

Оригинал статьи *“How Topology Optimization Could Be The Key To Longer-Lasting Hip Implants”* на английском языке можно найти на сайте журнала *“Additive Manufacturing”* (www.additivemanufacturing.media).

Оптимизация топологии может стать ключевым фактором для продления срока службы эндопротезов тазобедренного сустава

Stephanie Hendrixson, старший редактор *“Additive Manufacturing”* ©2019 Gardner Business Media, Inc.



Ножки эндопротезов тазобедренных суставов должны выдерживать механические нагрузки, соответствующие стилю жизни пациента, но не должны создавать в кости эффект экранирования напряжений (что выражается в уменьшении костной плотности вблизи протеза в качестве ответной реакции на уменьшение региональных напряжений в кости), то есть не быть слишком жесткими. Для получения имплантов, соответствующих обоим этим требованиям, команда сотрудников компании *Altair* использовала средства численного моделирования и оптимизации топологии, а также 3D-металлопечать.

Обычные импланты, применяемые в хирургии при полной замене тазобедренного сустава, рассчитаны, как правило, на 20 лет – при условии, что нагрузка на них будет легкой, так как пациент в основном будет только стоять и ходить. Но сейчас пациенты всё чаще требуют от своих эндопротезов большего. Возраст кандидатов на замену

тазобедренных суставов становится меньше, и при этом они ведут более активную жизнь, включающую езду на велосипеде, плавание, пробежки и даже альпинизм. Чтобы предоставить таким необычным пациентам подходящие импланты, подход к их конструированию и производству тоже должен быть необычным.

Помочь в этом деле может аддитивное производство (*Additive Manufacturing, AM*). Для изготовления титановых имплантов 3D-металлопечать используется уже, по меньшей мере, десятилетие, предоставляя возможность регулировать размер и форму импланта, а также его жесткость, пористость и другие характеристики. 3D-печатные импланты имеют ячеистую структуру и текстурированные поверхности, которые позволяют кости лучше расти, что помогает пациентам быстрее встать на ноги и обеспечивает надежную службу имплантов в течение длительного срока.

Но теперь *AM* предоставляет еще одно потенциальное преимущество – возможность кастомизировать импланты под конкретные ожидаемые нагрузки. Сочетание средств оптимизации топологии и возможностей аддитивного производства позволяет индивидуально создавать для каждого пациента более удобные, более подходящие им тазобедренные суставы, которые будут служить дольше.

В недавнем исследовании компании *Altair* её программные инструменты симуляции были задействованы для создания методологии проектирования эндопротезов тазобедренного сустава, воплощающей эти идеи на практике.

Симуляция как инструмент конструирования

Команда сотрудников *Altair* в составе *Yuhao He, Drew Burkhalter, David Durocher* и *Mak J. Gilbert* применила ПО этой компании для разработки и усовершенствования ножки эндопротеза тазобедренного сустава и представила свои находки на конференции *Design of Medical Devices 2018*. При проектировании созданного ими 3D-печатного импланта были использованы принципы оптимизации топологии: при таком подходе определяется общее пространство конструкции, которое затем рационально заполняется так, чтобы точнее соответствовать требованиям по нагрузке [в разных зонах], весу и др. В совокупности с производственными



Так выглядит традиционный эндопротез тазобедренного сустава



Ножка эндопротеза тазобедренного сустава должна быть достаточно прочной, чтобы долгое время выдерживать механические нагрузки, соответствующие стилю жизни пациента, но не слишком жесткой, чтобы не создавать эффект экранирования напряжений. Команда инженеров Altair оптимизировала титановый имплант, используя сочетание возможностей CAE, оптимизации топологии и 3D-металлопечати. Этот имплант был продемонстрирован на выставке Formnext 2018

Топологическая оптимизация ножки эндопротеза

При перепроектировании обычного эндопротеза тазобедренного сустава инженеры *Altair* нацелились на создание метода, который позволит достичь двух целей. Во-первых, имплант должен длительное время выдерживать механические нагрузки, соответствующие телу и жизненному стилю пациента. Но еще он должен удовлетворять требованиям биосовместимости, чтобы обеспечивать правильный контакт с костью пациента, минимизирующий вышеупомянутый эффект экранирования напряжений. Лучший сценарий – правильная комбинация достаточного запаса прочности с ограничением жесткости, чтобы имитировать натуральную кость.

В рамках данного тематического исследования команда решила разработать такую ножку эндопротеза, которая выдерживает нагрузки, необходимые для того, чтобы у пациента была возможность:

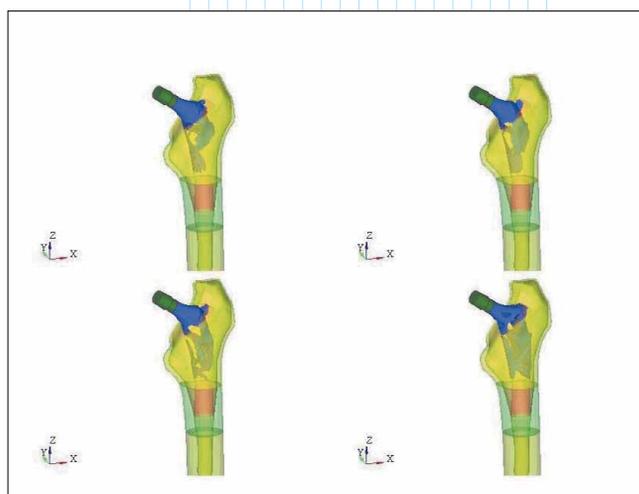
- вставать из сидячего положения;
- стоять;
- подниматься по ступенькам;
- совершать пробежки.

Кроме того, предусматривались и комбинированные нагрузки.

Для всех этих условий инженеры симулировали поведение кости бедра (здоровой и с обычным титановым имплантом), изучая то, как изменяется распределение нагрузки, энергия упругой деформации и экранирование напряжений. Эти данные помогли им оптимизировать новую конструкцию так, чтобы распределение нагрузки и деформация больше соответствовали естественной кости, а эффект экранирования напряжений уменьшился по сравнению с обычным имплантом.

возможностями 3D-печати это позволяет деталям с оптимизированной топологией иметь органическую форму и включать в себя ячеистые структуры, в отличие от привычных прямолинейных сплошных деталей. Обычно они весят меньше, чем их традиционные аналоги, поскольку материал в них использовался рационально.

Но чтобы гарантировать, что детали с оптимизированной топологией будут соответствовать требованиям эксплуатации, первым делом надо уметь определить эти требования. Для этого компания *Altair* разработала набор программных инструментов в составе комплекта *Inspire*, обеспечивающих симуляцию поведения [уже существующих] деталей при ожидаемых нагрузках – отдельно и в сборке. Пользователи могут видеть, как заданная геометрия и материал взаимодействуют с ближайшим окружением и выдерживают предполагаемое использование; собранная информация может затем послужить для оптимизации топологии. То есть, это ПО помогает смоделировать эксплуатацию существующей детали, чтобы собрать информацию о нагрузках, а затем передать её в итеративный процесс генерации и проверки вариантов конструкции, чтобы видеть, как изменения конструкции влияют на её характеристики. Это рекурсивный процесс, в котором численное моделирование применяется не просто для тестирования окончательного варианта, но как инструмент конструирования.



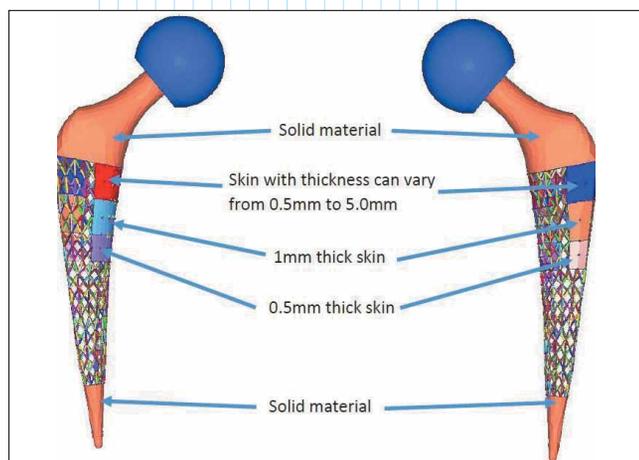
Инженеры протестировали импланты с разным объемом фракции и с производственными ограничениями, чтобы определить сплошные и решетчатые участки. Для этого они выявляли общие элементы топологии

При создании импланта с оптимизированной топологией 3D-модель обычного импланта использовалась как конструктивное пространство, обеспечивающее соответствие результата и кости бедра человека, а также совместимость с современными хирургическими инструментами. Кроме того, инженеры задали ограничения для приложения генеративного проектирования, чтобы контролировать распределение деформаций в оптимизированном импланте и изменение объема его фракций, ограничив его значениями 10, 20 или 30 процентов от общего объема конструктивного пространства для различных проверок.

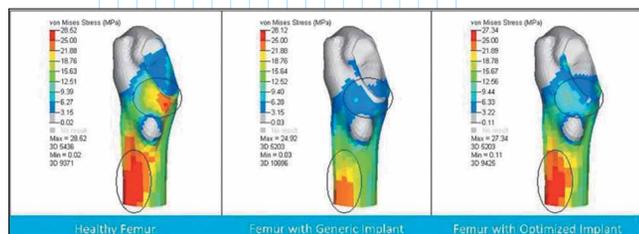


Ячейка решетки состоит из элементов с наклоном менее 45 градусов, что обеспечивает возможность их 3D-печати без опор. Размеры ячеек в разных зонах варьируются в диапазоне от 4 до 7 мм

И, наконец, спектр допустимых конструкций был ограничен тем, что можно получить из титанового порошка методом селективного лазерного наплавления (*Selective Laser Melting, SLM*) на 3D-принтере от EOS.



Окончательная конструкция состоит из зон сплошного материала на шейке и в нижней части импланта. Решетка заполняет среднюю часть со сплошной стенкой переменной толщины в середине



Симуляция кости бедра с оптимизированным имплантом продемонстрировала картину нагрузок, которые близко соответствуют неповрежденной кости. В сравнении с обычным имплантом с оптимизированной топологией более чем на 50% снижает эффект экранирования напряжений

В результате оптимизации топологии были определены сплошные и полуплотные области импланта, после чего команда инженеров использовала приложение *OptiStruct* от *Altair*, чтобы заполнить последние ячейки структурами. На них накладывались ограничения по необходимой усталостной прочности и минимизации общего объема, чтобы ускорить производство.

Выбранная для создания решетчатых зон ячейка состоит из элементов, которые соединяют 8 углов кубика с центрами четырех воображаемых вертикальных граней и с центром кубика. Поскольку

было намечено печатать имплант вертикально, угол наклона элементов решетки здесь немного меньше 45 градусов, что делает возможной 3D-печать без опор. Размер ячейки варьируется в диапазоне 4÷7 мм; оптимизация помогла определить диаметр каждого элемента решетки и связи.

Окончательная конструкция импланта состоит из зон сплошного материала на шейке и нижней части, где рост кости может вызвать у пациента боль, а решетка переменного размера заполняет среднюю часть – местами с твердой оболочкой, чтобы соответствовать требованиям по усталостной прочности.

Затем инженеры оптимизировали топологию импланта путем симуляции нагрузок для разных случаев, чтобы сравнить его характеристики с неповрежденной бедренной костью и с обычным имплантом. Они обнаружили, что эффект экранирования напряжений у оптимизированного импланта уменьшился, по сравнению с обычным, при всех нагрузках – в среднем на 50.7% для всех пяти вариантов. Нагрузка на кость оставалась ниже 575 MPa для всех вариантов нагрузок; для исследуемого сплава титана это означало бы предел выносливости выше 10 миллионов циклов нагружения.

В краткосрочной перспективе управляемый симуляцией метод проектирования поможет уменьшить эффект экранирования напряжений в универсальных или стандартных медицинских имплантах. В долговременной перспективе можно будет, используя такой подход, проектировать индивидуальные импланты, адаптированные в соответствии с геометрией и характеристиками кости бедра пациента, а также его образом жизни. Применение 3D-печати в качестве способа производства позволит изготавливать такие индивидуальные импланты столь же быстро и экономически эффективно, как и стандартные. 👁