

оптимизации: эволюционная структурная оптимизация, метод плотности и метод гомогенизации. При использовании метода плотности область оптимизации разбивается на конечные элементы, каждому из которых в конечной оптимизированной топологии может соответствовать нулевое значение безразмерной плотности $\rho = 0$ (отсутствие материала) или единичное значение плотности $\rho = 1$ (наличие материала). В результате решения задачи оптимизации плотность распределяется таким образом, чтобы минимизировать податливость конструкции при ограничении верхнего предела массы, например, 50 % от исходного значения. Расчетное распределение плотности помимо значений 0 и 1 может содержать промежуточные значения, которые не могут быть интерпретированы при изготовлении изделия из сплошного материала. Для устранения промежуточных значений плотности используют такие приемы как проецирование плотности и пороговая классификация.

В данной работе описана методика топологической оптимизации пластин для остеосинтеза с применением программы COMSOL Multiphysics. Проведен сравнительный анализ характеристик (продольной жесткости, массы и максимального напряжения по Мизесу) базовой конструкции пластины и двух оптимизированных вариантов, полученных при различных значениях порога классификации расчетных значений плотности. В целях сравнительного анализа характеристик базовой конструкции пластины и двух оптимизированных вариантов проводился статический анализ всех трех вариантов конструкции. Граничные условия, нагрузки, свойства материала и параметры конечно-элементной сетки сохранялись такими же, как и при топологической оптимизации. Качественно оптимизированная топология пластин согласуется с результатами, полученными другими исследователями. Показано, что оптимизированные варианты конструкции обеспечивают снижение массы пластины на 49–54 %, а продольной жесткости – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения снижения степени экранирования напряжений (разгрузка кости от действия нормальных физиологических напряжений, вызванная высокой жесткостью крепежных пластин и приводящая к снижению минеральной плотности и прочности костной ткани). Максимальное напряжение по Мизесу повышается для оптимизированных конструкций на 19–27 % по сравнению с базовой, что не является критичным при наличии достаточного запаса прочности у исходной конструкции. Оптимизированные варианты конструкции различаются по характеру деформаций и поэтому должны быть дополнительно исследованы с точки зрения клинической эффективности.

УДК 616.71-089.844:616-77

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

Студенты гр. 11307121 Билейчик А. А., Охремчик В. А.

Д-р техн. наук, доцент Степаненко Д. А., кандидат техн. наук, доцент Филонова М. И.
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Металлические имплантаты широко используются для временной фиксации отломков костей при переломах и постоянного замещения дефектов костной ткани (при резекции пораженных заболеваниями участков костей). Современные пациент-специфические имплантаты проектируются и изготавливаются с учетом особенностей анатомии индивидуально взятого пациента. Они обычно имеют сложную геометрическую форму и пористую структуру, упрощающую интеграцию с костной тканью, что делает сложным или невозможным их изготовление традиционными методами, основанными на удалении материала с заготовки. В связи с этим сложные металлические имплантаты в настоящее время изготавливают с помощью аддитивных производственных технологий (АПТ), таких как лазерное и электронно-лучевое плавление в заранее сформированном слое (laser and electron beam powder-bed fusion, LPBF and EPBF), 3D-печать с прямым подводом энергии и материала (directed energy deposition, DED) и 3D-печать с использованием связующего вещества (binder jetting). Все эти технологии имеют свои достоинства и недостатки с точки зрения производительности, спектра используемых материалов, уровня остаточных напряжений и других факторов. В качестве материала используют порошки из биосовместимых сплавов, таких как титановые, танталовые, кобальт-хромовые и магниевые сплавы, легированные

стали и интеллектуальные материалы (нитинол). Для достижения оптимальных механических свойств изделий их проектируют с использованием методов топологической оптимизации, позволяющих установить наиболее рациональное распределение материала в изделии с точки зрения прочности, жесткости и других параметров. В итоге топологической оптимизации обычно получают изделия сложной геометрической формы, что является дополнительным аргументом в пользу применения АПТ. Оптимизации могут подвергаться как форма изделия, так и структура материала. АПТ позволяют изготавливать изделия из материалов с пористой структурой, которая может быть стохастической или регулярной. Регулярные структуры могут быть решеточными, либо строиться на основе трижды-периодических минимальных поверхностей. Структурирование материалов позволяет имитировать структуру костной ткани и создавать облегченные конструкции с высокими прочностью и способностью к остеоинтеграции. Преимущество таких материалов также состоит в возможности управления их упругими свойствами и их согласования со свойствами костной ткани. Разновидностью структурированных материалов являются ауксеттики, обладающие отрицательным коэффициентом Пуассона, чрезвычайно редко наблюдаемым в природных материалах. В качестве примера использования ауксетиков можно привести ножку протеза тазобедренного сустава. Так как ножка испытывает изгибную деформацию, то одна из ее боковых поверхностей подвергается растяжению, а вторая – сжатию. При использовании материала с положительным коэффициентом Пуассона на одной из боковых поверхностей будет наблюдаться положительная деформация материала в направлении нормали к границе его раздела с костной тканью, а на другой – отрицательная, что может приводить к отрыву имплантата от костной ткани. Если одна половина ножки изготовлена из нормального материала, а вторая – из ауксетика, то на обеих боковых поверхностях будет наблюдаться положительная деформация. АПТ позволяют создавать имплантаты из функционально-градиентных материалов (ФГМ), характеризующихся управляемым пространственным изменением физико-механических свойств, достигаемым путем изменения состава и размера и формы ячеек материала. Использование ФГМ позволяет удовлетворить взаимно-противоречащие требования к свойствам материала. Например, увеличение пористости повышает способность к остеоинтеграции, однако приводит к снижению прочности и жесткости. Использование ФГМ с радиальным градиентом пористости, характеризующимся ее снижением в центре изделия, позволяет обеспечить высокую способность к остеоинтеграции в сочетании с высокими прочностью и жесткостью.

УДК 621.384

РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ОРИЕНТАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Младший научный сотрудник ЛИДПИ, СОиН Петрухин М. В.
Д-р техн. наук, профессор Матвеев В. В.
Тульский государственный университет, Тула, Россия

Одной из функций МКА является ориентирование по определенным направлениям, например на солнце. В связи с этим целью работы является разработка оптико-электронного прибора ориентации космического аппарата.

Для достижения поставленной цели была предложена оптико-электронная система ориентации космического аппарата, с использованием современной микросистемной техники, а так же изготовлен макетный образец МКА.

Оптическая система прибора размещается внутри обтекателя – концентрической линзы, выполняющей функции герметизирующего элемента. Ее внешний радиус уточняется при проектировании. Предполагается, что линза имеет размеры больше полусферы.

Оптическая система состоит из двух каналов. Излучение от Солнца в основном канале последовательно проходит объектив и попадает на прямоугольную призму с зеркальным покрытием на гранях, составляющих прямой угол. Ребро, образованное пересечением этих граней, устанавливается на оптической оси входного объектива в его фокальной плоскости перпендикулярно направлению сканирования. Световой пучок расщепляется гранью призмы на два пучка, попадающие на зеркала. После отражения от зеркал пучки падают через конденсоры на фотоэлементы. Сигналы фотоэлементов оцифровываются АЦП и подаются на контроллер. Контроллер