

### 0.1. Горынин А.Г. Программная реализация метода асимптотического расщепления для анализа композитных стержней сложного профиля

При расчете конструкции из слоисто-волоконистых композитов актуальным является вопрос о построении математически обоснованных редуцированных моделей, позволяющих избежать высокочисленного трехмерного конечно-элементного анализа. В силу наличия малых параметров, большинство тонкостенных конструкций поддается асимптотическому анализу, что позволяет упростить исходную пространственную постановку задачи. Асимптотические методы выступают математически строгой альтернативой методу гипотез, широко распространенному в механике тонкостенных конструкций, однако имеющему свои недостатки, в первую очередь связанные с предположениями о характере распределения перемещений или напряжений в конструкции.

В данной работе для анализа композитных стержней используется метод асимптотического расщепления [1,2], в котором решение построено разложением компонент тензора напряжений и вектора перемещений по степеням дифференциальных операторов, действующих вдоль продольной координаты стержня. Такой подход позволяет свести задачу к поэтапному решению нескольких краевых задач. В поперечном сечении стержня решаются двумерные краевые задачи для определения его жесткостных характеристик. После того, как жесткостные характеристики поперечного сечения найдены, необходимо решить систему одномерных уравнений по длине стержня, описывающую его растяжение-сжатие, изгиб и кручение. Алгоритм решения задачи реализован на языке Python с использованием сторонних библиотек. Геометрия поперечного сечения и его сетка создаются отдельно средствами генератора сеток Gmsh [3]. Затем производится привязка свойств материалов для каждого слоя к имеющейся геометрии. Для численного решения двумерных краевых задач в сечении и системы одномерных уравнений по длине стержня использован метод конечных элементов, реализованный средствами пакета с открытым исходным кодом FEniCS Project [4]. На основе полученных решений восстанавливаются все компоненты вектора перемещений и тензора напряжений. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-18029).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Голушко С.К.*

#### Список литературы

- [1] GORYNIN G., NEMIROVSKY Y. Deformation of Laminated Anisotropic Bars in the Three-dimensional Statement 1. Transverse-longitudinal Bending and Edge Compatibility Condition // Mechanics of Composite Materials. 2009. Vol. 45, N. 3, P. 257–280.
- [2] Голушко С.К., Горынин Г.Л., Горынин А.Г. Метод асимптотического расщепления в динами-

ческих задачах пространственной теории упругости // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. 2020. Т. 188. С. 43–53.

- [3] GEUZAIN C., REMACLE J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79. N. 11, P. 1309–1331
- [4] ALNAES M., BLECHTA J., HAKE J., JOHANSSON A., KENLET B., LOGG A., RICHARDSON C., RING J., ROGNES M., WELLS G. The FEniCS Project Version 1.5 // Archive of Numerical Software. 2015. Vol. 3. N. 100.