

Преимущества использования метода топологической оптимизации на этапе проектирования промышленного продукта

В.С. Прокопов,
руковод. отд. прочн. анализа, к.т.н, vladimir.prokopov@gmail.com,
НТЦ «АПМ», г. Королев,
Д.С. Вдовин,
доц. каф. "Колесные машины", к.т.н, vdovinsky@gmail.com,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва,
С. С. Хрыков,
прогр., khrykov@apm.ru,
НТЦ «АПМ», г. Королев

В последние годы топологическая оптимизация (ТО) [1] заняла место полноправного метода для проектирования новых изделий и улучшения существующих конструкций. Накопленный практический опыт применения ТО позволяет сформулировать такие преимущества метода, как:

- снижение массы несущих конструкций без потери жёсткости и прочности - до 70% с применением аддитивных технологий (АТ), до 40% - без АТ;
- в 3-7 раз повышение жесткости и прочности без увеличения массы (с АТ), в 2-5 раз - без АТ
- изменение собственных частот конструкций в разы (эффективная отстройка от резонанса).

Наиболее актуальные постановки задач топологической оптимизации для практического применения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_x \frac{1}{2} F^T u(x) \\ \text{при} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{e=1}^n m_e \rho_e(x) \leq \bar{M} \\ \epsilon \leq x_e \leq 1, e = 1, \dots, n \end{array} \right. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \min_x \sum_{e=1}^n m_e \rho_e(x) \\ \text{при} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_i(x)}{\bar{\sigma}} \leq 1, i = 1, \dots, n \\ \epsilon \leq x_e \leq 1, e = 1, \dots, n \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

где x - проектная переменная, $\rho_e(x)$ - "плотность" КЭ, m_e - масса КЭ, $u(x)$ - узловые перемещения ансамбля КЭ, F - вектор правой части, $\bar{\sigma}$ и \bar{M} - ограничения на напряжения и массу соответственно.

Используя постановки задачи (1) можно получить картину силовых линий в исследуемой конструкции - расположение материала, отвечающее максимальной жёсткости, и получить форму конструкции с учётом ограничения по напряжениям и близкую к равнопрочной.

Важными особенностями использования метода являются [1]:

- Необходимость использования более плотных сеток без разрежения в объём (использование КЭ высоких порядков не решает проблему);
- Интерфейсные части модели не должны подвергаться процедуре оптимизации;
- Предпочтительно моделирование соседних узлов - даже небольшое изменение жёсткости интерфейсных элементов может привести к кардинальному изменению топологии;
- Необходимо учитывать максимально большой спектр вариантов нагружения;
- Предпочтительно наложение технологических ограничений, вызванных предполагаемым способом изготовления;
- Материал, из которого предполагается изготовление детали, должен быть задан на этапе проектирования;
- Использование инструмента пост-обработки результатов синтеза;
- Интерпретация результатов синтеза специалистом.

Передача результатов проведения ТО детали/конструкции конструктору без искажения является критически важной задачей. Так, отсечение элементов с нулевой «плотностью» приведёт к нечитаемой модели, а применение агрессивных методов сглаживания может привести к потере или замене важных особенностей полученной геометрии. В данной работе представлен алгоритм постобработки, позволяющий получить качественное представление геометрии и подходящий для промышленного использования в вычислительных комплексах.

Операция постобработки предназначена для создания на месте пространства проектирования новой конечно-элементной сетки, соответствующей оптимизированной форме объекта. Алгоритм постобработки состоит из ряда этапов: 1) построение поверхности равных "плотностей" (изоповерхности); 2) сглаживание изоповерхности; 3) конечно-элементная дискретизация ограниченного изоповерхностью объема; 4) обработка зон контакта между изоповерхностью и неизменяемыми частями объекта.

Поле "плотностей", на котором строится изоповерхность, является скалярным дискретным полем, т.к. значения условно приписываются лишь центрам элементов.

$$\rho = \rho(i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где $\rho(i)$ - "плотность", приписываемая элементу i , n - количество элементов в пространстве проектирования.

Дискретное поле "плотностей" можно привести непрерывному полю:

$$\rho = \begin{cases} \rho(x, y, z), & \{x, y, z\} \in \Theta \\ \rho_{outside}, & \{x, y, z\} \notin \Theta, \end{cases} \quad (3)$$

где $\rho(x, y, z)$ - "плотность" в произвольной точке $\{x, y, z\}$, вычисляемая путем интерполяции "плотностей" ближайших элементов, а $\rho_{outside}$ - условное значение "плотности" для точек вне пространства проектирования, где интерполяция невозможна, Θ - пространство проектирования.

Данное преобразование позволяет использовать стандартные алгоритмы реконструкции трехмерных поверхностей. В нашей работе используется алгоритм шагающих кубов (Marching Cubes) с модификациями Черняева [2], преимуществами которого являются линейная сложность, минимальный (константный) расход памяти и гарантированное получение корректной сетки без отверстий, самопересечений и других дефектов. Однако, недостатком алгоритма является наличие в изоповерхности большой доли треугольников "плохого" качества.

Качество треугольника оценивают с помощью ряда метрик [3]. На практике используют отношение $2r/R$, где r - радиус вписанной в треугольник окружности, R - радиус описанной окружности. Данное отношение может иметь значение от 0 до 1, причем 1 соответствует наилучшему качеству (равносторонний треугольник). На рис. 1 слева представлена характеристика качества треугольников в сетке, полученной на выходе алгоритма шагающих кубов.

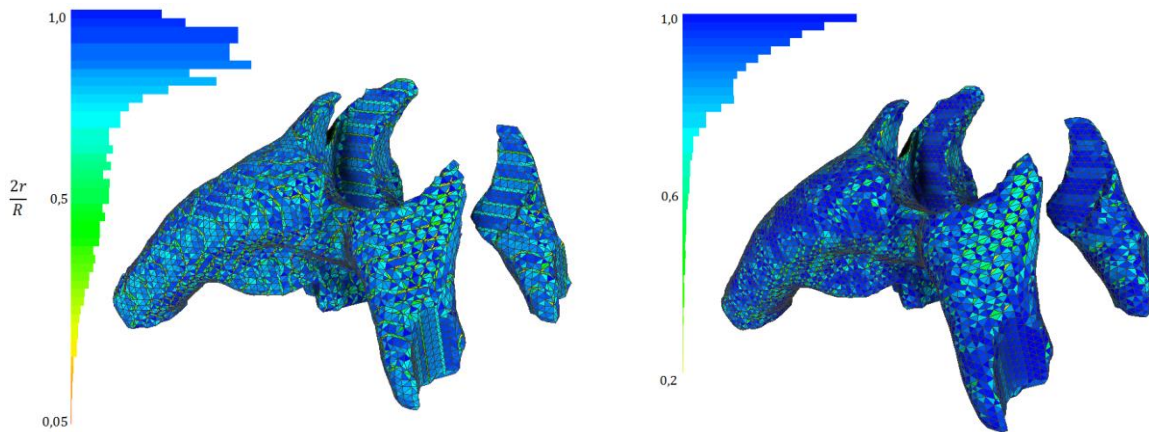


рис. 1 - Качество треугольников изоповерхности до релаксации (слева) и после релаксации (справа)

Повысить качество треугольников можно путем перемещения вершин сетки в стремлении получить максимальное количество равносторонних треугольников. Для этого применяется итеративная процедура релаксации на основе алгоритма Тобена [4]. Этот алгоритм состоит в перемещении каждой вершины в направлении геометрического центра ее соседей:

$$v'_i = v_i + \lambda \Delta v_i \quad (4)$$

$$\Delta v_i = \sum_{j \in i^*} w_{ij} (v_j - v_i), \quad (5)$$

где v_i - старые координаты точки, v'_i - новые координаты, v_j - координаты соседней точки, λ - масштабный коэффициент ($0 < \lambda < 1$), w_{ij} - весовые коэффициенты ($\sum w_{ij} = 1$), i^* - окрестность, по которой производится усреднение. Результат работы алгоритма представлен на рис.2 справа, из которого видно, что качество сетки, выраженное в количестве треугольников, приближенных к равносторонним, после релаксации значительно повысилось.

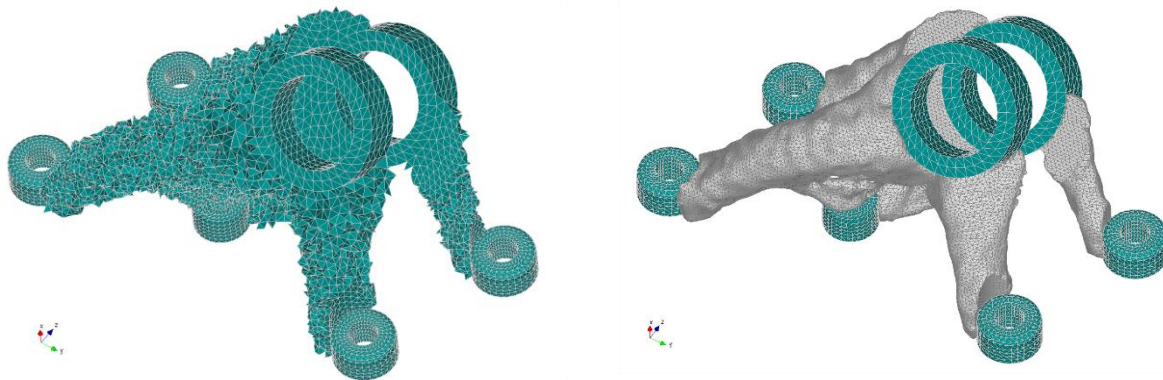


рис. 2 - Результат топологической оптимизации. До постобработки (слева), результат постобработки предложенным алгоритмом (справа)

Преимуществами алгоритма являются простота, высокая скорость работы, низкая требовательность к ресурсам. Недостатком алгоритма является отсутствие гарантий сохранения корректности сетки (перемещение вершин может привести к появлению самопересечений) и связанная с этим трудность подбора таких значений λ обеспечивающих

сохранение корректности сетки при минимальном числе итераций. Некоторые рекомендации по выбору значений λ приведены в [4].

Далее, на основе сглаженной поверхностной сетки строится объемная тетраэдрическая сетка методом триангуляции Делоне [5]. На заключительном этапе постобработки в зонах контакта объемной сетки с неизменяемыми частями конструкции автоматически создаются контактные элементы, связывающие воедино эти части в одно целое, что позволяет произвести проверочный расчет.

Рассмотрим указанные особенности на примере проектирования силовых кронштейнов [6,7,8]. Первым шагом в разработке подобной детали является выбор технологии и материала для изготовления кронштейна. Вторым шагом является определение мест под крепеж силового кронштейна к несущей системе или основанию, а также определение мест соединения с нагружающим элементом, например, тягой. Такие места не подвергаются процедуре топологической оптимизации (non-design space). Далее строится геометрическая фигура пространства проектирования (design space) с учетом отсутствия ее пересечения с окружающими деталями механизма и нагружающих тяг во всех возможных положениях механизма. В зоне крепежа делают вырезы под ключ или клепальный инструмент. Для построенных фигур (design и non-design space) формируется КЭ дискретизация, моделируется крепеж и нагружающие тяги и задаются граничные условия по крепежу и нагрузки по тягам, с как можно более полным набором расчетных случаев. Третьим этапом проводится процедура топологической оптимизации, в результате которой получается оптимальная форма конструкции кронштейна. Данная форма передается в CAD-программу для последующей ее интерпретации в виде геометрической модели (как правило, для передачи используется формат STL). Четвертым, последним этапом проводится поверочный расчет построенной CAD-модели кронштейна на те же расчетные случаи. Данный расчет проводится стандартным методом конечных элементов.

На рисунках 3 и 4 приведены указанные выше расчетные модели и результаты расчета построенных геометрических моделей двух силовых деталей: кронштейна несущей системы колесной машины, для которого выбрана технология - литье и материал сталь 35Л, и кронштейна навески авиационного двигателя на крыло пассажирского самолета, для которого выбрана аддитивная технология и материал сталь SS 316L-0410.

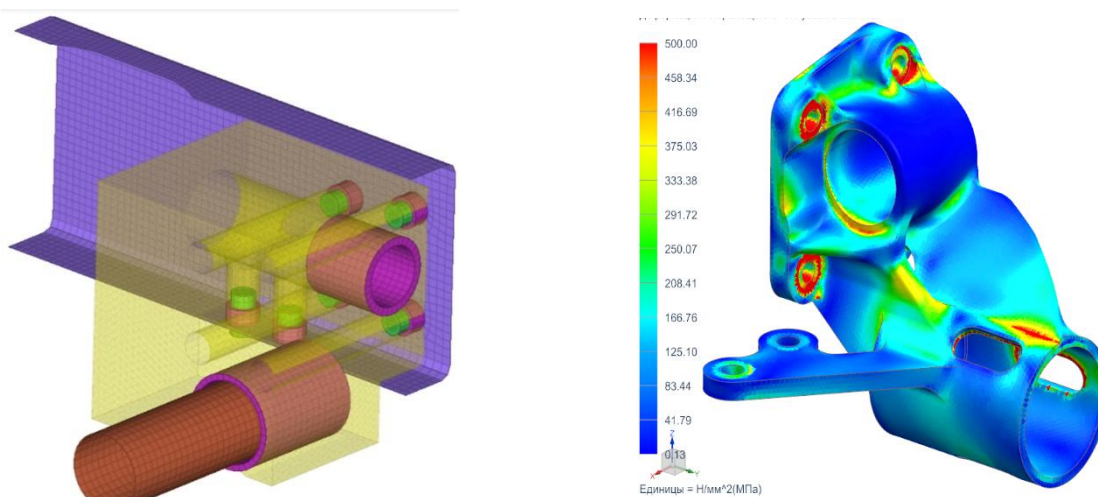


рис. 3 - Кронштейн несущей системы колесной машины; слева – область проектирования с интерфейсными деталями, справа - напряжённо деформированное состояние детали после пост-обработки и интерпретации результатов

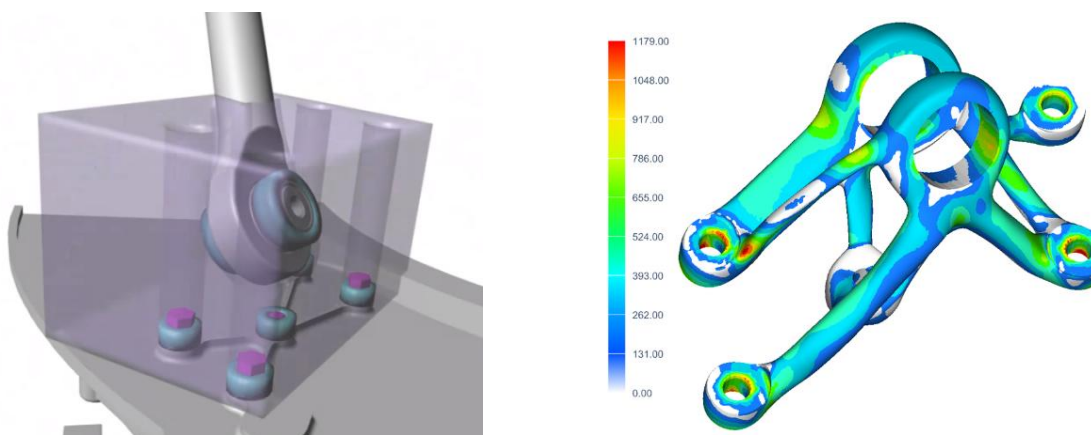


Рис. 4 - Кронштейн навески на крыло авиационного двигателя пассажирского самолета; слева – пространство проектирования кронштейна с неизменяемыми местами под крепеж и нагружающую тягу, справа - напряжённо деформированное состояние детали после пост-обработки и интерпретации результатов

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-37-00501.

Литература

1. Holmberg E., Torstenfelt B., Klarbring A. Stress constrained topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization, July 2013, V. 48, Issue 1, P. 33–47.
2. T. Lewiner, H. Lopes, A. Vieira, G. Tavares. Efficient Implementation of Marching Cubes' Cases with Topological Guarantees. // Journal of Graphics Tools. 8. 2012.
3. P. P. Pébay, T. J. Baker. Analysis of triangle quality measures // Mathematics of Computation, ol. 72, No. 244 (Oct., 2003), pp. 1817-1839.
4. G. Taubin, "Curve and surface smoothing without shrinkage," Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Cambridge, MA, 1995, pp. 852-857. doi: 10.1109/ICCV.1995.466848
5. M. Smolik, V. Skala. Highly Parallel Algorithm for Large Data In-Core and Out-Core Triangulation in E2 and E3. // In Procedia Computer Science, Volume 51, 2015, pp. 2613-2622
6. Д.С. Вдовин, В.С. Прокопов, Д.М. Рябов. Проектирование направляющего аппарата независимой подвески автомобиля с использованием метода топологической оптимизации. Известия Московского государственного технического университета "МАМИ", 2017, №3(33)
7. Д.С. Вдовин, Г.О. Котиев. Технология проектирования силовых деталей на примере вилки блокировки межосевого дифференциала многоосной колесной машины. Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2014. - № 8. - С. 28-31.
8. Д.С. Вдовин, Г.О. Котиев. Топологическая оптимизация рычага подвески грузового автомобиля. Журнал Тракторы и Сельхозтехника №3 2014, стр.20-23.