**Аннотация**

В ходе работы над курсовым проектом был подробно изучен предмет исследования – сетчатые структуры. Были определены основые области применения этих структур, выявлены преимущества их применения в каждой области. Также были рассмотрены основные классификации (конформные/однородные, различной плотности, упорядоченные/стохастические) сетчатых структур и их типы.

В расчетно-пояснительной записке представлено подробное описание параметров сетчатых структур (тип и размер элементарной ячейки, объемная доля) и влияние этих параметров на физические свойства решеток.

После проведения исследования предметной области, была спроектирована программа, позволяющая получать 3D-модели сетчатых структур.

В программе реализована возможность выбора типа элементарной ячейки, а также изменения ее размера. Программа заполняет сетчатыми структурами различные по форме геометрические фигуры.

**Содержание**

1. Введение…………………………………………………………………….............5
2. Постановка задачи. Разработка технического задания………………..................6
   1. Введение..…..……………………………………………………..................6
   2. Требования к программе………………....……………………….................6
   3. Требования к программной документации……………………...................7
   4. Технико-экономические показатели………………...…………...........…...7
   5. Стадии и этапы разработки…………...........……………………................7
   6. Порядок контроля и приемки…………………………………..........……..8
3. Исследование предметной области.....………………………………..........……..9
   1. Сетчатные структуры…………………………………....………...........…..9
   2. Применение сетчатых структур………………………………............……9
   3. Типы сетчатых структур………………………………………............…...11
      1. Сетчатые структуры различной плотности……………............……...11
      2. Стохастические и упорядоченные сетчатые структуры............……..12
      3. Конформные и однородные сетчатые структуры………............…….13
   4. Параметры сетчатых структур…………………………………................14
      1. Тип элементарной ячейки……………………………………...............14
      2. Объемная доля………………………………………………............…..17
      3. Размер элементарной ячейки………………………............…………..18
   5. Обзор ПО для проектирования сетчатых структур………….............…..18
      1. Autodesk Within…………………………………………………............18
      2. Intralattice…………………………………………..………............……18
      3. Netfabb………………………………….…………………............….....19
      4. Simpleware……………………………………..………............……......19
      5. Materialise…………………………..……………………............……...20
      6. Оценка существующих программ..........................................................21
4. Разработка программного комплекса……………………...…………............…23
   1. Проектирование основных алгоритмов………………............……...…..23
   2. Проектирование структур классов…………………............…...………..24
5. Результаты работы программы…………………………………............…...…...25
   1. Общие результаты работы прораммного комплекса……............……....25
   2. Построение различных типов элементарных ячеек……............……......27
   3. Возможность заполнения с етчатыми структурами различные по форме фигуры……………….....…………………………………...........................….29
   4. Возможность изменения размера элементарной ячейки………..............30
6. Заключение……………………………………….......………………............…...31
7. Список литературы…………………………………….....…………............……32

**1.Введение**

Традиционные технологии производства изделий, которые много лет используются в промышленности, позволяют изготавливать различные детали с достаточной простой геометрией. Но появившиеся недавно и активно развивающиеся в последние годы аддитивные технологии производства позволяют изготавливать детали со сложной геометрией, которые традиционными способами получить очень сложно или практически невозможно. В связи с распространением аддитивных производств встает вопрос об обеспечении этих производств системами автоматизированного проектирования для разработки изделий. Традиционное программное обеспечение не подходит для аддитивного производства, так как не имеет соответствующего функционала. Именно поэтому многие компании по всему миру сегодня занимаются разработкой специализированного ПО, позволяющего проектировать изделия для аддитивного производства.

Цель курсового проекта – усовершенствование процессов проектирования и производства изделий, имеющих элементы в виде сетчатой структуры

Задачи курсового проекта:

1. Изучение предметной области. Определение основных областей применения сетчатых структур, их типов и параметров.
2. Разработка алгоритма построения сетчатых структур
3. Создание моделей с помощью разработанной программы
4. Печать тестовых моделей на 3D принтере

**2. Постановка задачи. Разработка технического задания**

**2.1. Введение**

**2.1.1. Наименование программы**

Наименование программы: «Генератор сетчатых структур».

**2.1.2. Назначение и область применения**

Программа предназначена для проектирования деталей, имеющих элементы, выполненные в виде периодической сетчатой структуры. Предполагаемая область применения – машиностроение, изготовление имплантатов и другие области, в которых требуется уменьшение массы изделия, при увеличении жесткости.

**2.1.3. Основания для разработки**

Основанием для разработки служит настоящее техническое задание. Утверждено 05.09.2016 кафедрой РК9 «Компьютерные системы автоматизации производства». Тема разработки – создание сетчатых структур.

**2.2. Требования к программе**

**2.2.1. Требования к функциональным характеристикам**

Основная функция программы – создание трехмерных сеток. На входе программа получает неявно заданную функцию вида f=f (x, y, z), которая задает границы области, а так же тип и размер элементарной ячейки.

**2.2.2. Требования к составу и параметрам технических средств**

ОС Windows ХР или новее, процессор Intel Pentium 4 или новее, оперативная память: 512 мегабайт и больше, 1Гб свободного пространства на диске.

**2.2.3. Требования к информационной и программной совместимости**

Результаты работы программы должны быть записаны в файл формата STL, других требований по совместимости нет.

**2.3. Требования к программной документации**

**2.3.1. Предварительный состав программной документации**

1. Техническое задание
2. Расчетно-пояснительная записка

**2.4. Технико-экономические показатели**

Программа совместима с операционной системой Windows, а значит доступна большому кругу потребителей. Показывает хорошие показатели быстродействия. На данный момент на рынке не представлено ни одной аналогичной программы российской разработки. Зарубежные аналоги малодоступны и имеют недостатки, которые учитываются при разработке программы.

**2.5. Стадии и этапы разработки**

1. Исследование предметной области (потребители, назначение, типы, параметры) (типы сетчатых структур, параметры, на что влияет изменение параметров)
2. Реализация заполнения объема сетчатой структурой

a. Проектирование основных алгоритмов

b. Проектирование структур классов

c. Реализация алгоритмов

1. Реализация возможности задания и варьирования параметров сетчатой структуры

**2.6. Порядок контроля и приемки**

Защита курсового проекта. Программа должна построить заданную сетчатую структуру, пригодную для 3D печати.

**3. Исследование предметной области**

**3.1. Сетчатные структуры**

Сетчатые структуры представляют с собой чередование монолитного материала с полостями. Подобные структуры очень распространены в природе, например, пчелиные соты или древесина.

**3.2.Применение сетчатых структур**

В современном мире сетчатые структуры получают все более широкое применение. Их изготовление больше не ограничивается возможностями производсвта. Развитие технологий 3D печати и аддитивного производства позволяют изготавливать структуры со сложной георметрией, что еще вчера казалось невозможным.[4]

**3.2.1. Машиностроение**

С инженерной точки зрения главным преимуществом использования сетчатых структур является повышение прочности конструкции в совокупности с относительно низкой массой. Кроме того, использование данных структур обеспечивает хорошую тепло и звукоизоляцию.

**3.2.2. Протезирование**

В последние годы развивается применение сетчатых структур в медицине. Изготавливаются протезы (Рис.1.) и импланты с применением таких технологий. Преимущества сетчатых имплантов в том, что ткани тела проростают внутрь импланта, таким образом заживление и приживание импланта происходит гораздо быстрее. Применение сетчатых структур при изготовлении протезов позволяет уменьшить напряжения на поверхности протеза и равномерно распределить их между костью и протезом, что позволяет минимизировать износ протеза. Еще один плюс – облегчение конструкции протеза.[4]

|  |
| --- |
| implantant-sustava |
| Рис.1. Протез сустава |

**3.2.3. 3D печать**

Так же сетчатые структуры находят свое применение в 3D печати, при изготовлении сетчатых поддержек (Рис.2.) вместо сплошных (Рис.3.). Основной плюс применения данной технологии – экономия материалов и более простое удаление поддержек.[1]

|  |
| --- |
| Снимок экрана (466) |
| Рис.2. Модель с сетчатыми поддержками |
| Снимок экрана (465) |
| Рис.3. Модель со сплошными поддержками |

**3.3.Типы сетчатых структур**

**3.3.1. Сетчатые структуры различной плотности**

Наиболее распространенные сетчатые струкутры – структуры постоянной плотности (пример на Рис.4.)

|  |
| --- |
| Снимок экрана (463) |
| Рис.4. Сетчатая структура постоянной плотности |

При необходимости можно использовать сетчатые структуры переменной плотности, например, чтобы усилить места с максимальными напряжениями. (Пример на Рис.5.)[2]

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (450).png |
| Рис.5. Сетчатая структура переменной плотности |

Еще один вид структур – переходные сетчатые структуры. Они использвуются, когда необходимо соединить 2 сетчатые структуры различной плотности, размера или типа ячеек. Пример таких структур на Рис.6. Эти структуры очень интересны, но практического применения они пока не нашли.[1]

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (464).png |
| Рис.6. Примеры переходных сетчатых структур |

**3.3.2. Стохастические и упорядоченные сетчатые структуры**

Сетчатые структуры можно разделить на стохастические и упорядоченные. На Рис.7. и Рис.8. показаны различия между типами данных сетчатых структур.[3]

|  |
| --- |
| Снимок экрана (445) — копия |
| Рис.7. Примеры стохастических структур. |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (445).png |
| Рис.8. Пример упорядоченной структуры. |

Упорядоченные структуры намного прочнее стохастических. Это связано с тем, что в процессе деформации стенки стохастических структур изгибаются, а упорядоченных – только сжимаются и растягиваются. [3]

**3.3.3. Конформные и однородные сетчатые структуры**

Различие между конформными и однородными структурами представлено на Рис.9. и Рис.10. Однородные структуры заполняют объем вне зависимости от поверхности, его ограничивающей. Конформные же – повторяют форму ограничивающей поверхности. [4]

|  |
| --- |
| Снимок экрана (446) — копия |
| Рис.9. Однородная сетчатая структура. |
| Снимок экрана (446) |
| Рис.10. Конформная сетчатая структура. |

Если сетчатая структуры внутренняя (ограничена твердой поверхностью), то различие между типами структур не принципиально, и можно использовать однородную сетчатую структуру (Рис.11.), иначе оправданно применение конформной структуры (Рис.12.).[1]

|  |
| --- |
| Снимок экрана (461) |
| Рис.11. Внутренняя однородная сетчатая структура |
| Снимок экрана (462) |
| Рис.12.Конформная структура, не ограниченная снаружи твердой поверхностью. |

**3.4. Параметры сетчатых структур**

**3.4.1.Тип элементарной ячейки**

Сетчатая структура состоит из множества элементарных ячеек, которые расположены в определенных положениях и направлениях. Например, простейшая кубическая решетка состоит из элементарных кубов, имеющих общие ребра и вершины. (Рис.13. и Рис.14.)[3]

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (451) — копия.png |
| Рис.13 Элементарная кубическая ячейка |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (451).png |
| Рис.14. Кубическая сетчатая структура |

Существует множество различных типов элементарных ячеек: от простых, как, например, расмотренная выше кубическая или октогональная ячейки [3], до более сложных, задаваемых неявными функциями. [1]

- Октогональная ячейка (Рис.15.)

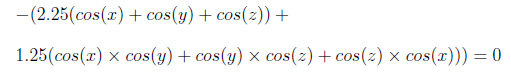
|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (454).png |
| Рис.15. Элементарная октогональная ячейка |

- Примитив Шварца (Schwarz Primitive) (Рис.16.) задается функцией

Снимок экрана (452) — копия

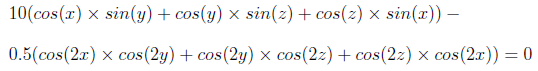
|  |
| --- |
| Снимок экрана (455) — копия |
| Рис.16. Примитив Шварца (Schwarz Primitive) |

- Урезанный примитив Шварца (Schwarz Primitive pinched) (Рис.17.)



|  |
| --- |
| Снимок экрана (456) — копия |
| Рис.17. Урезанный примитив Шварца (Schwarz Primitive pinched) |

- Гироид Шоэна (Schoen Gyroid) (Рис.18.)



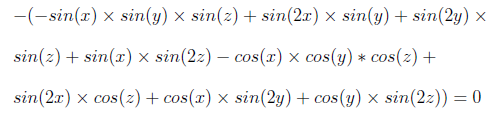
|  |
| --- |
| Снимок экрана (455) |
| Рис.18. Гироид Шоэна (Schoen Gyroid) |

- W-решетка Шварца (Schwarz W) (Рис.19.)



|  |
| --- |
| Снимок экрана (457) — копия |
| Рис.19. W-решетка Шварца (Schwarz W) |

- Поверхность Неовиуса (Neovius' Surface) (Рис.20.)



|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (456).png |
| Рис.20. Поверхность Неовиуса (Neovius' Surface) |

**3.4.2. Объемная доля**

Объемная доля – отношение материала стенок решетки ко всему объему решетки (Рис. 21). Объемная доля влияет на физические свойства решетки. Например, увеличение объемной доли ведет к увеличению модуля Юнга, но в то же время к уменьшению размеров ячеек и к уменьшению проницаемости структуры. От применения сеточной структуры зависит выбор объемной доли. Для структур, применяемых в медицине, она выбирается таким образом, чтобы свойства структуры совпадали с костью, которую она замещает. В ракето- и аэростроении объемная доля должна обеспечивать минимальный вес конструкции при максимальной жесткости.[2]

Один из способов изменения объемной доли для элементарных ячеек, заданных неявной функцией, - изменение значений изоповерхности. Уменьшение или увеличение значения изоповерхности приводит к изменению объемной доли структуры. Но этот способ не позволяет точно контролировать объемную долю, для получения заданного значения объемной доли необходимо угадать правильное значение изоповерхности.

Значение изоповерхности задается формулой:, где k – значение изоповерхности, f(p) – неявная функция, задающая элементарную ячейку структуры. Удобнее использовать значение изоповерхности равное 0, в таком случае вышеописанная формула примет вид: 

Приближенное значение объемной доли может быть вычислено как отношение количества вокселей, попавший в объем, ограниченный изоповерхностью, к общему количеству вокселей в элементарной ячейке структуры.[1]

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (476).png |
| Рис. 21. Гироид Шоэна с объемной долей 15%, 33% и 50%. |

**3.4.3. Размер элементарной ячейки**

Один из важных параметров при проектировании сетчатых структур – размер элементарной ячейки. При неизменной объемной доле количество элементарных ячеек в структуре увеличивается с уменьшением размера элементарной ячейки. (Рис.22.)

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Снимок экрана (457).pngСнимок экрана (459)Снимок экрана (460) |
| Рис.22. Гироид Шоэна с размерами ячейки 2мм, 5мм, 8мм. |

При слишком маленьком размере ячейки происходит утоньшение стенок и возможно их повреждение при изготовлении, потеря связи между соседними ячейками. Так же возможно возникновение сложностей с удалением материала поддежрки. Есть и ограничение на максимальный размер ячейки. При слишком длинных стенках возможно возникновение деформаций.[2]

**3.5. Обзор ПО для проектирования сетчатых структур**

С распространением сетчатых структур в различных областях производства стало понятно, что традиционные программы автоматизированного проектирования плохо адаптированы для быстрого и легкого проектировани сетчатых структур. На сегодняшний день разрабатывается множество специализированных программ для проектирования различных сетчатых структур.[4]

**3.5.1. Autodesk Within**

Используется для проектирования в медицинских целях (протезы, импланты) и в машиностроении (Рис.23). Предлагается библиотека элементарных ячеек, с возможностью оптимизации решетки в пределах определенного пространства (т.е. по предоставленным ограничениям и условиям нагрузки строится решетка переменного размера, 'оптимизированная' для заданных требований.)

|  |
| --- |
| AW-Fig4-1 |
| Рис.23. Пример проектирования сетчатой структуры в программе Autodesk Within |

**3.5.2. Intralattice**

Создан в качестве платформы для исследований. Пользователю предоставляется свобода в создании собственной ячейки (есть также библиотека стандартных), есть возможность выбрать один из методов отображения решетки и установить толщину стенок ячеек. Можно заполнять различные по форме области (куб, цилиндр), создавать сетчатые структуры между двумя поверхностями, поверхностью и осью, посерхностью и точкой (Рис.24).

|  |
| --- |
| Fractal Geometry |
| Рис.24. Пример проектирования сетчатой структуры в программе Intralattice |

**3.5.3. Netfabb**

ПО для подготовки моделей к 3D печати и аддитивному производству. Есть возможность создать свою ячейку или выбрать из библиотеки и заполнить область (Рис.25).

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Netfabbsupport.jpg |
| Рис.25. Пример проектирования сетчатой поддержки в программе Netfabb |

**3.5.4. Simpleware**

**Simpleware** – всемирноизвестная программная система обработки изображений для конвертирования изображений в полноценные 3D модели и последующего создания поверхностных и объемных конечно-элементных сеток, в том числе для структурного и гидродинамического анализа (Рис.26). Благодаря восстановлению данных, полученных при МРТ-сканировании, в трехмерный вид и возможности создания сеток, является помощником в медицине для быстрого создания имплантов, моделирования физиологических процессов и т.п. Также с **Simpleware** возможно изучение палеонтологии, современной флоры и фауны.

|  |
| --- |
| C:\Users\Анастасия\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\428426e63da67dcf12950a34593796ae.jpg |
| Рис.26. Пример проектирования сетчатой структуры в программе Simpleware |

**3.5.5. Materialise**

ПО для 3D печати. Применяется в инженерии и в медицине для прототипирования (Рис.27). Предлагается огромная библиотека единичных ячеек, которыми можно заполнить определенную область.

|  |
| --- |
| Снимок экрана (475) |
| Рис.27. Пример проектирования сетчатой структуры в программе Materialise |

**3.5.6. Оценка существующих программ**

Рассмотренные программы, разрабатываемые зарубежными компаниями, недоступны широкому кругу пользователей, достаточно дорогие и не находятся в открытом доступе. Кроме того, их невозможно интегрировать в другие программные комплексы, поэтому существует необходимость в разработке собственного программного компонента, способного интегрироваться в различные программные комплексы.

**4.Разработка программного комплекса**

**4.1.Проектирование основных алгоритмов**

Основной алгоритм состоит из нескольких блоков. (рис.28.) В качестве входных данных программа получает неявно заданную функцию, координаты вершин ограничивающего параллелепипеда, параметры сетчатой структуры (размер и тип элементраной ячейки). Тип неявно заданной функции – строка, следовательно, необходимо произвести парсинг, чтобы получить вид, пригодный для вычислений. Далее объем параллелепипеда разбивается на точки и для каждой точки определяется ее положение относительно объема, ограниченного НЗФ, и относительно будущей сетчатой структуры. На этом основывается алгоритм «Шагающих кубов», который строит полигональную модель. На последнем этапе полигональная модель записывается в STL-файл.

|  |
| --- |
| Парсинг НЗФ |
| Рис.28. Блок-схема основного алгоритма программы |

Рассмотрим подробнее опреденение положения точек (Рис.29). В основе способа лежит то, что значение функции в точке больше нуля, если точка лежит вне области, ограниченной функцией, и значение функции меньше нуля, если точка лежит внутри области. Таким образом, в точки, лежащие вне сетчатой структуры, будут записаны положительные значения, а в точки, лежащие внутри сетчатой структуры, - отрицательные значения. На основе этих данных алгоритм «Шагающих кубов» строит полигональную модель.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.29. Блок-схема алгоритма определения положения точки |

**4.2.Проектирование структур классов**

Для реализации возможности выбора типа ячеек используются возможности ООП. На диаграмме классов (Рис.30) изображен базовый класс UnitCell. Он имеет параметры type (тип const int) и A (тип double). А – масштабный коэффициент, необходимый для изменения размеров элементарной ячейки. Также класс UnitCell имеет виртуальную функцию Eval, которая возвращает значение функции, задающей тип элементарной ячейки, в точке с координатами X, Y, Z. От класса UnitCell наследуются 5 классов, каждый из которых соответствует одному типу элементарной ячейки. В наследуюмых классах происходит перегрузка функции Eval. Каждому типу элементарной ячейки присвоен номер от 0 до 4, записанный в переменную type.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.30. Диаграмма классов |

**5.Результаты работы программы**

**5.1.Общие результаты работы прораммного комплекса**

Результат работы программы – 3D модель сетчатой структуры, записанная в файл формата STL. После подготовки модели к печати в программе Netfabb и генерации управляющей программы для 3D принтера в программе KISSliser получаем модель, пригодную для изготовления на 3D принтере.

На рисунке 31 показана 3D модель решетки, полученная в результате работы программы. Тип элементраной ячейки – Гироид Шоэна, размер элементарной ячейки – 10 мм, область, которую необходимо заполнить сетчатой структурой, – параллелепипед с размерами 40х40х15 мм. На рисунке 32 – фотография этой же модели после печати на 3D принтере.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.31. 3D модель сетчатой структуры |
|  |
| Рис.32. Прототип детали, напечатанный на 3D принтере |

**5.2.Построение различных типов элементарных ячеек**

В программе реализована возможность построения пяти типов ячеек. На рисунках 33 - 37 показаны различные типы сетчатых структур, заполняющие куб с габаритами 40х40х40 мм, полученные в результате работы программы.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.33. Примитив Шварца, размер ячейки 6 мм |
|  |
| Рис.34. Урезанный примитив Шварца, размер ячейки 6 мм |
|  |
| Рис.35. Гироид Шоэна, размер ячейки 6 мм |
|  |
| Рис.36. W-решетка Шварца, размер ячейки 6 мм |
|  |
| Рис.37. Поверхность Неовиуса, размер ячейки 6 мм |

**5.3.Возможность заполнения сетчатыми структурами различные по форме фигуры**

В программном комплексе реализована возможность заполнения сетчатыми структурами различных по форме геометрических фигур, например, шар, куб, эллипсоид и другие. Для того, чтобы заполнить необходимый объем, его необходимо задать с помощью неявно заданной функцией вида f=f(x,y,z).

На рисунках 38-39 представлены различные георметрические тела, заполненные решеткой с типом элементарной ячейки – Гироид Шоэна.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.38. Сфера, заполненная сетчатой структурой |
|  |
| Рис.39. Эллипсоид, заполненный сетчатой структурой |

**5.4.Возможность изменения размера элементарной ячейки**

В программе реализована возможность изменять размер элементарной ячейки сетчатой структуры. Он вводится в программу в качестве одного из параметров.

На рисунке 40 показан куб с размерами 40х40х40мм, заполненный сетчатой структурой с типом элементарной ячейки – Гироид Шоэна и размером элементарной ячейки 5мм, 10мм, 15мм.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.40. Гироид Шоэна с размером элементарной ячейки 5мм, 10мм, 15мм |

**6. Заключение**

Написанная программа успешно заполняет объем, ограниченный неявной функцией, сетчатой структурой. Есть возможность выбора типа элементарной ячейки сетчатой структуры, а также изменения размера элементарной ячейки.

Задачи курсового проекта выполнены. Программа генерирует 3D модели, пригодные для изготовления на 3D принтере.

В качестве развития программного комплекса планируется:

1. Реализация возможности изменения объемной доли
2. Изменение ориентации решетки в пространстве
3. Произвести рефакторинг кода
4. Увеличить быстродействие программы
5. Уменьшить расход памяти

**7. Список литературы**

1. Raymont D.R. On the generation and characterisation of internal micro-architectures – 2011
2. Yan C., Hussein A., Young, P. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures – 2011
3. Azman A.H., Vignat, F., Villene F. Design Configurations and Creation of Lattice Structures for Metallic Additive Manufacturing – 2015
4. Nguyen J., Park S., Rosen D.W., Folgar L., Williams J. Conformal Lattice Structure Design and Fabrication – 2012
5. Макконнелл С., Совершенный код. Мастер-класс / Пер. с англ. — М.: Издательство «Русская редакция», 2010. — 896 с.
6. Страуструп Бьярне, Программирование: принципы и практика с использованием С++, 2-е изд.: Пер. с англ. - М.: ООО "И. Д. Вильяме", 2016. — 1328 с.