

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЧЕНИЯ СТЕНКИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ

В.Е. Волкова, И.С. Смолий, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет", Украина

В статье представлены результаты численного моделирования динамического поведения стальных балок открытого сечения. Результаты получены для двух вариантов конструктивного решения балок. Исследованы динамические характеристики балок с постоянным и переменным по длине поперечным сечением. На основе полученных данных, сделан вывод о возможности применения балок с переменным поперечным сечением по длине при динамических воздействиях.

Исследованию особенностей напряженно-деформированного состояния балок с гибкой стенкой посвящены работы И.И. Ааре, С.И. Иднурма, Б.М. Броуде, А.А. Евстратова, М.Д. Корчака, Н.П. Мельникова, И.В. Левитанского, В.В. Каленова, М.В. Предтеченского, И.К. Погадаева, Е. Ендрики, Н.А. Журавлева, Ю.Н. Симакова, Ю.В. Сухарева и др., С. Бергмана, Й. Дьюбека, К. Баслера и Б. Тюрлимана, З. Садовского, И. Фуджии, С. Черна и А. Остапенко, К. Роки и М. Шкалоуда, Х. Херцога, Т. Хеглунда и др. [1] На основе экспериментальных и теоретических данных было установлено, что после потери устойчивости стенки несущая способность балки не исчерпывается. Нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости стенки, значительно меньше граничной. При этом толщина стенки балки может уменьшена в 2...3 раза. Путем уменьшения стенки балки по сравнению с традиционными решениями можно существенно снизить количество расходуемого материала на балку.

В литературе балки, в которых используется закритическая стадия работы стенки, получили название балок с гибкой стенкой (БГС). В настоящее время работа БГС при динамических нагрузках на сегодняшний день не достаточно изучена [2]. Ввиду этого, область применения БГС как правило ограничена разрезными балками, воспринимающими статические нагрузки. [3, с 245-246]. В то же время, за рубежом БГС применяются в конструкциях рам и конвейерных эстакад, работающих на динамические нагрузки.

Наибольшее распространение в практике получили БГС, стенка которых подкреплена поперечными ребрами жесткости, хотя допускается использование балок с неподкрепленными стенками. Условная гибкость стенки в БГС с поперечными ребрами жесткости принимается в пределах $6 < \bar{\lambda}_w \leq 13$.

Потеря устойчивости плоских стенок БГС происходит на начальной стадии загрузки. Стенка переходит в новую устойчивую форму, имеющую вид наклонной растянутой складки возле опор, что связано с действием усилий сдвига. В средних по длине балки сечениях, вследствие действия сжимающих усилий, стенка балки приобретает форму выпуклой поверхности. Эти деформации стенок называют «хлопунами», после разгрузки балки они исчезают. Экспериментально доказано, что после потери местной устойчивости стенки происходит перераспределение напряжений. [4, с. 179-190]

В обычных балках толщина стенок, как правило, определяется расчетами на местную устойчивость, а не из условия прочности. Одним из путей снижения металлоемкости балок является гофрирование их стенок. Впервые балки с гофрированной стенкой появились еще в середине 3-го десятилетия XX в. Гибкость стенок таких балок значительно выше по сравнению с обычными балками с гибкой стенкой, и достигает 300...600. Также стоит отметить, что чем тоньше стенка, тем легче выполнить ее гофрирование. [5, с.294-295]

Одним из показателей экономичности сечения балки является совпадение эпюр внутренних усилий балок и эпюр несущей способности. Однако применение балок имеющих криволинейное очертание поясов или стенки приводит к существенному повышению трудоемкости изготовления и не всегда удобно с конструктивной точки зрения. Поэтому на

практике пролет балки разбивают на несколько участков, для каждого из которых принимают свои размеры поперечного сечения балки соответственно действующим усилиям.

В сварных конструкциях используют два варианта изменения сечений - путем изменения ширины пояса или размеров стенки. Нормы рекомендуют в балках пролетом до 30 м выполнять изменение сечения один раз на расстоянии $1/6$ пролета от опоры, таким образом, балка состоит из трех элементов. Средний участок проектируют по моменту в середине пролета, а два крайних - по моменту в месте изменения сечения и поперечной силе на опоре. [5, с.252-253]

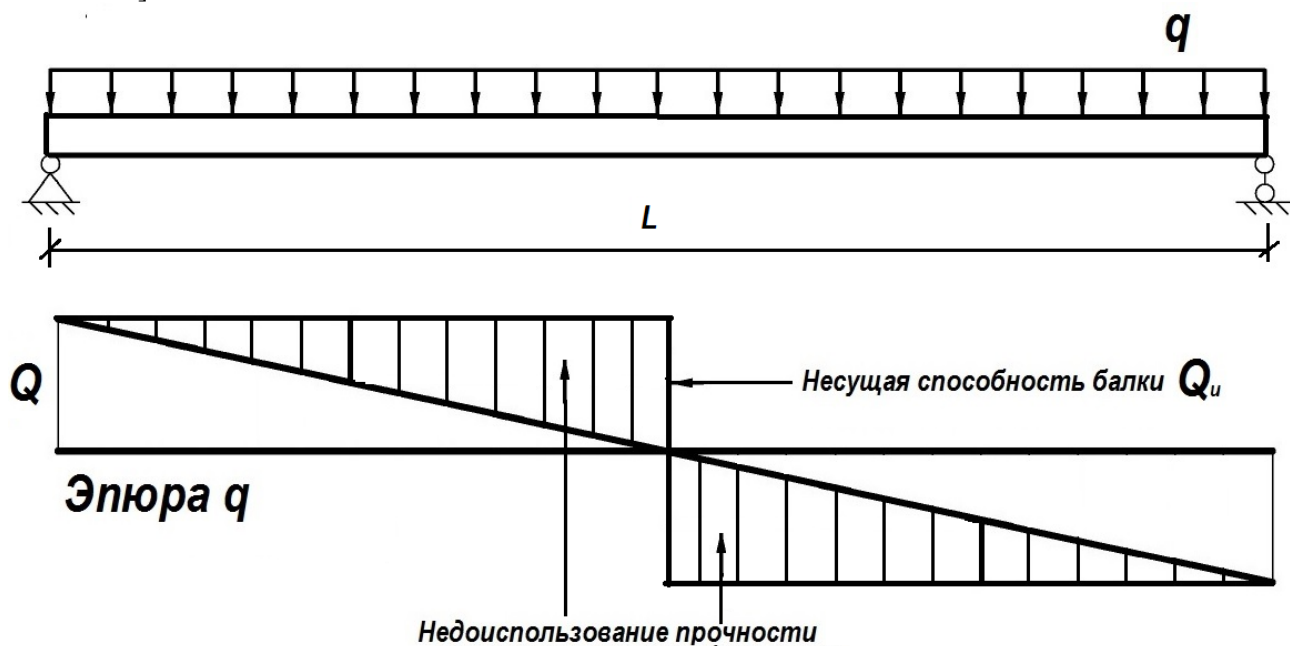


Рис 1. Балка с постоянным сечением

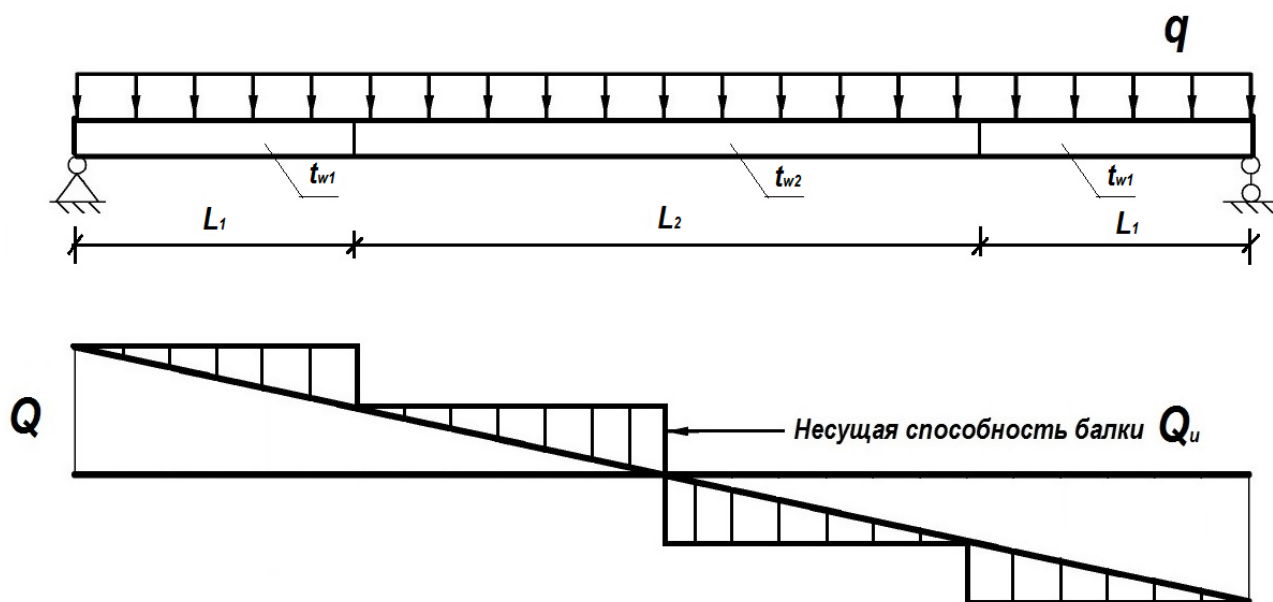


Рис. 2 Балка с переменным сечением

Актуальность исследования обусловлена применением множества конструктивных решений разрезных балок пролетных строений конвейерных галерей, обладающих малой

материалоемкостью. Отметим, что помимо требований малой материалоемкости к конструкциям пролетных строений конвейерных галерей предъявляются и эксплуатационные требования, а именно требования к динамическим характеристикам. Существенно улучшить весовые характеристики двутавровых балок можно путем уменьшения расхода материала на менее напряженных участках, где прочность стали используется не полностью [1, с. 7]. В то же время, снижение металлоемкости балок приводит и к уменьшению стоимости их производства. Изменение поперечного сечения балок по длине выполняется путем концентрации материала в наиболее напряженных участках.

В работе рассмотрены два варианта конструктивного решения двутавровой металлической балки – с постоянным поперечным сечением по длине балки и с переменным сечением. Длина балок составляла 12 м, высота 2,1 м, толщина полок $t_f=64$ мм. Балки укреплялись поперечными ребрами жесткости толщиной 17 мм через каждые 3 м.

Балки с поперечным сечением имели приведенную гибкость $\overline{\lambda_{w1}}=3,2$, $\overline{\lambda_{w2}}=2,5$, толщина стенок 21 и 27 мм соответственно. У балок с переменным сечением сброс сечения был принят на расстоянии 3,2 от края балки. Приведенная гибкость третьей балки в приопорных участках составляла $\overline{\lambda_{w3o}}=1,7$, в середине пролета $\overline{\lambda_{w3c}}=2,5$. Приведенная гибкость четвертой балки в приопорных участках составляла $\overline{\lambda_{w3o}}=2,5$ в середине пролета $\overline{\lambda_{w3c}}=3,2$.

Метод конечных элементов ориентирован на применение компьютерных технологий. Он объединяет в себе особенности метода сосредоточенных масс и метода обобщенных координат. МКЭ позволяет построить удобную и обоснованную модель системы. [6, с. 16-17]. При моделировании конструкции рассматривают как некоторую совокупность конструктивных элементов, которые соединяются между собой в узловых точках. При заданных соотношениях между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента, можно исследовать поведение конструкции в целом [7, с.11].

Моделирование выполнялось для разрезных шарнирно опертых балок. Результаты получены на основе использования программного комплекса SCAD, реализующего для динамического анализа метод Ланцоша [8, с. 102-105]. Ректангулярная сетка конечных элементов применялась в исследовании. Использовались конечные элементы – пластины размером 100x100 мм с толщинами 21-64 мм [7]. Нормами рекомендуется анализировать 3-5 низших форм колебаний. Во избежание накопления ошибок интегрирования, в моделировании задавалось 10 форм колебаний. Для дальнейших исследований использовались первые 5 форм. Выполнено сопоставление полученных результатов с известными приближенными решениями [9].

Расчеты выполнены методом конечных элементов в среде ПК SCAD. Численный анализ проводился при расчете балок с заданными геометрическими характеристиками.

Граничные условия соответствовали шарнирному закреплению. Размеры поперечных сечений балок приняты в соответствии с рекомендациями [10]. Данные были получены для сварной балки двутаврового сечения пролетом 12 м.

Практическая сходимость результатов исследований обеспечивается совпадением полученных значений при изменении размеров конечных элементов [11].

Численное моделирование выполнялось для двух вариантов конструктивного решения балок – с постоянным и переменным сечениями стенки по длине пролета. В приопорных участках толщина стенки балки принималась $t_{w1}=27; 40$ мм, и в середине пролета $t_{w2}=21; 27$ мм. Уменьшение толщины стенки балки позволяло снизить вес всей конструкции до 4% (500 кг стали). Анализируя частоты первых пяти форм колебаний балок, можно отметить, что уменьшение толщины стенки балки в средних по длине пролета сечениях не оказывает существенного влияния на значения первых трех нижних частот. Частоты второй и третьей форм колебаний близки для рассмотренных вариантов балок. В то же время, для четвертой и пятой форм колебаний снижение веса стенки приводит к увеличению частот колебаний. Так в четвертой форме различие частот между балками со сплошным и переменным сечением составляет 2%, а в пятой форме уже 12%.

Таблица 1. Собственные частоты балки

Форма колебаний	Частота			
	Постоянное $\bar{\lambda}_w=3,2$	Переменное $\bar{\lambda}_{w1}=2,5; \bar{\lambda}_{w2}=3,2$	Постоянное $\bar{\lambda}_w=2,5$	Переменное $\bar{\lambda}_{w1}=1,7; \bar{\lambda}_{w2}=2,5$
1	4,588718	4,464683	4,390783	4,166171
2	20,66258	20,62797	20,2869	20,25716
3	21,81534	21,80108	21,6469	21,25716
4	27,81187	28,35302	32,32494	33,1197
5	28,68401	32,74477	34,26849	38,98993

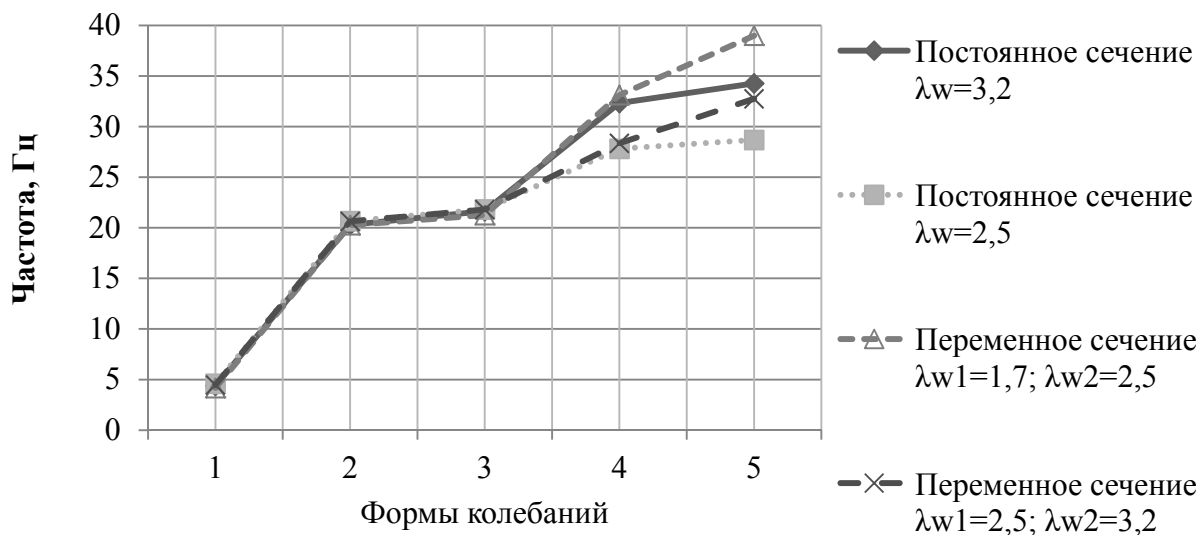


Рис. 3 Собственные частоты балки

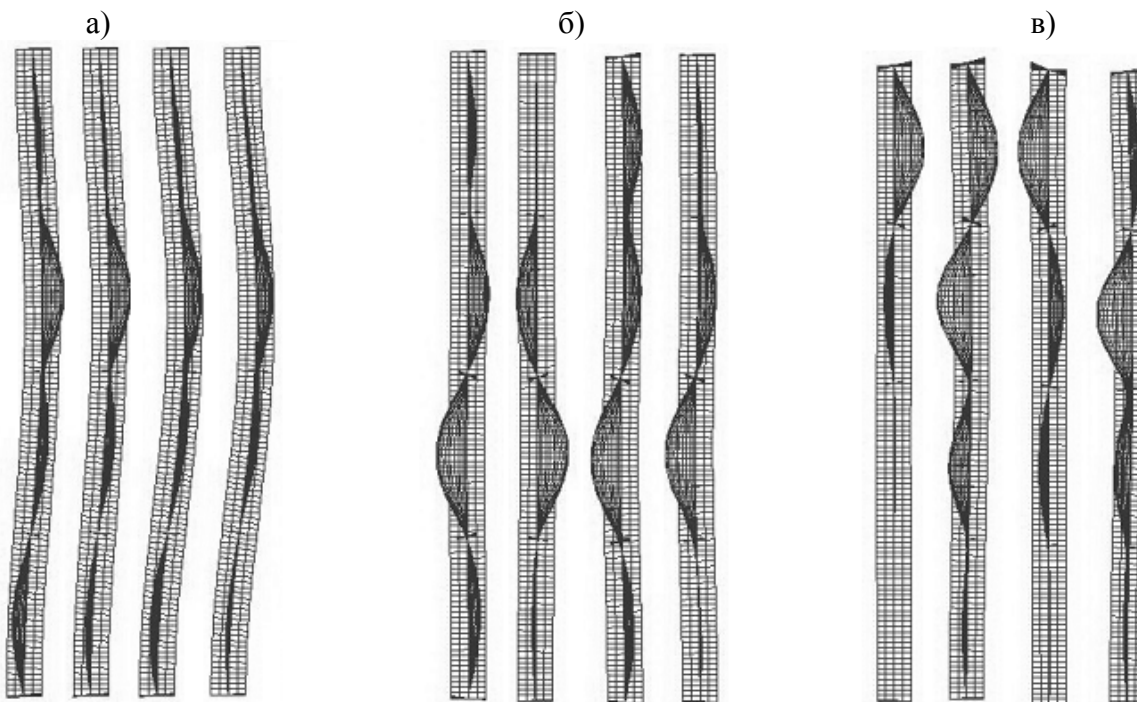


Рис. 4 Собственные формы балки: а – форма 3, б – форма 4, в – форма 5. постоянное $\bar{\lambda}_w=3,2$, переменное $\bar{\lambda}_{w1}=2,5; \bar{\lambda}_{w2}=3,2$ постоянное $\bar{\lambda}_w=2,5$, переменное $\bar{\lambda}_{w1}=1,7; \bar{\lambda}_{w2}=2,5$

Первой и второй формам соответствуют безузловые изгибные колебания, как для балок постоянного сечения, так и балок с переменным сечением стенки. Отличительной особенностью 3-5 форм колебаний балок с переменным сечением стенки является увеличение амплитуд колебаний стенки в средних по длине участках стенки и уменьшение амплитуд колебаний стенки в приопорных участках. Таким образом, увеличение толщины стенки в приопорных участках способствует снижению уровня вибрационных воздействий передаваемых с балки на опоры, т.е. улучшает эксплуатационные свойства балки.

На основе полученных результатов исследования, можно сделать вывод о том, что уменьшение толщины стенки сварной двутавровой металлической балки в средних по длине пролета участках не оказывает существенного влияния на характеристики первой и второй форм колебаний. Применение балок с облегченной стенкой позволяет снизить расходы стали. В то же время, для третьей, четвертой и пятой форм колебаний, наблюдается существенное уменьшение амплитуд колебаний в приопорных участках, что позитивно отражается на эксплуатационных характеристиках балки.

Список литературы

1. Полтораднев А.С. Параметрическая оптимизация стальных тонкостенных балок двутаврового сечения // Инженерные сооружения на транспорте. – М.: МИИТ, 2012. – вып. 4
2. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції/ Київ: Мінрегіонбуд, 2010
3. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В., Белов І.Д., Лавріненко Л.І., Володимирський В.О. Металеві конструкції: Підручник / Під загальною редакцією В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. – К.: Видавництво «Сталь», 2008. – 812 с.
4. Нілов А.А., Пермяков В.А., Прицкер А.Я. Стальные конструкции производственных зданий Справочник.-К. Будівельник, 1986.- 272 с.
5. Горев В.В. Металлические конструкции. том 1 Элементы конструкций / В.В. Горев – М.: Высшая школа, 2002. - 552 с.
6. Клааф Р., Пензиен Дж Динамика сооружений: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с. – Первод изд.: Dynamics of Structures/Ray W. Clough, Joseph Penzien. – New York, 1975.
7. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике [Текст]: Монография / О.К. Зенкевич – Москва: Мир, 1975 – 543 с.
8. Фиалко, С., Реализация в программном комплексе SCAD блочного метода Ланцоша со сдвигами применительно к сейсмическому анализу сооружений [Текст]: Статья. / С. Фиалко – CADmaster, №5/2007
9. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике [Текст]: Научное издание / А.В. Перельмутер, - М.: SCAD Soft, 2014 - с.214
10. Пособия по проектированию конвейерных галерей (к СНиП 2.09.03-85)/ГПИ Ленпроектстальконструкция. – М.: Стройиздат, 1989. – 111 с.
11. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З. Structure CAD для пользователя/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов – Киев, 2003. – 328с.