

Топологическая оптимизация на примере стрелы башенного крана

С.Г. Гнездилов, А.Н. Шубин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: gnezdilov@bmstu.ru, shubin-an@bmstu.ru

Поступила в редакцию 26.04.2017

Представлены результаты топологической оптимизации различных решений балочной стрелы (одноподвесных, двухподвесных) поворотного башенного крана, выполнен их анализ.

Ключевые слова: оптимизации топологии, стрела, башенный кран, структура, решетка, оптимизация.

Topology optimization by the example of tower crane boom

Sergey G. Gnezdilov, Alexander N. Shubin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Presented here are results of topology optimization of various designs of rotary tower crane boom (single/double suspension) with their analysis carried out.

Keywords: topology optimization, crane boom, tower crane, structure, lattice, optimization.

При создании новых структур несущих конструкций и модернизации существующих изделий все чаще прибегают к применению средств топологической оптимизации, позволяющих получать их более рациональные решения. Инструменты топологической оптимизации поддерживаются многими мощными системами конечно-элементного анализа. Известны также примеры свободно распространяемого программного обеспечения, позволяющего решать относительно простые двух- и трехмерные задачи, к числу которых относится программа TopOpt-2D.

Такая простая в использовании и доступная программа может быть использована в учебном процессе, например, при обучении учащихся основным принципам составления расчетных схем различных конструкций. Ее применение способствует также более обоснованному выбору структуры проектируемых конструкций. Ведь применение такой программы позволяет в считанные минуты приблизительно «прикинуть» рациональную топологию проектируемого изделия.

При топологической оптимизации, в которой

информация об исходной топологии изделия практически не имеет значения, выполняется поиск новой структуры изделия, при которой критерий ее оптимальности принимал бы наилучшие значения. Подвергаться оптимизации может как объемная топология изделия, так и ее произвольная проекция на плоскость.

В программах TopOpt задаются размеры проектной области, границы которой ограничивают область построения оптимального решения. В пределах проектной области задаются ограничения оптимизации (нагрузки и их сочетания, опоры и области отсутствия либо присутствия материала), после чего программа генерирует линии построения (распределение материала по проектной области), топология которых меняется в реальном времени и стремится к оптимальному виду. После корректировки ограничений оптимизации мгновенно изменяются линии построения, а через короткое время формируется новое оптимальное решение, соответствующее актуальным исходным данным.

Ранее с использованием этой программы была

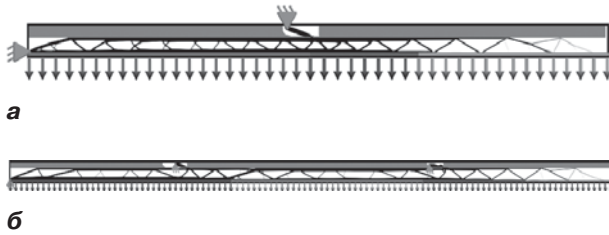


Рис. 1. Результаты оптимизации топологии балочных стрел:

а – одноподвесное исполнение; **б** – двухподвесное исполнение

проанализирована [1] рациональность структуры применяемых в порталных кранах хоботов и был выявлен более рациональный вариант конструкции хобота при ее незначительном изменении с возможностью снижения массы хобота на величину до 12,4%.

Снижение материалоемкости стрел башенных кранов в основном достигается за счет придания им более сложной структуры, наилучшим образом соответствующей реальной нагруженности участков стрелы: размеры поперечного сечения стрелы делают переменными [2], на разных участках стрелы однотипные элементы (раскосы, пояса) выполняют из труб с различным поперечным сечением. Применяют также легкие высокопрочные материалы [3] и др.

В настоящей публикации представлены результаты оптимизации структуры различных балочных стрел (одноподвесных, двухподвесных) башенных кранов.

На рисунке 1 представлены результаты топологической оптимизации балочных стрел различных исполнений, полученные на основе данных для существующих решений.

При построении оптимизационных моделей принят ряд допущений. Основное допущение – вместо сосредоточенной (от веса груза) и распределенной (от собственного веса стрелы) нагрузок применяется лишь распределенная сила, моделирующая указанные нагрузки. Это связано с невозможностью моделирования всех различных положений подвижной нагрузки. Поскольку программа позволяет рассматривать только три различных сочетания нагрузок, распределенная сила поделена на три участка, каждый из которых соответствует одному сочетанию нагрузок, а его величина определяется как среднее значение нагрузки на этом участке.

Шарнир в соединении стрелы с оттяжкой моделировался посредством создания в месте его нахождения такого прохода (создается из областей отсутствия материала), при котором изгибная жесткость создаваемых на нем линий построения была бы минимальной. В модели положение связанных с оттяжкой опор выбиралось таким образом, чтобы угол наклона создаваемых линий построения соответствовал углу наклона оттяжек в реальной конструкции.

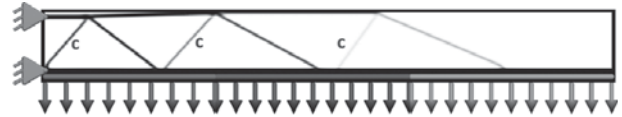


Рис. 2. Результаты моделирования оттяжки

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. На консольной части стрелы при постоянстве ее высоты с увеличением вылета возрастает расстояние между соседними узлами соединения раскосов с поясами, что может быть объяснено соответствующим снижением продольной сжимающей силы в нижнем поясе стрелы.

В корневой (ближайшей к башне) секции стрелы сжатые раскосы существенно (почти в два раза) длиннее растянутых раскосов (рис. 1), что предположительно определяется передачей горизонтальной составляющей силы от оттяжки с верхнего пояса стрелы на опору.

Дополнительно смоделированы условия работы системы оттяжек и получена ее оптимальная топология (рис. 2). В соответствующей модели стрела крана представлена в виде области присутствия материала, которая имеет протяженную форму (область располагается в нижней части рисунка). К этой области приложена распределенная нагрузка, учитывающая три различных сочетания. Программе было предложено получить линии построения (достроить недостающую систему оттяжек), делающие рассматриваемую систему оптимальной. Решение системы оттяжек получено для коэффициента заполнения проектной области равном 0,15.

Полученная в результате оптимизации система оттяжек (рис. 2) предполагает наличие трех стоек (обозначены буквой «с» на рис. 2). В полученной системе оттяжек с увеличением вылета возрастает расстояние между соседними узлами соединения оттяжек со стрелой.

Подобная система оттяжек применяется, например, в башенных поворотных кранах компании Liebherr-International AG с большой грузоподъемностью серии HC и кранах серии K, а также в быстромонтируемых кранах Igo компании Potain S.A.S. Она также прослеживается в решении крана, представленном на рисунке 3.

При моделировании системы оттяжек принималось допущение о том, что жесткость стрелы на всей ее длине постоянна. Однако в развитие полученного ранее результата (рис. 2) смоделирована наиболее рациональная топология самой стрелы с учетом известной топологии системы оттяжек (рис. 2). С этой целью в оптимизационной модели (рис. 4) добавлены области отсутствия (разграничивают части проектной области расположения системы оттяжек и элементов стрелы) и присутствия (принуждают программу к формированию требуемой (желаемой) структуры системы оттяжек) материала.

В отличие от результатов, полученных для одно- и двухподвесных исполнений стрел (рис. 1),



Рис. 3. Стрела башенного крана с системой оттяжек и стоек

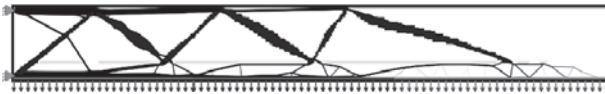


Рис. 4. Результаты моделирования структуры стрелы для «заданной» системы оттяжек

решение стрелы на рисунке 4 не имеет регулярной структуры. Сходство структуры наблюдается лишь на консольной части стрелы. Определенный интерес вызывает топология стрелы в месте расположения корневой секции: этот участок стрелы, по-видимому, более работает на сжатие, чем на изгиб, а потому может быть представлен в виде структуры, наилучшим образом воспринимающей сжимающие усилия.

Анализ результатов (рис. 2, 4) показывает, что центры распределенных сил пары расчетных сочетаний с относительно высокой точностью совпадают с узлами соединения элементов системы оттяжек со стрелой. Вероятно, это связано с ограничениями программы, вследствие которых сосредоточенные силы моделировались (заменялись) распределенными. В связи с этим целесообразна проверка работоспособности результатов (рис. 4), ведь не исключено, что, например, при приложении к концу стрелы сосредоточенной силы онастанет работать как механизм.

В целях проверки результатов (рис. 4) топологической оптимизации на основе их конечно-элементного анализа построена диаграмма (рис. 5) смещения точек стрелы (точки T01-T11 с постоянным шагом распределены вдоль стрелы на всем ее протяжении, причем индекс с меньшим значением соответствует началу стрелы) в зависимости от положения на стреле груза номинального веса. На рисунке 5 буквой «L» обозначена максимального смещения грузовой подвески от начала стрелы. Из диаграммы видно, что максимальные смещения точек стрелы от веса груза имеют место в двух случаях при смещении грузовой подвески с грузом номинального веса (номинальная масса груза корректируется в соответствии с вылетом) на величину $1,0 \cdot L$ и $0,6 \cdot L$. Далее представим полученные в системе Ansys карты смещений для результатов топологи-

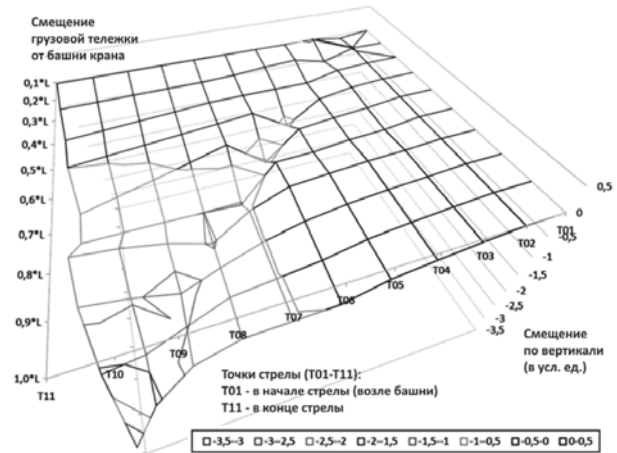


Рис. 5. Диаграмма смещения точек стрелы (T01-T11) в зависимости от положения груза номинального веса на стреле

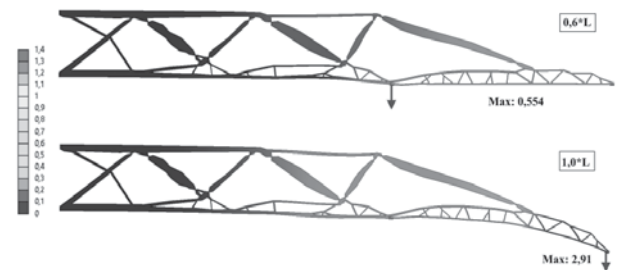


Рис. 6. Карта смещений (увеличены в 10 раз) точек стрелы при двух различных положениях груза номинального веса на стреле

ческой оптимизации (рис. 4) для двух упомянутых случаев положения грузовой подвески (рис. 6).

Несмотря на то, что в расчетной модели в узлах ожидаемых шарниров предусмотрены суженные участки, моделирующие эти шарниры, анализ последних результатов (рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что полученное в результате оптимизации решение стрелы на системе оттяжек потенциально при приложении к нему сосредоточенных сил не будет работать как механизм, а значит, опираясь на «оптимальную» топологию (рис. 4), может быть получено работоспособное решение стрелы с системой оттяжек.

В сложных задачах, при повторном решении выполненной ранее задачи новые результаты могут заметно отличаться от предыдущих. В частности, это связано с тем, что в упомянутой программе задание ограничений оптимизации выполняется приближенно: при решении одной и той же задачи в разных случаях высока вероятность неодинакового задания ограничений оптимизации, что влияет на конечный результат.

На рисунке 7 представлены результаты топологической оптимизации двухподвесного исполнения стрелы башенного крана, полученные для разных ограничений оптимизации (распределенные силы условно не показаны), прежде всего отличающихся различным отношением сторон

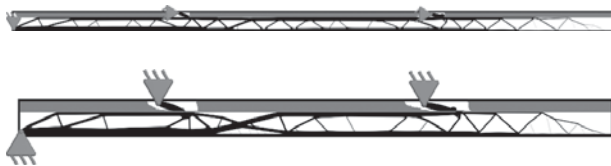


Рис. 7. Результаты топологической оптимизации двухподвесного исполнения стрелы с нормальной (сверху) и увеличенной (снизу) высотой стрелы

прямоугольной области, в пределах которой производится построение топологии стрелы.

Основное отличие представленных (см. рис. 7) результатов – в решении стрелы с увеличенной высотой на участке между узлами крепления оттяжек к стреле присутствует область пересечения нижнего и верхнего поясов, а точка пересечения по высоте располагается посередине между верхним и нижним поясами. При этом наиболее сжатая часть (слева от правой оттяжки) верхнего пояса стрелы, характеризуемая относительным утолщением (на рис. 7) линий построения, на отмеченном участке переходит в нижний пояс коренной секции. Таким образом, значительная сжимающая сила от наиболее удаленной от башни оттяжки передается на соединение стрелы с башней. Утолщенная линия построения, пролегающая на участке между точкой крепления более удаленной от башки оттяжки и точкой крепления стрелы к башне, с одной стороны, воспринимает сжимающую нагрузку от упомянутой оттяжки, с другой – непосредственно воспринимает нагрузку от номинального веса груза на малых вылетах.

Применение простого в использовании общедоступного программного обеспечения оптимизации топологии позволяет на ранних этапах проектирования новых изделий, а также при модернизации существующих конструкций, обоснованно получать более рациональные варианты решения. В то же время установлено, что для оптимизации

стрел целесообразно существенное увеличение количества учитываемых сочетаний нагрузок. И чем больше будет таких сочетаний, тем точнее результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гнездилов С.Г., Шубин А.Н.** Принципы рационального проектирования элементов машин с использованием методов топологической оптимизации // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 44–49.
2. **Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И.** Прочность и устойчивость портално-башенного крана К-58 // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 4. С. 36–41.
3. **Голосов А.А., Заярный С.Л.** Применение композитных материалов в элементах металлоконструкции крана // Инновационная наука. 2016. № 6–2. С. 56–58.

REFERENCES

1. **Gnezdilov S.G., Shubin A.N.** Principy racional'nogo proektirovaniya ehlementov mashin s ispol'zovaniem metodov topologicheskoy optimizacii // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2016. № 2. С. 44–49. (Gnezdilov S.G., Shubin A.N. Basics of rational designing of machine components with the use of topology optimization techniques // Construction and road building machinery. 2016. № 2. P. 44–49).
2. **Sinel'shchikov A.V., Dzhalmuhambetov A.I.** Prochnost' i ustojchivost' portal'no-bashennogo kрана K-58 // Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspiya. 2015. № 4. С. 36–41. (Sinelshikov A.V., Dzhalmukhambetov A.I. K-58 tower-kranestrength and stability // Astrakhan Institute of Civil Engineering. 2015. № 4. P. 36–41).
3. **Golosoov A.A., Zayarnyj S.L.** Primenenie kompozitnyh materialov v ehlementah metallokonstrukcii kрана // Innovacionnaya nauka. 2016. № 6–2. С. 56–58. (Golosoov A.A., Zayarny S.L. Application of composite materials in the elements of the crane metal structure // Innovation science. 2016. № 6–2. P. 56–58).