

Создание базы данных элементарных ячеек метаматериалов

Д. В. Ведерников

Московский физико-технический институт (Государственный университет)

Уровень развития современных аддитивных технологий позволяет создавать конструкции с применением метаматериалов с характерным размером ячейки порядка 100 микрометров. С появлением металлических 3D принтеров появилась возможность использовать метаматериалы в авиации. Главными преимуществами метаматериалов является широкий диапазон жёсткостных характеристик, возможность создавать ячейки с нулевым и даже отрицательным коэффициентом Пуассона. Благодаря этому свойству из метаматериалов можно создавать адаптивные конструкции. В тоже время метаматериалы обладают рядом недостатков: высокая стоимость, сложная технология производства, разброс механических характеристик и. т. д.

Для создания изотропной ячейки метаматериала (далее ячейки) разобьём её на 48 неправильных тетраэдров тремя плоскостями симметрии ортогональными осям X, Y, Z, а также тремя плоскостями, которые биссекторны каждой паре координатных осей (Рис 1а).

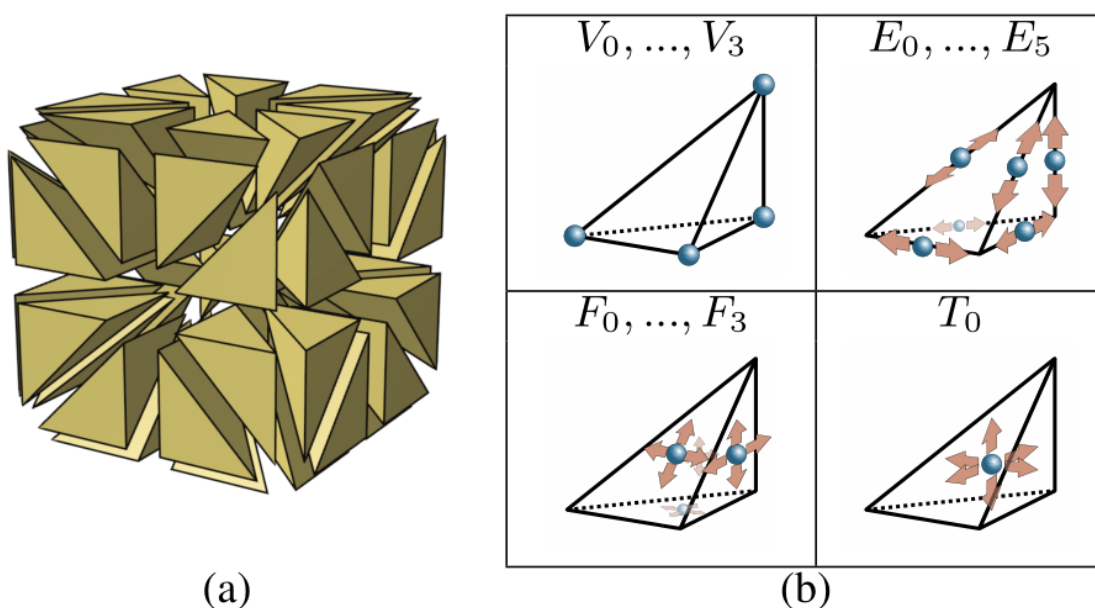


Рис 1.

Таким образом создавая произвольную конструкцию внутри тетраэдра, ячейка будет оставаться изотропной. В работе рассматриваются каркасные ячейки. Тетраэдры заполняются узлами и рёбрами. В ячейке может быть до 15 узлов. Узлы делятся на 4 типа (Рис 1б):

- 4 узла в вершинах (V_0, V_1, V_2, V_3),
- 6 узлов лежат на рёбрах ($E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$) (могут смещаться вдоль ребра тетраэдра)
- 4 узла лежат на гранях (F_0, F_1, F_2, F_3) (могут перемещаться по граням тетраэдра)
- 1 узел находится внутри тетраэдра T_0 (может смещаться внутри тетраэдра)

Узлы внутри тетраэдра соединены рёбрами, которые могут иметь различные сечения. Каждый узел имеет валентность. Валентность узла -- натуральное число показывающее количество узлов, с которыми он соединён. Узлы тетраэдра лежащие на границе ячейки назовём контакторами. При создании конструкций из метаматериалов контакторы должны иметь одинаковую топологию.

На параметры ячеек накладываются следующие ограничения:

- В каждом тетраэдре не менее 3 рёбер (иначе ячейка неодносвязна)
- Нет рёбер, содержащих другие рёбра. К примеру ребро V0E0 не может существовать при наличии ребра V0V1
- Валентность узлов $\in [1, 7]$
- Узел лежащий в объёме тетраэдра должен обладать валентностью > 1 (Для связности конструкции).

Алгоритм заполнения базы данных ячеек:

1. Выбор материала
2. Выбор размера ячейки
3. Выбор топологии контакторов
4. Выбор числа узлов в тетраэдре.
5. Количество ячеек с одинаковым числом узлов
6. Задание валентности узлов
7. Задание сечений рёбер

В работе рассматривается два случая нагружения ячеек сжатие и сдвиг (Рис 2)

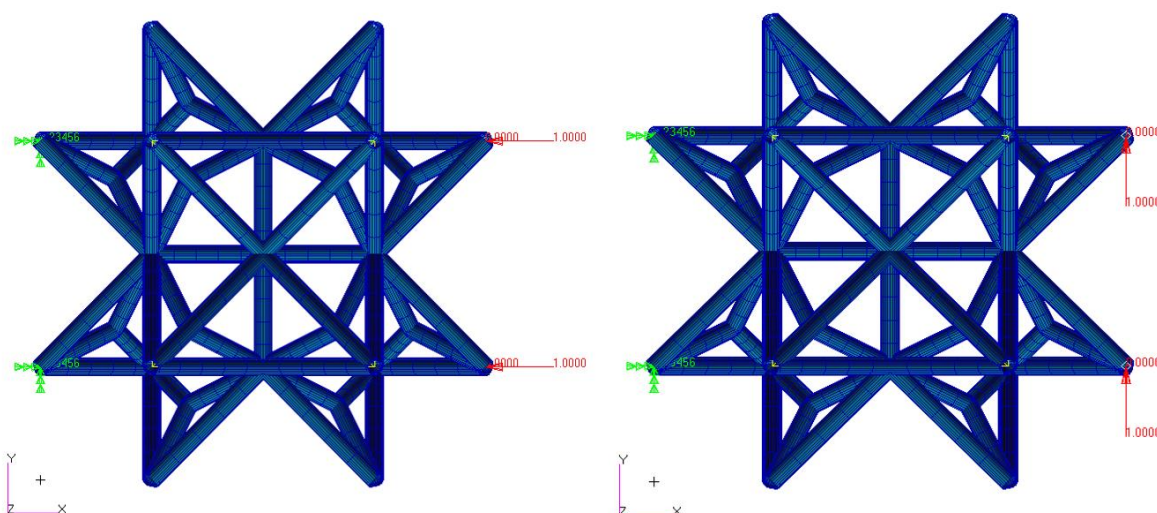


Рис 2

Моделирование ячеек производилось в автоматическом режиме с помощью алгоритма, реализованного на языке программирования C++. При моделировании ячеек использовалась балочная схематизация. Расчет ячеек производился в программе MSC. Nastran, методом конечного элемента. Модуль Юнга ячейки определяется по формуле (1), при сжатии ячейки.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta l/l} = \frac{F}{\Delta l * l} \quad (1)$$

F – суммарная сила действующая на граничные узлы ячейки

l --линейный размер ячейки

Δl --перемещение граничных узлов в направлении приложения силы

Коэффициент Пуассона вычисляется по формуле (2)

$$\mu = \frac{\delta}{\varepsilon} = \frac{\Delta d/l}{\Delta l/l} = \frac{\Delta d}{\Delta l} \quad (2)$$

Δd --деформация в направлении ортогональном сжатию

δ --относительная деформация в направлении ортогональном сжатию

Во втором случае нагружения вычисляется модуль сдвига ячейки по формуле (3).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/S}{\Delta y/l} \quad (3)$$

Δy --среднее перемещение узлов к которым приложена нагрузка

При создании конструкций из метаматериалов важное значение имеет допустимый уровень напряжений, приходящих на ячейку. Так как расчёт производится в линейной области. Применима следующая формула (4)

$$\sigma_{\text{дон_мет}} = \eta \frac{F}{S} = \frac{\sigma_{\text{дон}} * F}{\sigma_{\text{max}} * S} \quad (4)$$

η -- коэффициент запаса прочности

$\sigma_{\text{дон}}$ -- допустимый уровень напряжений в материале ячейки

σ_{max} -- максимальный уровень напряжений в конструкции

При создании конструкций важно знать массовые характеристики ячеек. В базе данных ячеек такой характеристикой является коэффициент заполнения. Коэффициент заполнения—отношение объёма конструкции ячейки к объёму куба, в который она вписана.

Результатом работы является универсальное приложение, позволяющее генерировать ячейки с различной топологией, как в ручном, так и в автоматическом режиме. В автоматическом режиме ячейки сортируются в базе данных по топологии и механическим характеристикам. При работе в ручном режиме, возможно использование приложения в сочетании с внешним оптимизатором, для получения наилучших весовых характеристик.

Литература

1. Julian Panetta, Qingnan Zhou, Luigi Malomo Elastic Textures for Additive Fabrication, 2015
2. X. Zheng ¹, H. Lee ², T. H. Weisgraber ¹, M. Shusteff ¹, J. Deotto Ultra-light, Ultra-stiff Mechanical Metamaterials 07 May 2014