

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия*

***Аннотация.** Анализируются геометрические схемы сетчатых структур, используемых на разных этапах проектирования и модельной подготовки изделий с использованием технологии САЕ и 3D печати. При формировании 3D модели, для её полноценности, целесообразно использовать методы инжиниринга с проверкой её характеристик и возможной оптимизацией топологии («генеративный» дизайн). Представленный материал является результатом исследований и разработок, проводимых на кафедре «Инженерной и машинной геометрии и графики» БГТУ «ВОЕНМЕХ».*

**Ключевые слова:** геометрическая модель; геометрия сетчатых структур; технологии САЕ; 3D печать; схемы заполнения; топология

Геометрия, практически во всех приложениях является определяющим фактором формирования конструкции и пользовательских характеристик создаваемых изделий.

Сетчатые структуры занимают особое место как в законченных конструкциях, так и в программах (САЕ), обеспечивающих оптимальные характеристики изделия. При этом следует выделить программные инструменты обеспечивающие геометрию изделия и используемые сетчатые конструкции. К ним относятся: BlockMesh, SALOME, ANSYS (геометрия и сетка), Blender, BRL-CAD, SolidWorks, ANSYS, Компас-3D (геометрия), snappyHexMesh, Netgen, gmesh (сетка) и ряд других.

Как отмечалось в [1–3] базовыми 3D элементами сетки САЕ являются: гексадр, тетраидр, призма, пирамиды, причем каждая из этих структур с точки зрения своих реализаций имеет соответствующие достоинства и недостатки. С точки зрения автоматизации построения наилучшими структурами являются тетраидр и призма, причём для сложных ГМ возможна их комбинация. Однако при

сложных ГМ возможны проблемы, связанные с учётом в расчётах мелких элементов (их редактирование осуществляется вручную). Комбинация тетраэдр-призма требуют больших вычислительных ресурсов.

Сетки для технологий FDM/FFF с точки зрения геометрии могут иметь различные варианты: линии, сетки, соты, треугольники, три-шестиугольники, кубы, октеты, героиды, концентрические узоры. Их выбор определяется производственной целью. Например изделия, с реальными нагрузками, целесообразно заполнять кубическим, октетным или героидным шаблонами; для изделий, подверженные деформациям (изгиб), лучшим вариантом является концентрический шаблон, а для визуализационных целей можно использовать: линии, сетки и треугольники. В качестве важного параметра выступает также плотность заполнения модели, которая формально, может быть в диапазоне 0–100% и устанавливается настройками слайсера. Следует отметить, что ряд слайсеров предоставляют возможность переменной плотности заполнения, определяемой геометрией модели. В связи с этим, выявляются такие параметры как время печати, расход используемого материала и как следствие, вес и прочность.

Практика показывает, что при печати визуализационных геометрических моделей при использовании линий, сеток и треугольников вполне достаточно устанавливать заполнение в пределах 5–20%. При этом печать будет достаточно быстрой, а получаемая модель, легкой. Другим предельным случаем является модели, используемые в производственной сфере. В этом случае, надежным будет 80–100% заполнение. Более точные значения можно установить, получив результаты CAE (оптимизация топологии). Оптимизация топологии, вообще серьёзным образом может изменить внешний облик изделия, а внутреннее заполнение придать определенные пользовательские характеристики.

Особое место занимают модели, изначально подвергаемые деформации, т.е. гибкие модели. Их рисунок заполнения (целесообразно использовать героидный шаблон, реализуемый, в частности, в наиболее популярном слайсере Ultimaker Cura [4,5]), с позиции геометрии, является самым сложным, но дающий целый ряд преимуществ.

В этом случае, процент заполнения (5–95%), устанавливается в соответствии с предварительными оценками (методы CAE) и последующей натурной проверкой отпечатанного образца [6].

Для технологии SLM и им подобных, геометрия внутренней структуры практически остаётся той же, правда размеры ячеек и связи между узлами представляют собой стержневые или трубчатые конструкции. Поэтому, практически важной стороной вопроса является функциональность изделия, требующая учёта условий эксплуатации (нагрузочные характеристики, расположение, жизненный цикл и ряд других). Диапазон использования сетчатых конструкций огромен: разрушаемые элементы с целью энергопоглощения, геометрия электродов аккумуляторных батарей, фильтры жидкостей и газов, вибро- и шумоизоляция, экранирование, элементы военной и космической техники и т.д.

Одной из чувствительных областей является изучения инженерной геометрии и приложений в образовательном процессе. Представленный выше материал, является результатом исследований и опыта работ в области 3D геометрии и печати, проводимых сотрудниками кафедры «Инженерной и машинной геометрии и графики» БГТУ «ВОЕНМЕХ» на протяжении ряда последних лет (например, [7]).

#### **Список литературы:**

1. Любимов А.К., Шабарова Л.В. Методы построения расчетных сеток в пакете ANSYS ICEM CFD: Электронное методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 25 с.
2. Вебинар «Применение ICEM CFD для построения гекса-сеток блочным методом» / URL: <http://cae-systems.ru/webinars/01082013-1300>.
3. Вебинар «Численное решение задач гидродинамики в продуктах ANSYS: полезные советы» / URL: <http://cae-systems.ru/webinars/28062013-1400>.
4. Джонсон А. Clipper2 – Библиотека обрезки и смещения полигонов / URL: <http://www.angusj.com/delphi/clipper.php> (дата обращения 17.03.2023).
5. Ultimaker. Professional 3D printing made accessible. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> (дата обращения 17.03.2023).

6. Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М., Нефедова Л.А. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба. Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 7, С. 1014.

7. Абросимов С.Н., Тихонов-Бугров Д.Е. 3D-печать как составляющая часть учебного процесса по геометро-графическим дисциплинам. Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации. 2017. Т. 1. С. 169–175.

S. N. Abrosimov, A. G. Butkarev, D. E. Tikhonov-Bugrov  
Geometric aspects of grid structures used in engineering practice

*Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov,  
St. Petersburg, Russia*

***Abstract.** Possible variants of the internal structure of geometric models printed on a 3D printer using FDM technology are considered. The filling topology is related to the strength characteristics of the geometric model and its printing time. Their optimization is an important parameter for printing and user characteristics of the printed model. The presented material has been used over the past years in the educational process in the disciplines of the geometric and graphic cycle ("Descriptive geometry", «Engineering and computer graphics" and "Fundamentals of computer-aided design").*

**Keywords:** geometric model; geometry of mesh structures; CAE technologies; 3D printing; filling schemes; topology