

УДК 517.97:615.47

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

Степаненко Д.А., Мудинов И., Билейчик А.А., Охремчик В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описана методика топологической оптимизации конструкций фиксирующих пластин, применяемых в травматологии для экстремедулярного остеосинтеза, с использованием программы *COMSOL Multiphysics*. Оптимизированные варианты конструкции обеспечивают снижение массы пластины на 49–54 %, а продольной жесткости – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения минимизации явления экранирования напряжений. Для проверки полученных теоретических результатов и проведения экспериментальных исследований изготовлены опытные образцы пластин из стали *AISI 430 (12X17)*.

Ключевые слова: остеосинтез, переломы костей, фиксирующие пластины, топологическая оптимизация, эффект экранирования напряжений.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF BONE PLATES FOR OSTEOSYNTHESIS

Stepanenko D.A., Mudinov I., Bileichyk H.A., Akhremchik V.A.

*Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article describes methodology of topological optimization for design of bone plates used in traumatology for extramedullary osteosynthesis based on application of *COMSOL Multiphysics* software. Optimized variants of design enable mass reduction up to 49–54 % and reduction of longitudinal stiffness up to 43–53 %, which is a positive effect for minimization of stress shielding phenomenon. For verification of the obtained theoretical results and implementation of experimental studies prototypes of plates were manufactured from *AISI 430 steel*.

Key words: osteosynthesis, bone fractures, fixation plates, topology optimization, stress shielding effect.

*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Переломы костей являются одним из самых распространенных видов травм. Существующие методы их лечения можно разделить на консервативные, например, наложение гипсовых повязок после закрытой репозиции костных отломков, и хирургические. Разновидностью хирургических методов является накостный (экстремедулярный) остеосинтез, при котором отломки фиксируются в правильном взаимном положении, достигнутом путем репозиции, с помощью пластин-фиксаторов, соединяемых с костью шурупами или винтами.

В настоящее время для создания оптимальных конструкций ортопедических имплантатов широко используется метод топологической оптимизации. В отличие от оптимизации формы, в которой возможные варианты конструкции формируются из исходного путем деформации существующих границ, топологическая оптимизация допускает формирование новых границ, например, отверстий в изначально сплошном материале, то есть допускает изменение топологии. Результатом топологической оптимизации обычно является создание облегченной по массе конструкции изделия, не уступающей по своим характеристикам базовой конструкции из сплошного материала. Существует несколько подходов к решению задач топологической 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 $\theta = 0$ (отсутствие материала) или единичное значение плотности $\theta = 1$ (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 физически реализованы при изготовлении изделия из сплошного материала. Для устранения промежуточных значений плотности используют такие приемы как проецирование плотности и бинарная классификация.

В данной работе предложена 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 (прямоугольной пластины с крепежными отверстиями) и двух оптимизированных вариантов, полученных при различных

значениях порога классификации расчетных значений плотности. Положение и форма крепежных отверстий в процессе оптимизации сохранялись неизменными за счет создания вокруг них кольцевых областей с предписанным значением плотности $\theta = 1$. 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 [1; 2].

В результате оптимизации было получено расчетное распределение плотности θ_r (значение плотности после штрафования (пенализации) промежуточных значений), представленное на рисунке 1.



Рисунок 1 – Расчетное распределение плотности

Для получения физически реализуемой топологии пластины необходимо избавиться от элементов, для которых плотность принимает значения $0 < \theta_r < 1$. Для этого расчетное распределение плотности было линейным образом преобразовано в полутоновое графическое изображение в формате BMP с уровнями интенсивности от 0 до 255, соответствующими изменению плотности от 1 до 0. Затем была выполнена бинарная классификация изображения с помощью программы MathCad. В зависимости от выбранного порога классификации были получены два варианта топологии (рисунок 2).

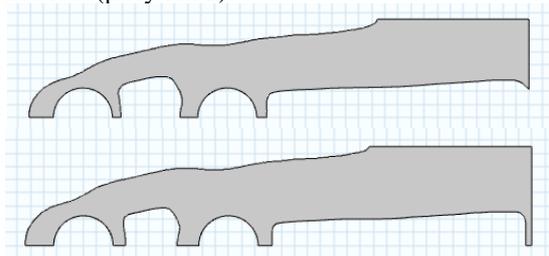


Рисунок 2 – Варианты топологии пластины

В первом случае пороговое значение интенсивности было принято равным 50, а во втором – 200.

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.

Для проверки полученных теоретических результатов и проведения экспериментальных исследований были с помощью метода лазерной резки изготовлены опытные образцы из стали AISI 430 (12X17) (рисунок 3).



Рисунок 3 – Опытные образцы пластин

Сверху представлен базовый вариант конструкции, внизу – оптимизированная конструкция.

В дальнейших исследованиях планируются экспериментальное изучение характеристик изготовленных опытных образцов, а также проведение топологической оптимизации пластин на основе более реалистичской трехмерной модели.

Литература

1. Gogarty, E. Hierarchical topology optimization for bone tissue scaffold: preliminary results on the design of a fracture fixation plate / E. Gogarty, D. Pasini // Engineering and Applied Sciences Optimization. – Heidelberg : Springer, 2015. – P. 311–340.
2. Khalaf, A.A. Evolutionary structural optimization of steel gusset plates / A.A. Khalaf, M.P. Saka // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63. – P. 71–81.