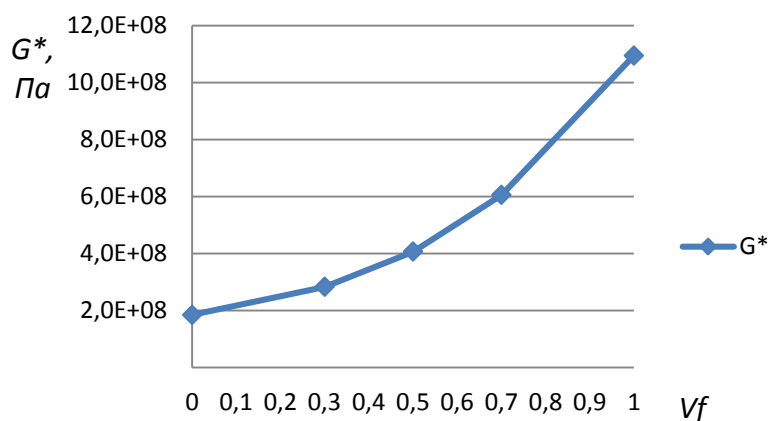


Рисунок 5. График зависимости эффективного поперечного модуля сдвига  $G_{\perp}^*$  от объёмной доли наполнителя  $V_f$

Из построенных зависимостей можно увидеть, что чем больше объёмное содержание льда, тем больше эффективные упругие

характеристики промерзшего грунта. Исходя из принципов механики композитов, можно сказать, что данные результаты расчётов корректны, так как при увеличении объёмного наполнения более жесткого материала, соответственно растут эффективные упругие характеристики композита.

В результате проведённой работы можно сделать вывод, что модели и принципы механики гетерогенных сред можно использовать для других исследований, когда неоднородностью рассматриваемой среды нельзя пренебречь. Это повышает отражение реальных характеристик рассматриваемой среды.

Работа произведена в рамках научно-исследовательской практики студентов [8].

#### **Использованные источники**

1. Ташкинов М.А. Моделирование упругого поведения многокомпонентных композиционных материалов с использованием приближенных решений стохастических краевых задач // Вестник ПНИПУ. Механика. - 2015 - №3 - с. 165-181.
2. Безмельницын А.В., Сапожников С.Б. Многомасштабное моделирование и анализ механизма возникновения технологических межслойных напряжений в толстостенных кольцах из стеклопластика // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2017 - №2 – с. 5-22.
3. Полатов А.М. Компьютерное моделирование упругопластических волокнистых материалов // Механика композиционных материалов и конструкций - 2015 - Том 21 - №3 – с. 314-327
4. Сулейманов Р.Н., Чекалкин А.А. Математическое моделирование процесса образования ледопородного массива при проходке шахтных стволов методом замораживания // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань - 20-24 августа 2015 года - с. 3635-3637

5. Доровских И.В., Подъячев А.А., Павлов В.А. Влияние изменения механических свойств горных пород при насыщении буровым раствором на напряженное состояние прискважинной зоны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014 - №11 – с. 31-38
6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. - М.: Наука, 1984. – 115 с.
7. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 1999. 150 с.
8. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / Е.Ю. Макарова, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2017. – 40 с.