

Ходяков В.А., магистрант  
Белорусский национальный технический университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ ПО МАССЕ С СОХРАНЕНИЕМ ТРЕБУЕМОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

x@monogroup.by

Экономия объёмов материалов при производстве строительных конструкций является актуальной задачей. Проектирование облегчённой оптимизированной металлической двутавровой балки с криволинейными очертаниями полок и поясов с применением алгоритмов оптимизации позволило сократить объём металла на производство более чем на треть. Уменьшение массы балки достигается плотной корреляцией параметров поперечного сечения балки с усилиями, возникающими в балке под действием расчётной нагрузки. Однако существует большое количество нерешённых вопросов касательно работы оптимизированной балки под нагрузкой. Особенно остро стоят вопросы, касающиеся местной и общей устойчивости балки. Учитывая тенденции развития способов и возможностей производства строительных конструкций, можно предположить, что уже скоро станет возможным промышленное производство металлических оптимизированных балок.

**Ключевые слова:** оптимизация, балка, несущая способность, устойчивость, расчёт.

**Введение.** В процессе проектирования строительных конструкций сегодня всё чаще прибегают к параметрическому компьютерному моделированию [1]. Одной из причин актуальности такого рода моделирования является возможность удобного поиска решений сложных многопараметрических проектных задач. Таким образом, параметрическое проектирование неизбежно приходит к задаче оптимизации сложных моделей. Одним из наиболее эффективных алгоритмов оптимизации является генетический алгоритм [2, 3]. В этой работе мы не будем останавливаться на принципах работы алгоритмов. Основным интерес представляют несущие конструкции, которые можно получить методом оптимизации. Уже существует несколько примеров эффективного проектирования несущих конструкций с применениями различных алгоритмов оптимизации [4, 5]. В качестве объекта данного исследования был принят простейший элемент конструкции типа балка. Известно, что для балки, работающей на изгиб, наиболее эффективным решением поперечного сечения является двутавр. Предметом исследования стали работа модели оптимизированной двутавровой балки под расчётной нагрузкой и топология самой балки.

**Методика.** Оптимизация рассматриваемой двутавровой балки, в сущности, представляет собой оптимизацию каждого поперечного сечения балки по её длине. Оптимизируемыми параметрами являются геометрические характеристики каждого поперечного сечения балки, а именно, высота и толщина стенки двутавра, ширина и толщина полки двутавра. Задачу оптимизации можно охарактеризовать как многопараметрическую.

Основным алгоритмом оптимизации, применяемым в работе, является генетический алгоритм, также в отдельных случаях применялся алгоритм отжига [6]. Задача оптимизации являлась однокритериальной. Основным критерием, целевой функцией, стало уменьшение площади каждого поперечного сечения балки.

Так как при критическом уменьшении поперечных сечений балки может произойти потеря несущей способности по первой группе предельных состояний, граничными условиями оптимизации являются потеря местной устойчивости стенки и полки балки, а также максимальные напряжения, возникающие в сечениях.

Расчёт балки в процессе оптимизации проводился методом конечных элементов в соответствии со СНиП II-23-81\*. Также в отдельных случаях учитывались требования ТКП 45-3.03-232-2011 и ТКП EN 1993 [7]. Для упрощения эксперимента никакие нормативные коэффициенты не учитывались.

**Результаты оптимизации балки.** Расчётная схема оптимизируемой балки представляет собой шарнирно опертую по концам однопролётную балку. Длина пролёта балки составила 20м. Расчётная нагрузка, приложенная к балке, представляла собой равномерно распределённую нагрузку 100кН/м. Нагрузка от собственного веса балки так же была учтена. В качестве эталонной балки был выбран прокатной двутавр 100Б4. В качестве материала для изготовления балок была принята мостовая сталь 10ХСНД. Следует отметить, что эталонная прокатная балка пролётом 20м под указанной нагрузкой имела перегруз порядка 2% в центре пролёта.

В процессе оптимизации было получено несколько видов оптимизированных балок (табл. 1). Первой стала двутавровая балка с постоян-

ными по длине оптимизируемыми параметрами (рис. 1). Оптимизированная балка постоянного сечения имела массу на 14,43 % меньше чем эталонная.

Во втором случае балка имела переменное сечение. Оптимизировались все параметры каждого поперечного сечения по длине балки (рис. 2). Оптимизированная балка имела массу на 36,75 % меньшую, чем у эталонной балки.

В третьем случае двутавровая балка имела переменное сечение, однако толщина полок и стенок были постоянными, а высота стенки линейно изменялась от значения 1000 мм в центре балки до 500 мм на опорах (рис. 3). Толщина полки двутавра 28 мм, а толщина стенки 14 мм. Минимальная ширина полок была ограничена величиной 100 мм. Оптимизированная таким образом балка имела массу на 26,02 % меньшую по сравнению с эталонной балкой.

В четвёртом случае двутавровая балка имела переменное сечение, толщина полок и стенок были постоянными, ширина полки линейно изменялась от значения 500 мм в центре балки до 100 мм на опорах (рис. 4). Толщина полки двутавра 28 мм, толщина стенки 14 мм. Оптимизированная таким образом балка имела массу на 29,51 % меньшую по сравнению с эталонной балкой.

В пятом случае двутавровая балка имела переменное сечение, толщина полок и стенок остались теми же, что и в предыдущих двух случаях, высота стенки изменялась по закону окружности от значения 1000 мм в центре балки до 500 мм на опорах (рис. 5). Подобный подход к формообразованию балки переменного сечения уже применялся в железобетонных балках [8]. Оптимизированная таким образом балка имела массу на 29,86 % меньшую по сравнению с эталонной балкой.

Таблица 1

Сравнения параметров оптимизированных балок

№	Вид балки	Объём стали, м <sup>3</sup>	Относительное количество материала, %		
			100	116,86	158,09
0	Сортовой двутавр 100Б4 (перегруз 2%)	0,8012	100	116,86	158,09
1	Двутавр оптимизированный постоянного сечения	0,6856	85,57	100	135,28
2	Двутавр оптимизированный переменного сечения	0,5068	63,25	73,92	100
3	Двутавр оптимизированный переменного сечения с линейно изменяемой высотой стенки, толщины элементов постоянные	0,5927	73,98	86,45	116,95
4	Двутавр оптимизированный переменного сечения с линейно изменяемой шириной полки, толщины элементов постоянные	0,5648	70,49	82,38	111,44
5	Двутавр оптимизированный переменного сечения с высотой стенки изменяемой по закону окружности, толщины элементов постоянные	0,5620	70,14	81,97	110,89

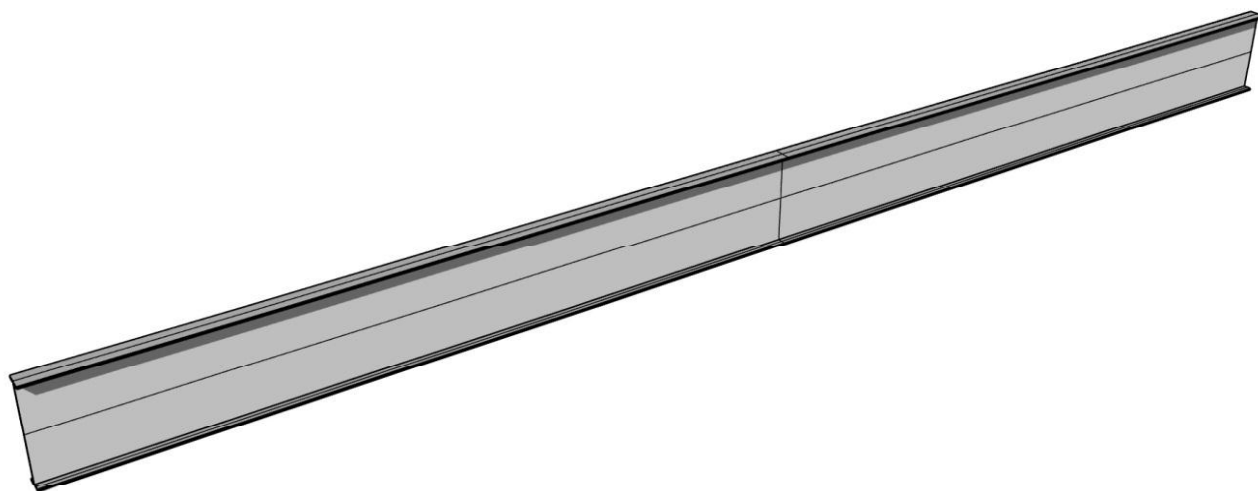


Рис. 1. Общий вид оптимизированной балки постоянного сечения

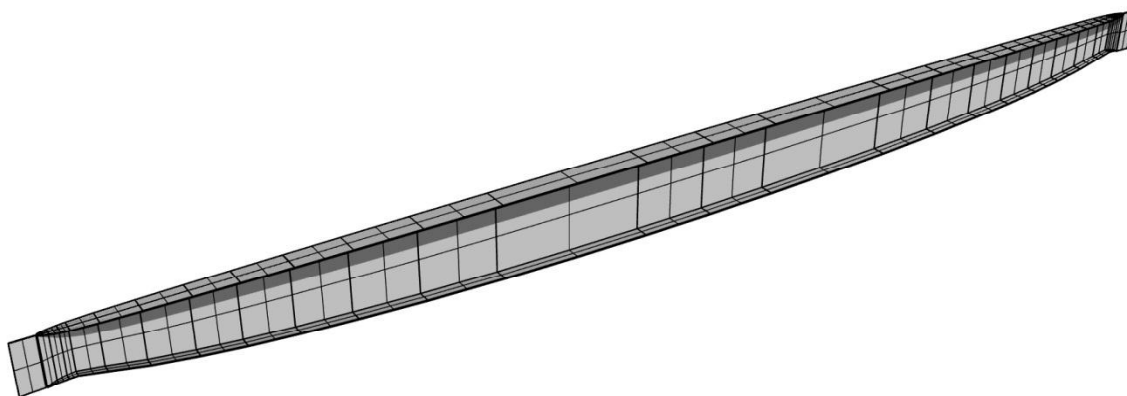


Рис. 2. Общий вид оптимизированной балки переменного сечения.  
Оптимизация всех параметров поперечного сечения

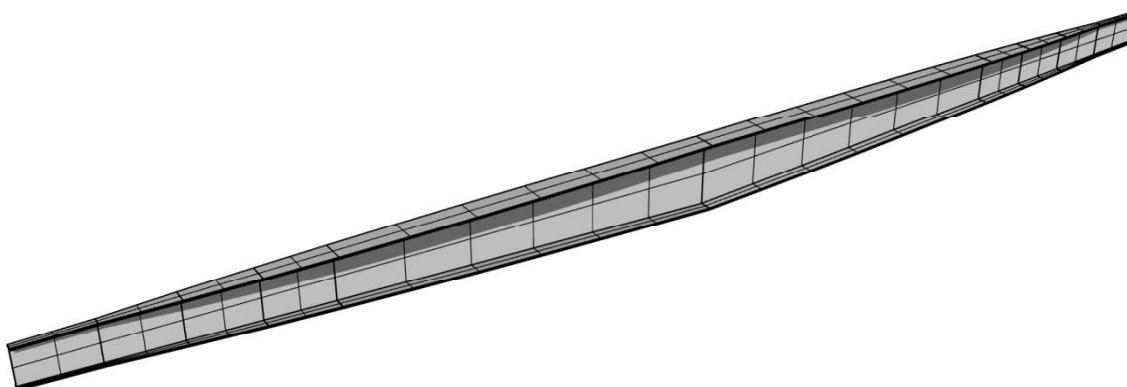


Рис. 3. Общий вид оптимизированной балки переменного сечения  
с линейно изменяемой высотой стенки. Толщины элементов постоянные

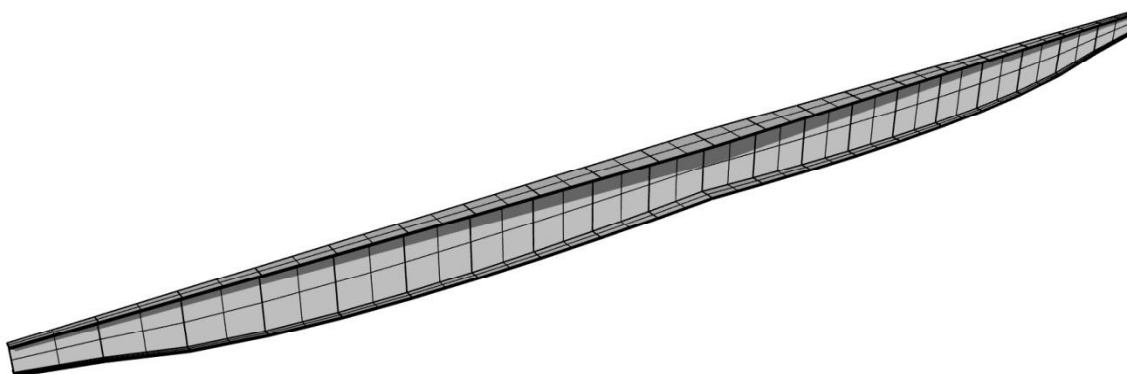


Рис. 4. Общий вид оптимизированной балки переменного сечения  
с линейно изменяемой шириной полки. Толщины элементов постоянные

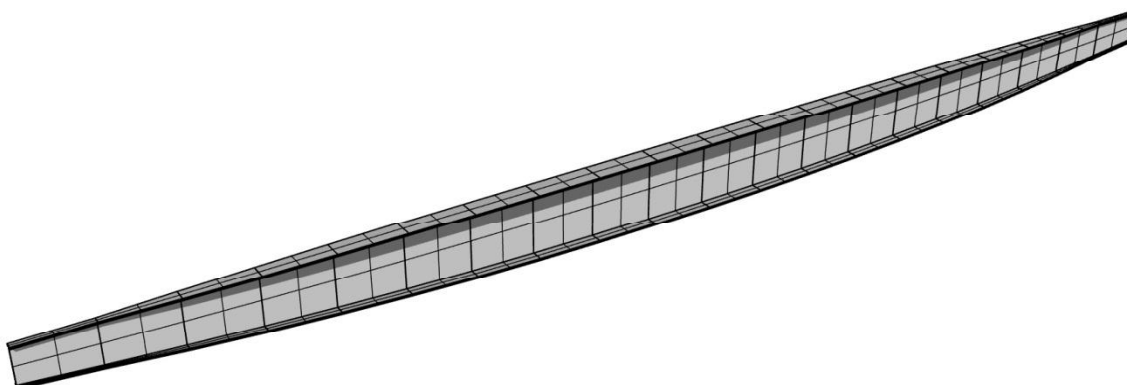


Рис. 5. Общий вид оптимизированной балки переменного сечения  
с высотой стенки изменяемой по закону окружности. Толщины элементов постоянные

**Особенности и проблемы оптимизированных балок.** Современные методики расчёта, описываемые в нормативных документах и методических пособиях, ориентированы в основном на расчёт балок постоянного сечения. При этом часть этих расчётов имеет эмпирическую составляющую и не может быть применена для сложных балок переменных сечений.

Одним из открытых вопросов является расчёт местной и общей устойчивости. В нормативных документах есть рекомендации по подбору соотношений высоты стенки двутавра и её толщины, а так же соотношений вылета полки двутавра и её толщины. Эти рекомендации были учтены в процессе оптимизации выше рассмотренных балок. Однако сложно сказать могут ли эти рекомендации использоваться для полок и стенок сложного переменного сечения. Возможность постановки диафрагм в данном исследовании не рассматривалась.

Во втором случае оптимизации, при оптимизации всех параметров поперечного сечения без дополнительных ограничений, наличие полок у узлов опирания не требуется, так как изгибающий момент воспринимается одной стенкой, высота которой определяется поперечным усилием в балке. Таким образом, вопрос местной устойчивости стенки на участке без полок переходит в вопрос общей устойчивости прямоугольного сечения.

Вопрос оценки общей устойчивости балок переменного сечения остаётся не решённым. Однако это условие можно обойти раскреплением оптимизированных балок другими элементами в составе несущей конструкции.

В расчёте так же стоит учесть совместное действие напряжений от изгибающего момента и поперечного усилия. Данный расчёт также имеет некоторые сложности для оптимизированных балок.

При изменении сечения балки по её длине, помимо главного изгибающего момента возникает дополнительный изгибающий момент в поперечном сечении, действующий в той же плоскости. Возникновение последнего обусловлено постоянным смещением центра тяжести сечения.

Оптимизированные балки переменного сечения имеют несколько меньшую жесткость, чем балки постоянного сечения. Требования к жесткости балок по нормативным документам устанавливаются в зависимости ситуации, в которой их используют. Поэтому при прикладном проектировании, вероятно, возникнет необходимость ввода ещё одного граничного условия по максимальному прогибу, помимо уже учтённых

условий максимальных напряжений и условий устойчивости.

Ввиду того, что при превышении величины расчётной нагрузки потеря несущей способности должна произойти, в теории, по всей длине балки, возникает необходимость ввода дополнительного коэффициента безопасности для оптимизированных балок. Ввод этого коэффициента также можно обосновать вероятным понижением общей надёжности оптимизированных конструкций.

Также из-за снижения общей жёсткости балок уменьшаются собственные частоты колебаний конструкций. Это стоит учесть при использовании таких балок под гармоничными динамическими нагрузками. Например, при использовании таких балок в железнодорожных мостах можно ожидать снижения критических скоростей подвижного состава.

Касательно транспортных сооружений, стоит отметить, что оптимизировать балку необходимо по огибающим эпюрам усилий от подвижных нагрузок. Это на порядок усложнит алгоритм оптимизации конструкции и топологию самой балки.

**Выводы.** Основной проблемой вышеуказанных балок является сложность их производства. На сегодняшний день расходы на процесс изготовления превосходят экономию материала. На данный момент исследования имеют академический интерес. Однако, учитывая тенденции развития и популяризации современных технологий производства, можно предположить, что в ближайшем будущем результаты исследования могут получить массовое практическое применение.

Несмотря на сложности изготовления натурной модели, без её испытания сложно говорить об эффективности комбинации алгоритмов расчёта и оптимизации конструкции. Поэтому конечной задачей исследования является создание натурной модели оптимизированной балки и её испытание.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров, М.П. Переход на BIM-технологии в проектировании на примере Autodesk Revit // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015. Т. 1. С. 447–449.
2. Юрьев А.Г., Лесовик Р.В., Клюев С.В., Клюев А.В. Генетические алгоритмы и их применение для оптимального проектирования строительных конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. №1. С. 11–16.
3. Кирсанов М.Н. Генетический алгоритм

оптимизации стержневых систем // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. №2. С. 60–63.

4. Алексейцев А.В., Серпик И.Н. Эволюционно-триангуляционный способ формирования оптимальной структуры строительных ферм // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5–2. С. 128–131.

5. Гребенюк Г.И., Вешкин М.С. Дискретные модели расчета и оптимизации стержневых конструкций при импульсном нагружении // Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 1-1. С. 36–38.

6. Лисин А.В. Алгоритм имитации отжига для задач непрерывной оптимизации // Ползуновский вестник. 2014. № 4–2. С. 175–179.

7. Пастушков, Г.П., Пастушков В.Г. О переходе европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2011. № 2. С. 113–121.

8. Пат. 2562077 С1 Российская Федерация, МПК Е 04 С 3/02. Строительная конструкция типа балки / Б.В. Гусев; заявитель и патентообладатель Б.В. Гусев. - № 2014148693/03, заявл. 03.12.14; опубл. 10.09.15, Бюл. № 25. 6 с.

---

**Khadziakou V.A.**

**OPTIMIZATION OF METAL I-BEAM BY WEIGHT WITH BEARING CAPACITY PRESERVING. RESULTS ANALYSIS**

*Saving materials volumes in the production of building structures is an actual task. Design metal lightweight I-beam with curved contours of flanges and web by using optimization algorithms has allowed reducing metal volume to production of more than on third. Reducing the beam weight is achieved by tight correlation of beam cross section parameters with the stresses that arise in the beam under the design load. However, there are many unresolved issues concerning the work of the optimized beam under load. Especially important are issues relating to local and general buckling of the beam. In view trends in development methods and capabilities of structures fabrication, we can assume that soon the industrial production of optimized metal beams will be possible.*

**Key words:** *optimization, beam, bearing capacity, buckling, calculation.*

---

**Ходяков Вячеслав Андреевич**, магистрант кафедры мосты и тоннели.  
Белорусский национальный технический университет.  
Адрес: Беларусь, 220014, Минск, просп. Независимости, д. 150.  
E-mail: x@monogroup.by