УДК 617.52-007.1-089.844

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ ЛИЦЕВОГО СКЕЛЕТА

В. П. Василюк*, Г. И. Штраубе, В. А. Четвертных

Пермская государственная медицинская академия им. ак. Е. А. Вагнера, г. Пермь, Россия

USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR RESTORATION OF FACIAL SKELETON DEFECTS

V. P. Vasilyuk*, G. I. Shtraube, V. A. Chetvertnykh

Perm State Academy of Medicine named after Academician E. A. Wagner, Perm, Russian Federation

Цель. Изучить и внедрить технологию визуализации трехмерных систем компьютерного моделирования (CAD-система) при изготовлении имплантатов, представляющих собой структуру ячеек из различных биосовместимых материалов (стали AISI 316L, порошкового титана ВТ-5 и других).

Материалы и методы. Изучены данные об ячейках Вигнера–Зейтца, представляющих собой область пространства с центром в некоторой точке решетки Браве. Ограниченная плоскостями область наименьшего объема будет являться ячейкой Вигнера–Зейтца. Имплантаты, имеющие ячеистую структуру (ячейка Вигнера–Зейтца), изготавливали из различных материалов: стали AISI 316L, порошкового материала – титан марки ВТ-5, пенистый полиуретан – фотополимер SI 500, применив инновационные технологии, позволяющие создать изделия, точно копирующие костные структуры лицевого скелета, состоящие из ячеек, имеющих правильную геометрическую форму.

Результаты. По инновационной технологии получены имплантаты, которые представляют собой цилиндр, повторяющий форму нижней челюсти, изготовленный из стали AISI 316L, порошкового титана ВТ-5, пенистого полиуретана – фотополимера SI 500, со сложной геометрической структурой в виде проникающих ячеек Вигнера–Зейтца, фиксацию которого к кости нижней челюсти проводили с помощью 4 титановых шурупов типа саморез по два с каждой стороны (патент на изобретение № 2469682, 2012).

Выводы. Технология трехмерных систем и SLS является этапным прорывом в визуализации, что позволяет внедрять ее в различные сферы науки, в том числе и в сферу медицины, в частности, в имплантологию. Образование костной ткани в ячеистой структуре имплантата благодаря использованию препаратов, ускоряющих остеогенез, в кратчайшие сроки значительно улучшает восстановление дефектов лицевого скелета.

Ключевые слова. Имплантаты, имплантаты со структурой Вигнера–Зейтца, компьютерное моделирование, SLS.

Aim. To study and introduce the technology of three-dimension imaging systems of computer modeling (CAD-system) when producing implants which represent a structure of cells from different biocompatible materials (steel, AISI 316L, powder titanium VT-5 and others).

Materials and methods. The work is based on the data regarding Wigner–Seitz cells representing a space with a center in some point of Bravais lattice. The minimum volume area limited by planes will be a Wigner–

© Василюк В. П., Штраубе Г. И., Четвертных В. А., 2013

e-mail: rector@psma.ru

тел. 8 902 647 60 00

[Василюк В. П. (*контактное лицо) – кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии; Штраубе Г. И. – доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии; Четвертных В. А. – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой гистологии, эмбриологии и цитологии].

Seitz cell. Implants with cellular structure (Wigner–Seitz cell) were produced from different materials such as steel AISI 316L, powder material – titanium VT-5, foamy polyurethane – photopolymer SI 500 using innovative technologies which permit to create the products exactly copying facial skeleton bone structures consisting of cells with a regular geometrical form.

Results. Implants which represent a cylinder repeating the form of the lower jaw manufactured from steel AISI 316L, powder titanium VT-5, foamy polyurethane - photopolymer SI 500 with complicated geometric structure in the form of penetrating Wigner–Seitz cells fixed to the lower jaw by means of 4 titanium screws, two from each side, (Patent invention № 2469682, 2012) were produces by innovative technology.

Conclusion. Three-dimension system technology, SLS technology, is an important step forward in visualization that allows to introduce it into different spheres of science including the sphere of medicine and implantology, in particular. Formation of bone tissue in the cellular structure of an implant using osteogenesis-accelerating preparations at the earliest possible terms significantly improves restoration of facial skeleton defects.

Key words. Implants, implants with Wigner- Seitz structure, computer modeling, SLS.

Введение

Эстетические и функциональные нарушения зубочелюстной системы неоднозначно воспринимаются больными, что диктует необходимость не только совершенствования и разработки новых методов лечения, но и поиска материалов для замещения дефектов и устранения деформаций лица [8]. Одной из сложных задач реконструктивной медицины остается замещение костных дефектов человека – лицевого скелета особенно. В настоящее время существует достаточное количество методик, применяемых в восстановительно-реконструктивной хирургии, используются ауто-, аллопластические и имплантационные материалы [2, 6, 9]. Однако проведенные клинические наблюдения свидетельствуют о серьезных недостатках при их использовании, в частности, забор аутотрансплантата сопряжен с дополнительной травмой и не всегда обеспечивает возможность восстановить анатомическую форму челюсти или ее фрагмента. При применении аллотрансплантата возможны тканевая несовместимость, отсутствие банка тканей, рассасывание аллогенного трансплантата [4, 5].

В связи с этим интерес к разработке имплантатов из различных материалов, применению инновационных технологий в восстановлении зубочелюстной системы значительно вырос. Особое значение приобретают технологические достижения мировой науки, которые могут быть востребованы в медицинской практике [7].

Назрела потребность в альтернативном, более наглядном способе отображения трехмерной информации, так как визуализация трехмерных данных в виде ручного макетирования является устаревшим методом. Имплантация предполагает замещение пораженных тканей организма чужеродным материалом, что порой вызывает негативные последствия – отторжение.

Все известные на сегодняшний день имплантационные материалы относятся к группе кондуктивных, так как в них не содержится остеогенных клеток. В процессе функционирования организма данные материалы отторгаются или ведут себя подобно инородным телам в связи с отсутствием явления эффекта запаздывания при нагрузке и разгрузке [5, 10]. К примеру, такие материалы, как пористый титан, пористый и непористый никелид титана, обладают отличной коррозионной устойчивостью и нетоксичностью, однако при их применении наблюдалось реактивное периостальное образование кости в прилегающих областях и отсутствовало формирование костной ткани в мелких порах имплантата [8].

Безусловно, главным условием лечения будет быстрое вживление имплантируемого

и трансплантируемого изделия, не вызывающего общей или местной реакции организма. На наш взгляд, положительному результату будет способствовать не только вид материала, но и форма и структура имплантата. Разработка технологии получения остеогенной ткани в ячеистой структуре имплантата из биосовместимых материалов с препаратами, ускоряющими репаративный остеогенез в области дефекта костной ткани, безусловно, актуальна.

Существуют различные технологии послойного воспроизведения, основанные на методе визуализации трехмерных данных. К ним относятся:

– стереолитография (Stereolithoqraphy, SLA);

– избирательное лазерное спекание (Selective Laser Sinterinq, SLA);

– создание объектов из пленок (Laminated Object Manufacturinq, LOM);

– моделирование распределением расплава (Fused Deposition Modelinq, FDM) и др.

Прорывом в технологии визуализации стало появление трехмерных систем компьютерного проектирования (CAD-система), а появившиеся системы быстрого изготовления прототипов, имеющих различную форму и структуру, явились логическим продолжением трехмерных систем компьютерного дизайна [3].

Цели работы – изучить и внедрить технологию визуализации трехмерных систем компьютерного моделирования (CAD-система) при изготовлении имплантатов, представляющих собой структуру ячеек из различных биосовместимых материалов (стали AISI 316L, порошкового титана ВТ-5 и других); провести комплексное изучение возможности использования изделий с ячеистой структурой в замещении костных дефектов лицевого черепа, получения остеогенной ткани в ячеистой структуре имплантата в эксперименте. Разработать и испытать метод жесткой фиксации имплантатов с костью.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на кафедре хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии под руководством д-ра мед. наук Г. И. Штраубе и на базе механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета под руководством д-ра техн. наук, профессора А. М. Ханова.

Изучены данные об ячейках Вигнера–Зейтца, представляющих собой область пространства с центром в некоторой точке решетки Браве, которая лежит ближе к этой точке решетки, чем к какой-либо другой точке. Ограниченная плоскостями область наименьшего объема будет являться ячейкой Вигнера–Зейтца [1]. Ячейки имеют различное строение: гранецентрированное кубическое, двухмерное и т. д. (рис. 1, *а*, *б*). Наибольший интерес представляет гранецентрированная кубическая ячейка Вигнера–Зейтца для создания имплантатов, имеющих данную структуру, с применением технологии прототипирования для того, чтобы достичь наиболее ранней остеоинтеграции, стимулируя пролиферацию остеобластов, тем самым ускоряя рост кости.

В работе нами использована внедренная на кафедре конструирования машин и сопротивления материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор А. М. Ханов) современная технология визуализации трехмерных систем компьютерного моделирования (CAD-система) при изготовлении изделий из различных материалов, имеющих ячеистую структуру. Для изготовления имплантата со структурой ячеек Вигнера–Зейтца применили процесс избирательного лазерного спекания (Selective Laser Sinterinq – SLA), который во многом аналогичен стереолитографии. Отличие состоит в том,

что в используемом строительном материале содержатся металлические порошки с полимерным покрытием (порошковый титан). Для работы с металлическими порошками использовали машину EOSINT M 250X. В системе применяли газовый (CO_2) лазер мощностью 200 Вт. Генерируемые таким образом металлические модели значительно более прочные и плотные и в дальнейшей обработке не нуждались [3]. Создание имплантатов, имеющих ячеистую структуру, должно способствовать свободному прорастанию костной ткани в ячейки, которые выдерживают значительную функциональную нагрузку, что позволит говорить об альтернативном направлении реконструктивно-восстановительной хирургии.

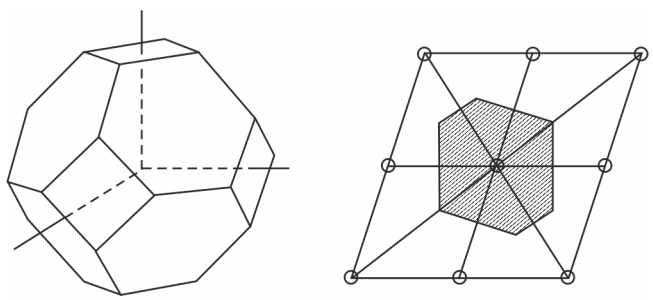


Рис. 1. Ячейка Вигнера–Зейтца:
а – для гранецентрированной кубической решетки кристалла;
б – двухмерной решетки

Имплантаты, имеющие ячеистую структуру (ячейка Вигнера–Зейтца), изготавливали из различных материалов: стали AISI 316L, порошкового материала –титана марки ВТ-5, а также пенистого полиуретана – фотополимера SI 500. Применили инновационные технологии, позволяющие создать изделия, точно копирующие костные структуры лицевого скелета, состоящие из ячеек правильной геометрической формы.

На первом этапе изготовления имплантатов с ячеистой структурой использовали аустенитную сталь AISI 316L. Данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью в средах повышенной агрессивности, имеет жаростойкость до 600°, высочайшую пластичность. AISI 316L легко штампуется, сваривается без ограничений, немагнитная. Используется в аппаратах и сосудах, работающих в растворах фосфорной, серной, борной, муравьиной, уксусной, молочной щавелевой и других кислот. Успешно применяется в химической, пищевой, медицинской, нефтегазовой и других видах промышленности.

Задачи экспериментального исследования включали:

– разработку и внедрение программы компьютерного моделирования имплантатов по данным компьютерной томографии;

– изучение и использование технологии визуализации трехмерных систем компьютерного моделирования (CAD-система) при изготовлении имплантатов из различных материалов (порошкового титана, стали AISI 316L, фотополимера SI 500 и т.д.), построенных по принципу ячейки Вигнера–Зейтца;

– изучение возможности использования изделий (имплантатов) с ячеистой структурой в замещении костных дефектов лицевого черепа;

– получение остеогенной ткани в ячеистой структуре имплантата в эксперименте;

– разработку новых (не имеющих аналогов) методов фиксации имплантата с концевым фрагментом челюсти;

– проведение испытаний на жесткость с изучением биомеханических свойств ячеистой структуры имплантатов;

– изучение на животных реакции костной ткани на имплантаты с ячеистой структурой, состояния окружающих тканей и лимфатических узлов;

– изучение использования препаратов, повышающих репаративный остеогенез костной ткани животных, в эксперименте.

Результаты и их обсуждение

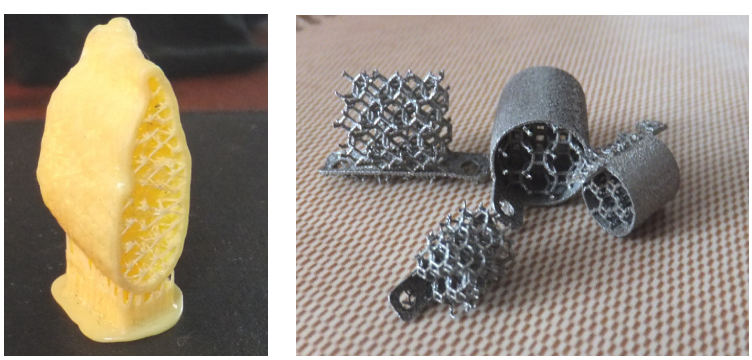
Одним из сложных этапов в технологии визуализации является проектирование модели имплантата, генерирование фотореалистичного изображения, требующего достаточной вычислительной мощности, позволяющего в считанные секунды изготовить физическую модель.

На первом этапе разработали программу компьютерного исследования нижней челюсти, которая заключалась в создании цифрового трехмерного 3D-изображения. Полученное трехмерное изображение подвергли своеобразной «шлифовке» – удалению «помех» (ненужных деталей, возникших в процессе цифрового перевода).

На следующем этапе удаляли пораженный участок кости. Для его восстановления проводили компьютерное моделирование будущего имплантата, который представляет собой цилиндр, повторяющий форму нижней челюсти, со сложной геометрической структурой в виде ячеек Вигнера–Зейтца, с элементами фиксации к кости нижней челюсти.

После проведенного компьютерного моделирования для создания образца имплантата из фотополимера SI 500 на машине EOSINT M 250X (Технологический институт, Джорджия, США) использовали систему быстрого прототипирования Envision Tec Perfactory Xed. Скорость сканирования достигала 3 м/с, что обеспечивало скорость спекания от 2 до 15 мм^3/с (в зависимости от материала).

В результате применения данной технологии нами получены имплантаты, которые представляют собой цилиндр, повторяющий форму нижней челюсти, изготовленный из стали AISI 316L, порошкового титана ВТ-5, пенистого полиуретана – фотополимера SI 500 со сложной геометрической структурой в виде проникающих ячеек Вигнера–Зейтца. Фиксацию имплантатов к кости нижней челюсти производили с помощью 4 титановых шурупов типа саморез по два с каждой стороны, (рис. 2, *а*, *б*) (патент на изобретение № 2469682, 2012).



а *б*

Рис. 2. Имплантат: а – из пенистого полиуретана с ячеистой структурой, повторяющий анатомическую форму нижней челюсти; б – из стали AISI 316L, со сложной геометрической структурой в виде ячеек Вигнера–Зейтца

Выводы

В ходе изучения материала и решения проблемы, связанной с задачами замещения костных дефектов, было установлено, что:

– современная CAD-система при достаточной вычислительной мощности способна генерировать фотореалистичное изображение на основе готовой трехмерной модели, время визуализации – всего несколько секунд;

– программное обеспечение позволяет непосредственно изготовить твердую копию компьютерной модели любого трехмерного объекта независимо от его геометрической сложности (имплантат любой формы и сложности);

– в технологии избирательного лазерного спекания (SLS) применен значительно более мощный лазер, что позволяет оплавлять металлические частички без использования полимерных покрытий;

– технология избирательного лазерного спекания (SLS) позволяет воспроизвести любой имплантат, состоящий из ячеек Вигнера–Зейтца, с высокой степенью точности. При этом он повторяет форму замещаемого органа и не требует дополнительной обработки;

– инновационная технология трехмерных систем компьютерного проектирования, технологии избирательного лазерного спекания (SLS) являются этапным прорывом в области визуализации, что позволяет внедрять их в различные сферы науки, в том числе и в сферу медицины, в частности, в имплантологию;

– образование костной ткани в ячеистой структуре имплантата благодаря использованию препаратов, ускоряющих остеогенез, значительно улучшает восстановление дефектов лицевого скелета.

Библиографический список

1. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела. М.: Мир 1979; 1.
2. *Заричанский В.А.* Применение полимерных имплантатов в реконструктивно-восстановительной хирургии лица. Юбилейный сборник работ, посвященный 60-летию кафедр госпитальной хирургии и госпитальной хирургической стоматологии. М. 1998; II: 68–89.
3. *Кузнецов В.* Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения. Металлургические новости 2003. 3: 2–7.
4. *Семкин В.А., Шамсудинов А.Г., Лишев И.Н.* Результаты использования силовых титановых пластин для замещения дефектов нижней челюсти. Актуальные проблемы стоматологии: тез. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. (Москва, 23–30 марта 2000 г.). М. 2000; 135–137.
5. *Сысолятин П.Г., Гюнтер В.Э., Сысолятин С.П. и др.* Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии. Томск: Изд-во МИЦ 2012; 4: 384.
6. *Сысолятин П.Г., Сысолятин С.П.* Новые технологии лечения переломов скуло-орбито-верхнеглазничного комплекса. Труды VI Стоматологической ассоциации России (Москва, 11–14 сентября 2000 г.). М. 2000; 346–348.
7. *Топольницкий О.З., Дьякова С.В., Ульянова С.А. и др.* Применение искусственной костной ткани при реконструктивно-восстановительных операциях на нижней челюсти детей. Материалы V Междунар. конф. челюстно-лицевых хирургов и стоматологов. СПб. 2000; 127.
8. *Штраубе Г.И.* Применение имплантатов из углерода в челюстно-лицевой хирурги: дис. ... д-ра мед. наук. Пермь 2001; 33.
9. *Angermann P.* Kommercielt tilgatngelige erstatninger for knogletransplanter fra mennesker [Commercially available substituter for transplants of human bone]. Ugeskr. Laeger. 1992; 154: 333–336.
10. *Pagni G., Kaigler D., Rasperini G. et al.* Bone repair cells for craniofacial regeneration. Adv. Drug. Delivery. Rev. 2012; 64 (12): 1310–1319.

Материал поступил в редакцию 16.04.2013