

сти (ПВП), пластифицированного поливинилхлорида, полиэтилена низкого давления (LDPE), полипропилена (PP). В состав включен фильтрующий текстиль. Нашло и применение мембранного покрытия жидкой резины, твердение такой гидроизоляции происходит без подогрева.

#### Закключение

Влага, проникая в конструкцию, становится, в большинстве случаев, причиной их разрушения. Поэтому гидроизоляция это фактор сохранности и долговечности сооружения.

УДК 624.21

### БАЛКА

Ходяков В. А.

(Научный руководитель – Пастушков В.Г.)

Кафедра «Мосты и тоннели» БНТУ

#### Аннотация

В процессе проектирования строительных конструкций мы всегда пользуемся определёнными видами параметров и граничных условий, которые лежат в основе их образования. Эти параметры и условия определяются конкретными проектными задачами, нормативными документами, опытом конкретного проектировщика и др. Скомпоновать все актуальные параметры в пределах конкретных граничных условий единственным наиболее эффективным способом в рамках определённой проектной задачи крайне сложно. Для подобной компоновки требуется создавать разного рода алгоритмы оптимизации. В данной работе описаны результаты попыток оптимизации балок пролётного строения.

В процессе исследования было построено несколько алгоритмов оптимизации двутавровой шарнирно опертой балки пролётом  $L = 20\text{ м}$  (рис. 2). Модель балки была загружена распределённой нагрузкой в  $q = 100\text{ кН/м}$ . В качестве материала была замоделирована сталь марки 10ХСНД. В процессе оптимизации использовались как алгоритм эволюции, так и алгоритм молекулярной стабилизации. Важно отметить, что в процессе расчёта учитывалась нагрузка от

собственного веса балки. Все линейные размеры сечений генерировались кратными 0,01мм.

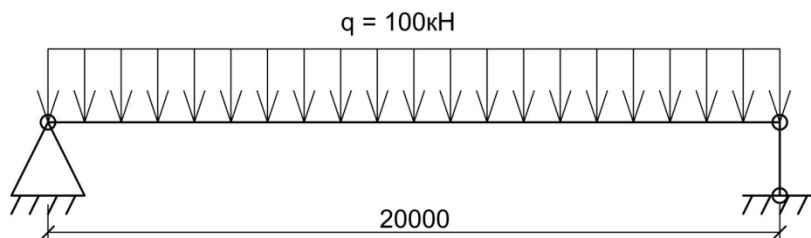


Рисунок 2 – Расчётная схема оптимизируемой балки.

В первом варианте было принято решение сохранить постоянное сечение на протяжении всей длины балки. В качестве входных параметров для образования сечения были заданы:  $h_w$  – высота стенки двутавра;  $t_w$  – толщина стенки;  $b_f$  – ширина полки;  $t_f$  – толщина полки;

Граничным условием являлась проверка сечения на прочность по максимальным напряжениям от момента и поперечной силы. Объектом оптимизации стала минимизация площади поперечного сечения.

Результат был довольно очевидным: мы получили очень высокий двутавр с очень широкими полками (рис. 3). При этом толщина полок и стенок была крайне мала. Другими словами алгоритм пытался максимально расширить и разнести пояса двутавра, так как при этом получался максимальный момент инерции сечения при его минимальной площади. В перспективе дальнейший работы алгоритма должно было получиться бесконечно высокое и широкое сечение, толщины стенки и полок которого, стремятся к нулю. Однако такая компоновка сечения не возможна, в виду не выполнения условий местной устойчивости полок и стенок двутавра.

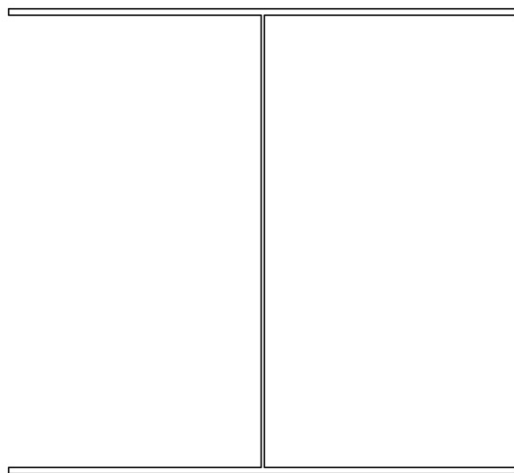


Рисунок 3 – Результат первой попытки оптимизации двутаврового сечения балки.

Во втором варианте алгоритма формообразования были добавлены граничные условия обеспечения местной устойчивости полок и стенки двутавра.

В результате мы получили уже более конкретный результат, который можно принять за окончательное конструктивное решение сечения (рис. 4).

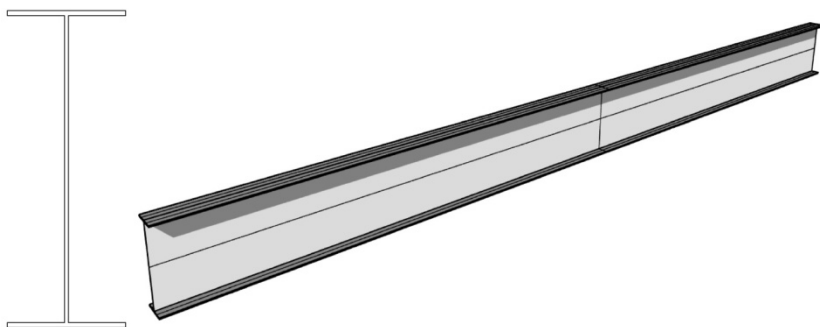


Рисунок 4 – Оптимизированное постоянное сечение балки и общий вид балки.

Балка с данным поперечным сечением была замоделирована в расчётном комплексе SOFiSTiK с целью проверки результатов работы алгоритма (рис. 5). Правильность работы алгоритма была подтверждена – в центре пролёта коэффициент использования материала был равен 1, это означало, что в центре пролёта все 100% материала в составе сечения работало на сопротивление изгибающему моменту. При этом, площадь этого сечения была сведена к единственному минимуму.

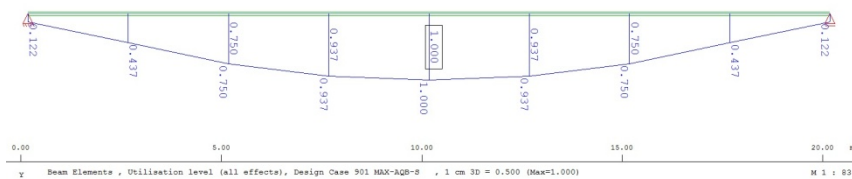


Рисунок 5 – Расчёт коэффициента использования материала в оптимизированной двутавровой балке постоянного сечения в SOFiSTiK.

Следующим шагом стало создание полигональной балки. Всё сечение было разделено на участки, длина которых уменьшалась ближе к точкам опирания для повышения точности модели. В этом случае сечения оптимизировались по порядку от края к центру балки. Было совершено несколько проходов по всем сечениям с целью наиболее точного учёта собственного веса балки. Каждое сечение оптимизировалось под конкретную комбинацию нормальных и касательных напряжений в каждой конкретной точке стержня. Условия местной устойчивости полок и стенки двутавровых сечений также учитывались.

В результате получилось полигональная балка двутаврового сечения (рис. 6). Следует отметить некоторые особенности полученной формы. Можно заметить три различных участка (рис. 7). На первом, наиболее близком к опоре, участке полки двутавра отсутствуют. Это обусловлено тем, что напряжения от изгибающего момента крайне незначительны, по сравнению с напряжениями от поперечной силы. На втором участке начинают образовываться полки, однако высота двутавра продолжает уменьшаться. На этом участке одинаково учитываются как поперечная сила, так и момент. На

третьем участке решающую роль играет только изгибающий момент, сечение балки начинает увеличиваться, повторяя своей формой эпюру моментов.

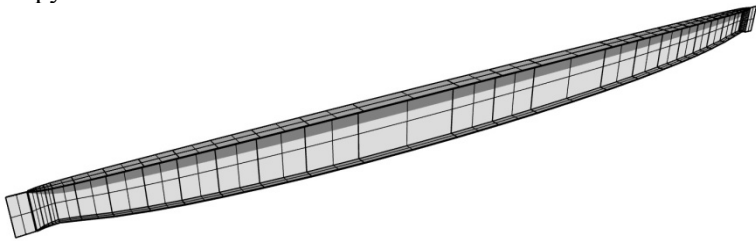


Рисунок 6 – Общий вид оптимизированной полигональной двутавровой балки.

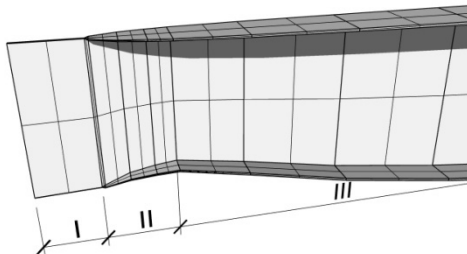


Рисунок 7 – Часть оптимизированной полигональной двутавровой балки рядом с точкой опирания.

По результатам проверки в расчётном комплексе SOFiSTiK оказалось, что практически по всей длине сечения коэффициент использования материала равен единице (рис. 8). Небольшие отклонения обуславливаются тем, что в SOFiSTiK криволинейная балка состоит из прямолинейных конечных элементов. Кроме того по краям балки коэффициент использования материала сильно отличается от единицы, что говорит о несовершенстве алгоритма формообразования, созданного в Grasshopper.

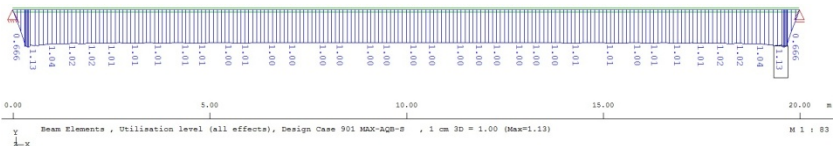


Рисунок 8 - Расчёт коэффициента использования материала в оптимизированной полигональной двутавровой балке в SOFiSTiK.

Для более удобного монтажа был разработан ещё один вариант балки с постоянными размерами верхней полки. Ширина и толщина были заданы равными 500 и 22мм соответственно. При этом для обеспечения опирания ширина нижней полки не могла быть менее 200мм.

После работы алгоритма была сгенерирована балка, которая имела более привычные – линейные размеры элементов сечения в тех местах, где это необходимо (рис. 9). Здесь также можно выделить три участка (рис. 10). На первом преобладает поперечная сила, на втором и поперечная сила и момент, а на третьем только момент. Высота стенок сечений варьируется в диапазоне 570,39-893,09; толщина – 7,25-11,35. Ширина нижней полки в диапазоне 200-554,65; толщина – 8,54-24,17 (рис. 11).

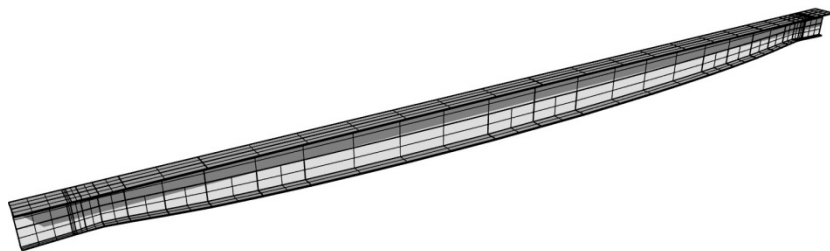


Рисунок 9 – Общий вид оптимизированной полигональной двутавровой балки с лимитированными поясами.

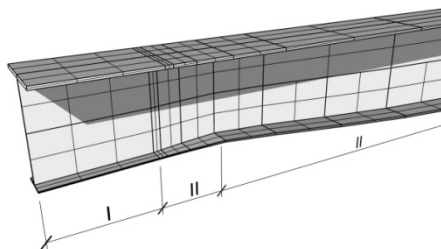


Рисунок 10 – Часть оптимизированной полигональной двутавровой балки с лимитированными поясами рядом с точкой опирания.

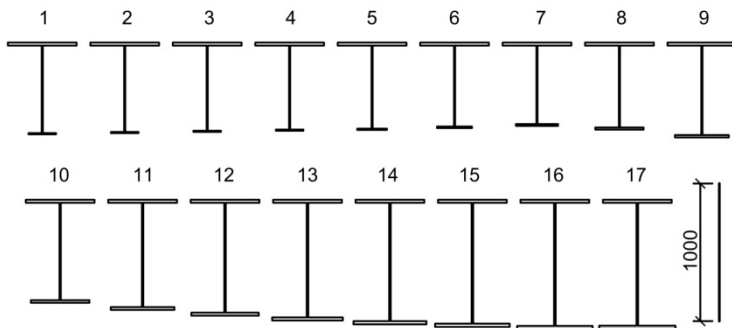


Рисунок 11 – Набор оптимизированных двутавровых сечений, лежащих в основе построения полигональной балки с лимитированными поясами.

Результат расчёта в SOFiStiK был довольно неожиданным (рис. 12). Коэффициент использования материала по балке в среднем был равен единице, однако имели место серьёзные отклонения порядка 10-13% в обе стороны. В процессе подробного изучения результатов было сделано заключение о том, что эти отклонения получены благодаря отсутствию вертикальной симметрии сечения двутавра, которое вызывает дополнительные сложности для достижения идентичности расчётных алгоритмов Grasshopper и SOFiStiK. У опорных частей коэффициент, как и в предыдущем случае, был далёк от единицы, что подтвердило вероятную ошибку в работе алгоритма Grasshopper при расчёте на касательные напряжения в двутавре.

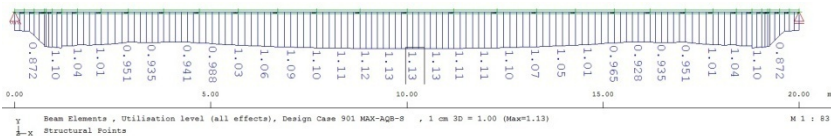


Рисунок 12 - Расчёт коэффициента использования материала в оптимизированной полигональной двутавровой балке с лимитированными поясами в SOFiStiK.

### Заключение

По результатам сравнения вариантов балок была составлена таблица объёма материала на производство одной балки (табл. 1).

Таблица 1 – сравнения вариантов балок для перекрытия пролёта длиной 20м.

Балка пролётом 20м, (q=100кН/м)	объём стали (10ХСНД )	Относительное количество материала			
Сортовой двутавр 100Б4 (перегруз около 1%)	0,8012м <sup>3</sup>	100%	116,86 %	158,09 %	141,38 %
Двутаврооптимизирован- ный постоянного сечения	0,6856м <sup>3</sup>	85,57 %	100%	135,28 %	120,98 %
Двутавр оптимизирован- ный полигональный	0,5068м <sup>3</sup>	63,25 %	73,92%	100%	89,43%
Двутаврооптимизирован- ный полигональный с ли- митированными поясами	0,5667м <sup>3</sup>	70,73 %	82,66%	111,82 %	100%

Сравнение вариантов даёт следующие результаты: Полигональный оптимизированный двутавр позволяет сэкономить до 36,75% материала в сравнении с сортовым. Если же ограничить оптимизацию с конструктивной точки зрения, то экономия снижается всего на 7,48% и составляет 29,27%.

Однако это лишь теоретические результаты и для их подтверждения требуются натурные испытания балок.

## ЛИТЕРАТУРА

4. AmsterdamIconicPedestrianBridgeCompetitionEntry: Проект пешеходного моста в Амстердаме с описанием его формообразования. – сентябрь 2012. – <http://www.archiveneue.com/amsterdam-iconic-pedestrian-bridge-competition-entry/>
5. Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design: Статья Патрика Шумахера, основоположника Параметрики, как архитектурного гостия – AD Architectural Design - Digital Cities, Vol 79, No 4, July/August 2009 – <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>
6. RobertStuart Smith.mp4: Видеолекция Роберта Стюарта Смита о параметрике и формообразовании. – Март 2012 – <http://www.youtube.com/watch?v=LLlzuVv4cB8>