

К валидации метода топологической оптимизации на основе минимизации потенциальной энергии деформации

С.А. Туктаров, В.М. Уськов, В.В. Чедрик

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Важнейшую роль при расчётно-экспериментальных исследованиях играет валидация методов и математических моделей на основе эксперимента. Она особенно актуальна при разработке новых подходов к проектированию конструкций летательных аппаратов. Одним из таких подходов являются разработанные в ЦАГИ методы и алгоритмы оптимизации топологии конструкции с целью синтеза её конструктивно-силовой схемы. Они построены на основе критериев оптимальности, вытекающих из постановки задачи оптимизации. В данной работе рассматривается задача минимизации потенциальной энергии деформации (податливости) при заданном объеме материала, рассматриваемая авторами в статьях [1, 2]. Построенные алгоритмы позволяют получать оптимальные решения, определяющие конструктивно-силовую схему для заданной нагрузки.

Однако, в настоящее время не имеется достаточного экспериментального подтверждения достоверности получаемых оптимальных решений. Поэтому в данной работе делается попытка построения простого демонстратора, позволяющего оценить эффективность методов топологической оптимизации к нахождению конструктивных решений по отношению к решениям, получаемым на основе традиционного подхода к проектированию. Рассматривается пример проектирования подпорной балки, известной в технической литературе как балка МВВ, так как аналогичная ей применялась в самолётах немецкой авиационной компании МВВ. Нагрузка и граничные условия представлены на рисунке 1.

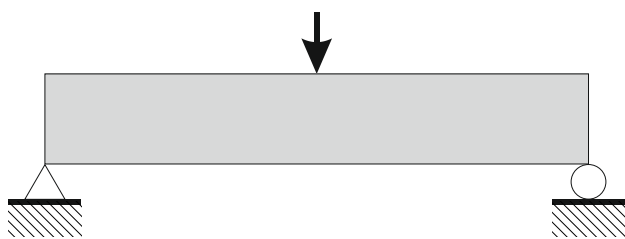


Рисунок 1 – Схема нагружения и граничных условий

Традиционный подход состоял в проектировании балки с сечением в виде двутавра с переменной шириной полки. Толщина стенки выбиралась из условия обеспечения допустимых касательных напряжений при действии максимальной поперечной силы. Толщина поясов считалась постоянной вдоль размаха балки, а их ширина определялась из условия обеспечения допустимых нормальных напряжений от изгиба. В таком предположении ширина поясов для половины балки вычисляется по формуле:

$$b_n = \frac{\frac{PH}{2[\sigma]}x - \frac{h^3 \delta_{cm}}{6}}{\delta_n (H - \delta_n)^2}, \text{ если } b_n > \delta_{cm}$$

$$b_n = \delta_{cm}, \text{ если } b_n \leq \delta_{cm}.$$

Здесь b_n и δ_n – соответственно ширина и толщина поясов, δ_{cm} – толщина стенки, H – высота двутавра, h – высота стенки, P – поперечная сила, $[\sigma]$ – допустимое напряжение. Полученная конструкция с использованием такого метода является равнопрочной за исключением зон, где имеется конструктивно-технологическое ограничение.

Полученный вес конструкции по традиционному подходу использовался в качестве ограничения для проектирования конструкции на основе топологической оптимизации. Исходной моделью для топологической оптимизации являлся параллелепипед с максимальными размерами высоты и ширины двутавра. Этот параллелепипед был разбит на большое количество конечных элементов в виде кубиков.

На рисунке 2 показаны как традиционное решение (слева), так и решение с оптимальной топологией, имеющее четыре полости и переменную ширину поясов и переменные толщины стенки и поясов. Последняя конструкция обладает большей жёсткостью при той же массе, что и традиционная.

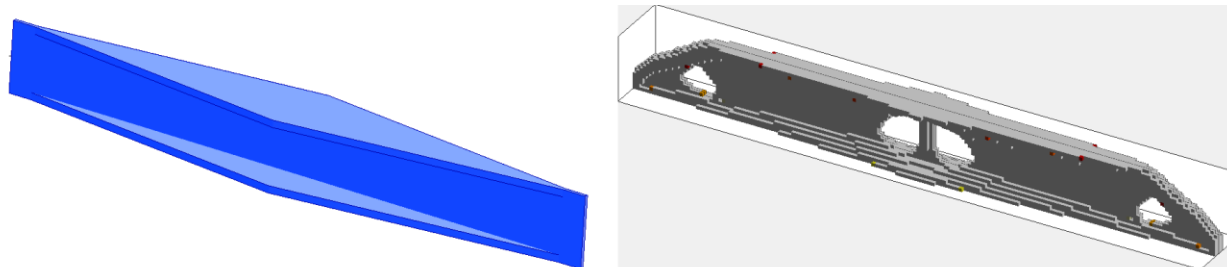


Рисунок 2 – Традиционная (слева) и оптимальная по топологии (справа) конструкции подпорной балки

Проведён анализ напряжённо-деформированного состояния двух моделей, на основе которого определяются места установки тензодатчиков для измерения напряжений, способы приложения нагрузки и адекватного формирования граничных условий. Определён способ измерения перемещений конструкции при деформировании. Сформировано техническое задание на изготовление полученных конструктивных элементов на основе аддитивных технологий, а также описан порядок проведения статических испытаний.

Литература

1. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Учёные записки ЦАГИ. 2011. Т. XLII, № 2, с. 91–102.
2. Uskov V.M., Balunov K.A. Method for topology optimization with clear boundary shape of structure // В сборнике: OPT-i 2014 – 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings 1. – Kos, Greece, June 4–6, 2014, p. 1324–1331.